

RAPPORT D'ETUDE

ETUDE RADIOLOGIQUE DES SABLES DE LA PLAGE DE TREBEZY (SAINT-NAZAIRE)

Caractérisation radiologique du site, évaluation
dosimétrique, recherche de l'origine

RÉSUMÉ

Mots clés : singularité radioactive, sable radioactif, thorium, monazite, Saint-Nazaire, Loire

À la suite de la détection par un particulier d'un niveau de radioactivité élevé sur la plage de Trébézy à Saint-Nazaire en Loire-Atlantique, confirmée par la CRIIRAD et l'association Vert Pays Blanc et Noir, l'IRSN (devenu ASNR au 1er janvier 2025) a démarré en 2023 le projet NAVAL dans l'objectif de caractériser cette singularité radiologique (caractérisations radiologique, chimique et minéralogique), d'évaluer l'exposition radiologique des usagers de la plage et de déterminer son origine.

Deux campagnes de terrain ont été réalisées en 2023 et 2024 afin de cartographier l'extension de cette singularité sur le plan radiologique, d'examiner le contexte géologique local et de collecter des échantillons de sables et de roches. Ces derniers ont été ensuite analysés en laboratoire afin de déterminer leurs caractéristiques radiologique, chimique et minéralogique. Les valeurs de débit d'équivalent de dose les plus élevées atteignent $2,15 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ et sont mesurées à un mètre au-dessus des sables de couleur lie-de-vin présents au pied de la falaise. L'identification des radionucléides par spectrométrie gamma *in situ* et les résultats d'analyse en laboratoire des prélèvements de sables indiquent la présence majoritaire de thorium et d'uranium, deux radioéléments d'origine naturelle, et confirment l'absence de radioactivité d'origine artificielle. Les résultats de ces analyses et des mesures *in situ* sont cohérents avec ceux publiés par la CRIIRAD en 2022. La présence de ces radioéléments (thorium et uranium) est liée à celle de la monazite, un minéral dense, connu pour contenir d'importantes quantités de thorium (et dans une moindre mesure d'uranium) et couramment rencontré en contexte géologique granitique et métamorphique (cas du Massif Sud-Armoricain). Les sables les plus radioactifs contiennent jusqu'à 5 % en masse de ce minéral.

L'évaluation dosimétrique, effectuée sur la base des résultats de mesures et de scénarios d'exposition avec des paramètres moyens et majorants, indique que la dose associée à la fréquentation de la plage de Trébézy est au maximum de l'ordre de 1 mSv.an^{-1} et de quelques dizaines de microsieverts par an en considérant des hypothèses de fréquentation plus réalistes. La dose associée à la fréquentation de la plage est principalement due à l'irradiation externe. Les doses maximales susceptibles d'être reçues sur la plage de Trébézy sont du même ordre de grandeur que celles qui avaient été estimées par l'IRSN sur une plage en Camargue contenant des sables présentant une radioactivité naturelle élevée dans le cadre d'une étude menée entre 2000 et 2007.

S'agissant enfin de l'origine de la singularité radiologique, les monazites sont présentes dans les roches (migmatites) à l'affleurement et surplombant la plage de Trébézy et ses environs. L'érosion de la falaise littorale semble donc être la source la plus probable d'apport des monazites sur la plage. L'accumulation des sables radioactifs dans des zones localisées de la plage pourrait alors résulter d'un tri hydraulique des grains aboutissant à la concentration des minéraux les plus denses. En outre, la caractérisation minéralogique des sables prélevés a montré que leur coloration lie-de-vin est liée à la présence de minéraux denses peu radioactifs (grenats et ilménite), également présents dans les roches environnantes.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION GENERALE.....	6
2. CARACTERISATION DE L'ANOMALIE RADIOACTIVE.....	7
2.1. Secteur d'étude	7
2.2. Campagnes d'observation, de caractérisation <i>in situ</i> et de prélèvements	8
2.3. Caractérisation radiologique	10
2.3.1. Cartographie du débit d'équivalent de dose.....	10
2.3.2. Mesures par spectrométrie gamma <i>in situ</i>	11
2.3.3. Analyses par spectrométrie gamma des échantillons de sable et d'eau de mer	12
2.4. Caractérisation chimique et minéralogique des sables	13
2.4.1. Analyses chimiques élémentaires des sables.....	13
2.4.2. Caractéristiques physiques des sables	14
2.4.3. Analyse de la minéralogie des échantillons de sable et de roche	14
2.5. Conclusion sur la caractérisation de l'anomalie radioactive	15
3. EVALUATION DOSIMETRIQUE.....	15
3.1. Scénario d'exposition	16
3.2. Irradiation externe	17
3.3. Ingestion	18
3.4. Inhalation	19
3.5. Conclusion	19
4. RECHERCHE DE L'ORIGINE DES MINERAUX RADIOACTIFS	20
4.1. Hypothèse d'une origine côtière proximale.....	20
4.1.1. Rôle des roches affleurantes et de la dynamique sédimentaire	20
4.1.2. Signature géochimique des monazites.....	21
4.2. Hypothèse d'une origine continentale et distale.....	22
4.3. Hypothèse d'une origine anthropique	23
4.4. Conclusion sur l'origine de la singularité radiologique	24
5. CONCLUSION GENERALE.....	24
ANNEXES	28

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figures

Figure 1. Formations géologiques et localisation des plages dans la baie de Bonne Anse, d'après [6]	8
Figure 2. Photographies de la zone de la plage de Trébézy où un dépôt de sables couleur lie-de-vin était visible en surface en mai 2023 (à gauche) et ne l'était plus en mars 2024 (image du milieu, prise avec un point de vue décalé de 3 mètres vers l'est). A droite, aperçu d'une alternance de dépôts de sables plus ou moins colorés en profondeur (environ 2 mètres).	8
Figure 3. Photographies des mesures par un dispositif mobile (à gauche) et par spectrométrie gamma in situ sur la plage de Trébézy (au milieu et à droite).	9
Figure 4. Localisation des prélèvements de sable et de roche destinés à l'analyse. La liste des échantillons prélevés et analysés est fournie dans l'Annexe 3 avec le contexte de prélèvement et le type d'analyse.	10
Figure 5. Débit d'équivalent de dose à 1 mètre du sol sur la plage et la crique de Trébézy	11
Figure 6. Teneurs en Th (à gauche) et U (à droite) en fonction de la somme des teneurs en terres rares légères (La, Ce, Nd, Pr) dans les sables prélevés dans le secteur d'étude centré sur Trébézy	14
Figure 7. Observation d'inclusions radioactives dans du granite (à gauche, ROC-1), d'inclusions de monazites et de zircons dans les migmatites (au milieu, ROC-2) et de monazites altérées dans le grès micacé (à droite, ROC-6).	15
Figure 8. Proportion du Nd en fonction du Th dans une monazite de composition $Ce_aLa_bNd_cTh_d(PO_4)$. Le Nd est choisi ici à titre d'exemple parmi les quatre terres rares les plus abondantes présentes dans les sables de Trébézy afin d'établir cette distribution. Les données des sables et des roches du secteur de Trébézy sont issues de cette étude, celles des sables de la Loire proviennent d'une autre étude (TRAJECTOIRE, ANR-19-CE3-0009, 2020-2025) et celles des monazites présentes ailleurs dans le monde sont issues de la littérature [22][23][24][25][26][27][28][29][30][31][32][33][34][35].	22
Figure 9. Teneurs en terres rares légères normalisées à celles des chondrites [40] dans les sables et roches du secteur de Trébézy et dans les sables de la Loire (données TRAJECTOIRE, ANR-19-CE3-0009, 2020-2025)	23
Figure 10. Carte de visite élaborée par l'ASNR à destination des citoyens et citoyennes intéressés par l'avancement de l'étude.	30

Tableaux

Tableau 1. Résultats des mesures réalisées par spectrométrie gamma in situ. Les activités sont dites « équivalentes » car rapportées au signal de ^{228}Ac au point de référence.	12
Tableau 2. Temps passé, suivant la classe d'âge, à pratiquer différentes activités les jours de visite de la plage de Trébézy (heures par jour).	16
Tableau 3. Débits respiratoires ($m^3.h^{-1}$) suivant l'activité physique, la classe d'âge et le sexe	16
Tableau 4. Quantités ingérées par inadvertance.	17
Tableau 5. Rapport entre la dose efficace E et l'équivalent de dose ambiant H.	17
Tableau 6. Dose efficace reçue par irradiation externe ($mSv.an^{-1}$)	17

Tableau 7. Activités des radionucléides dans le sable le plus actif (Bq.kg ⁻¹)	18
Tableau 8. Dose efficace reçue par ingestion de radionucléides (mSv.an ⁻¹)	18
Tableau 9. Dose efficace reçue par inhalation de radionucléides (mSv.an ⁻¹)	19
Tableau 10. Dose efficace totale annuelle susceptible d'être reçue par les usagers de la plage de Trébézy (mSv.an ⁻¹)	19
Tableau 11. Liste des échantillons avec les caractéristiques de prélèvement, les étapes de traitement et les analyses effectuées	32
Tableau 12. Liste des méthodes de préparation et d'analyses des échantillons solides	33
Tableau 13. Minéraux lourds radioactifs courants avec leur composition, leur densité, et des indications sur leur teneur en U et Th [12][16]	34
Tableau 14. Activités des radionucléides dans les sables, exprimées en Bq.kg ⁻¹ sec, et dans l'eau de mer, en Bq.L ⁻¹ . La mention « na » signifie « non analysé ».	35
Tableau 15. Caractéristiques physiques et chimiques des sables et des roches	36
Tableau 16. Caractéristiques physiques et chimiques des sables et des roches (suite)	37
Tableau 17. Composition minéralogique des sables établie par spectrométrie infra-rouge	38

1. INTRODUCTION GENERALE

En avril 2022, un particulier a détecté la présence d'une singularité radiologique sur des sables de couleur sombre à l'est de la plage de Trébézy, située sur la commune de Saint-Nazaire en Loire-Atlantique. Avec l'assistance de la Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité (CRIIRAD), l'association locale Vert Pays Blanc et Noir (VPBN) a procédé à des relevés du flux de rayonnement gamma qui ont confirmé la présence d'anomalies radiologiques sur la plage de Trébézy et mis en évidence une autre anomalie radiologique dans la crique voisine située à l'est de la plage. Dans un rapport rendu public [1], les résultats de la CRIIRAD ont mis en évidence la présence d'un flux de rayonnements gamma 10 fois supérieur à celui du fond radiologique local (valeur de 1 600 coups par seconde (cps) vs. 150 à 185 cps). Ces observations ont été confirmées par des mesures de débit d'équivalent de dose, la valeur maximale relevée étant de $1,47 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ à 1 mètre du sol [1]. L'analyse des sables par la CRIIRAD a mis en évidence la présence d'activités « élevées » en radionucléides naturels : jusqu'à 970 Bq.kg^{-1} pour les descendants de l'uranium 238 et $4\,300 \text{ Bq.kg}^{-1}$ pour les descendants du thorium 232.

Dans le secteur investigué, la présence de sables avec des niveaux de radioactivité plus élevés a déjà été documentée dans la littérature scientifique des années 1980 [2]. Les travaux antérieurs avaient attribué l'élévation des niveaux de radioactivité en certains endroits de la plage de Trébézy (appelée « plage du Petit-Gavy ») à la concentration de minéraux lourds porteurs d'uranium et de thorium tels que les zircons et les monazites [2]. Les accumulations de minéraux lourds et radioactifs observées sur la plage de Trébézy ont alors été décrites comme typiques des placers qui se forment en contexte littoral et répartis en différents endroits du monde [3][4][5].

Sollicitée par les autorités locales sur le sujet, l'IRSN (devenu ASNR le 1^{er} janvier 2025) a démarré en 2023 le projet NAVAL (étude de l'aNomalie rADioactiVe des sAbles des plages de l'estuaire de la Loire) dont les objectifs sont :

- 1) la caractérisation radiologique, chimique et minéralogique, comprenant l'évaluation de l'extension spatiale de l'anomalie ;
- 2) l'évaluation dosimétrique des expositions de la population fréquentant ces lieux ;
- 3) la recherche de l'origine de l'anomalie radioactive.

Une carte de visite avec QR code a été élaborée à destination des citoyens et citoyennes ayant exprimé un intérêt pour le suivi du projet (Annexe 1).

Une première campagne de terrain visant à réaliser la caractérisation radiologique et l'évaluation de l'extension de l'anomalie radiologique s'est déroulée fin mai 2023. Elle a été complétée par une deuxième campagne de prospection géologique menée en mars 2024 conjointement avec le Laboratoire Géosciences Paris-Saclay (GEOPS¹). Cette deuxième campagne a permis de prélever des échantillons complémentaires de sable et de roche en vue de leur caractérisation chimique et minéralogique afin de déterminer l'origine de l'anomalie radioactive.

Ce rapport restitue les résultats des caractérisations réalisées, en particulier les caractérisations radiologiques à partir desquelles est établie l'évaluation dosimétrique pour les usagers de la plage, également présentée dans un chapitre dédié. Les principales hypothèses sur l'origine de l'anomalie radioactive sont ensuite discutées sur la base de la caractérisation des minéraux porteurs de radioactivité retrouvés dans le secteur de Trébézy.

¹ <https://www.geops.universite-paris-saclay.fr/>

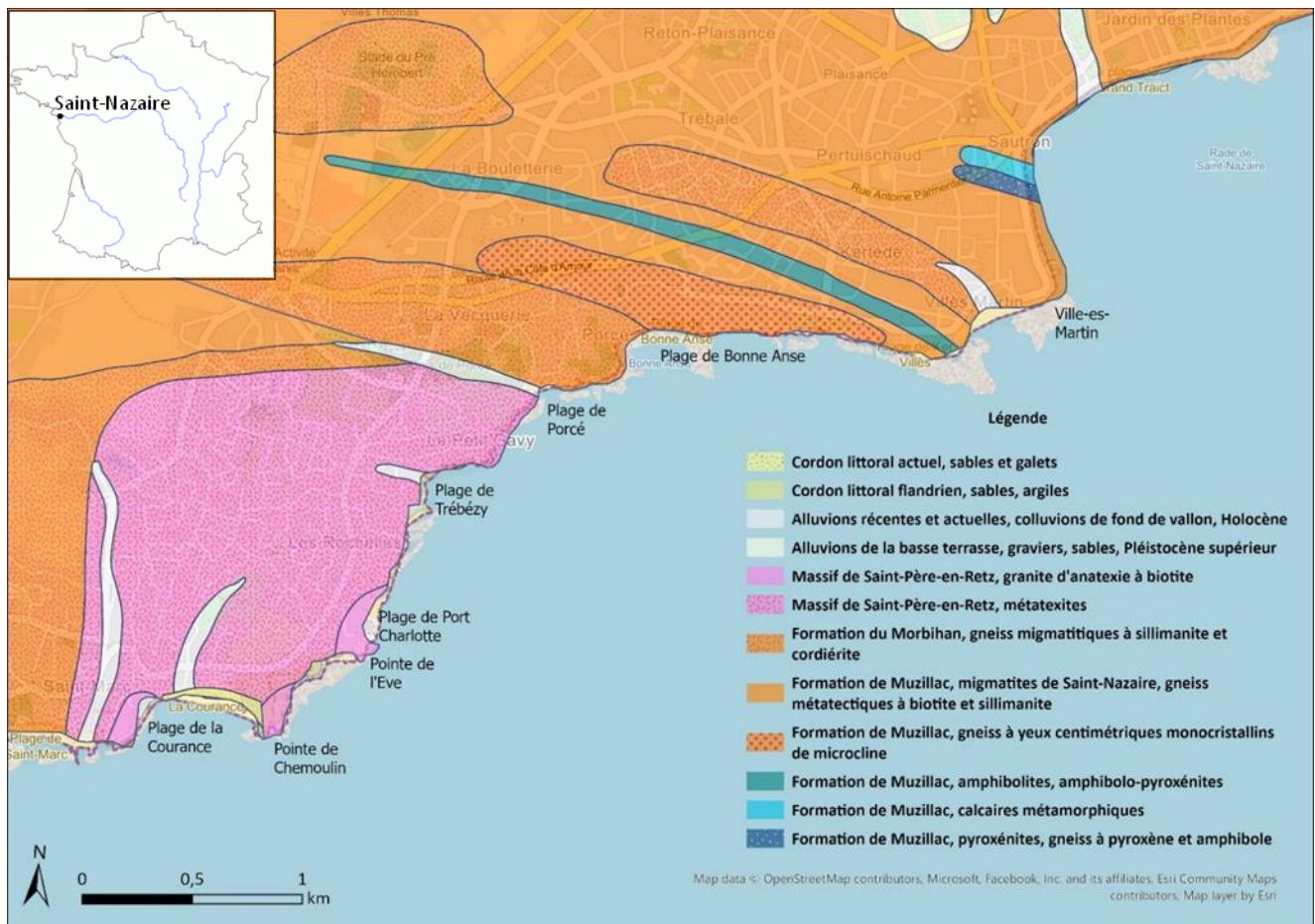
2. CARACTERISATION DE L'ANOMALIE RADIOACTIVE

Deux campagnes de terrain ont été conduites par l'ASNR en mai 2023 et en mars 2024 afin de réaliser la caractérisation radiologique, chimique et minéralogique de la plage de Trébézy et de la crique voisine. Cette caractérisation se base sur des observations visuelles, des mesures sur site et sur l'analyse d'échantillons de sable, de roche et d'eau prélevés dans un secteur d'étude centré sur la plage de Trébézy. Ces échantillons ont été analysés dans les laboratoires de l'ASNR et du Laboratoire Géosciences Paris-Saclay (GEOPS).

2.1. Secteur d'étude

Le secteur d'étude a pour centre la plage de Trébézy et s'étend sur le littoral, à l'est jusqu'au phare de Ville-es-Martin et à l'ouest jusqu'à la Pointe de l'Eve (Figure 1). Il s'agit des deux extrémités de la baie de Bonne Anse, qui se distingue par une morphologie en criques et petites plages séparées par des rochers et bordées par une falaise littorale caractérisée par une diversité dans la nature des roches.

Sur le plan géologique, le secteur d'étude fait partie du domaine Sud-Armoricain. Il se situe sur l'un des flancs de l'anticlinal de Saint-Nazaire et les roches sont principalement des anciens sédiments précambriens ayant subi, lors de l'orogénèse varisque, un fort métamorphisme et une fusion partielle, menant à la formation de migmatites. Leur âge est estimé à environ 330 – 320 Ma par datation U – Th – Pb sur des monazites [6]. D'après la carte géologique au 1/50 000 de Saint-Nazaire et sa notice [7], plusieurs types de migmatites² sont présentes.



² Les migmatites sont des roches métamorphiques issues d'une fusion partielle de la croûte terrestre correspondant à un mélange avec des proportions variables de roches non fondues (paléosome) et de roches fondues puis recrystallisées (néosome).

Figure 1. Formations géologiques et localisation des plages dans la baie de Bonne Anse, d'après [6]

2.2. Campagnes d'observation, de caractérisation *in situ* et de prélèvements

En premier lieu, les campagnes de terrain menées par l'ASNR ont permis de réaliser des observations visuelles. L'anomalie radioactive découverte sur la plage de Trébézy en avril 2022 se manifestait sous la forme d'un dépôt de sable de couleur lie-de-vin situé près de la falaise à l'est de la plage. Ce dépôt était visible en mai 2023 lors de la première campagne de l'ASNR et ne l'était plus en mars 2024 pour la deuxième campagne de terrain (Figure 2).

Trois tranchées perpendiculaires au trait de côte ont été creusées sur les plages de Trébézy et de Bonne Anse pour observer les dépôts de sables en profondeur. Sur la plage de Trébézy une alternance de dépôts de sables colorés plus ou moins foncés et intercalés par des dépôts de sables plus clairs a ainsi pu être mise en évidence (Figure 2). Lorsque les dépôts de sable coloré sont visibles en surface à Trébézy, ils sont situés le long de la falaise, dans un secteur qui n'est que peu atteint par la marée hors coefficients de marnage très élevés. Les hauteurs de la plage sont cependant à la portée des vagues de tempête, qui ont l'énergie suffisante pour remobiliser et/ou y apporter des minéraux lourds en quantité [8].

Lors des campagnes de terrain, l'ASNR a réalisé :

- une cartographie du débit d'équivalent de dose gamma ambiant à un mètre du sol de la plage de Trébézy et de la crique attenante, en condition de marée basse afin de déterminer l'extension spatiale de l'anomalie radiologique (Annexe 2) ;
- deux mesures par spectrométrie gamma *in situ* (Figure 3; Annexe 2) permettant d'identifier les radionucléides émetteurs gamma à l'origine de ce débit d'équivalent de dose et de déterminer leurs abondances relatives. La première de ces mesures correspond à une zone où le débit de dose est maximal (« point chaud ») et la seconde à une zone où le débit de dose est minimal (« point de référence ») ;
- des prélèvements d'échantillons de sable en fonction de leurs caractéristiques radiologiques (mesures radiométriques ponctuelles) et visuelles (observation d'une coloration), d'échantillons de roche typiques des formations géologiques locales, ainsi qu'un prélèvement d'eau de mer.



Figure 2. Photographies de la zone de la plage de Trébézy où un dépôt de sables couleur lie-de-vin était visible en surface en mai 2023 (à gauche) et ne l'était plus en mars 2024 (image du milieu, prise avec un point de vue décalé de 3 mètres vers l'est). A droite, aperçu d'une alternance de dépôts de sables plus ou moins colorés en profondeur (environ 2 mètres).



Figure 3. Photographies des mesures par un dispositif mobile (à gauche) et par spectrométrie gamma in situ sur la plage de Trébézy (au milieu et à droite).

S'agissant plus précisément des prélèvements, un travail de repérage sur les plages situées entre la Pointe de l'Eve et le phare de Ville-es-Martin a été réalisé en vue d'une part de localiser les zones remarquables de couleur et/ou de radioactivité (repérées à l'aide d'un radiamètre de type AT 1121), d'autre part de repérer les formations géologiques affleurantes et surplombant les plages en s'appuyant sur leur description reportée sur la carte géologique au 1/50 000 (extension spatiale et faciès minéralogique). Toutes les zones remarquables avec des sables colorés visibles en surface et où le relevé radiamétrique indiquait une augmentation d'au moins deux fois le bruit de fond ont fait l'objet de prélèvements de sable.

Au total, 39 échantillons de sables ont été prélevés dans le secteur de Trébézy puis analysés (Figure 4 ; Annexe 3). Huit échantillons de roche ont été prélevés sur les affleurements bordant les plages et criques du secteur investigué (Figure 4). Les échantillons de roche sélectionnés représentent les différentes formations géologiques présentes dans le secteur (migmatites à Trébézy, Ville-es-Martin et Bellefontaine, grès micacés à Virechat et pyroxéno-amphibolite à Ville-es-Martin). Les roches visibles constitutives de l'estran n'ont pas été prélevées car leur aspect très altéré les rend impropres à l'analyse minéralogique (l'altération a conduit à une modification chimique des minéraux d'intérêt, voire à leur disparition). En complément, un prélèvement d'eau de mer a été effectué au droit de la crique de Trébézy.



Figure 4. Localisation des prélèvements de sable et de roche destinés à l'analyse. La liste des échantillons prélevés et analysés est fournie dans l'Annexe 3 avec le contexte de prélèvement et le type d'analyse.

L'ensemble des méthodes de préparation et d'analyses des échantillons solides qui ont été mises en œuvre dans cette étude est synthétisé en Annexe 4.

2.3. Caractérisation radiologique

La caractérisation radiologique de l'anomalie a consisté en la réalisation d'une cartographie du débit d'équivalent de dose, ainsi que de mesures de spectrométrie gamma sur site et sur échantillons.

2.3.1. Cartographie du débit d'équivalent de dose

La cartographie du débit d'équivalent de dose (DeD) de la plage de Trébézy a consisté en l'enregistrement de 6 410 mesures de DeD géolocalisées, avec une densité de mesures plus élevée sur la partie nord de la plage de Trébézy et dans la crique, ces zones ayant été identifiées par la CRIIRAD comme présentant les débits d'équivalent de dose les plus élevés [1].

La Figure 5 suivante présente une interpolation par krigeage des mesures de débits d'équivalent de dose réalisées à l'aide du système mobile (SPIR-Pack)³.

³Les mesures de débits d'équivalent de dose ont été corrigées de l'atténuation due au porteur du système mobile et du rayonnement cosmique.

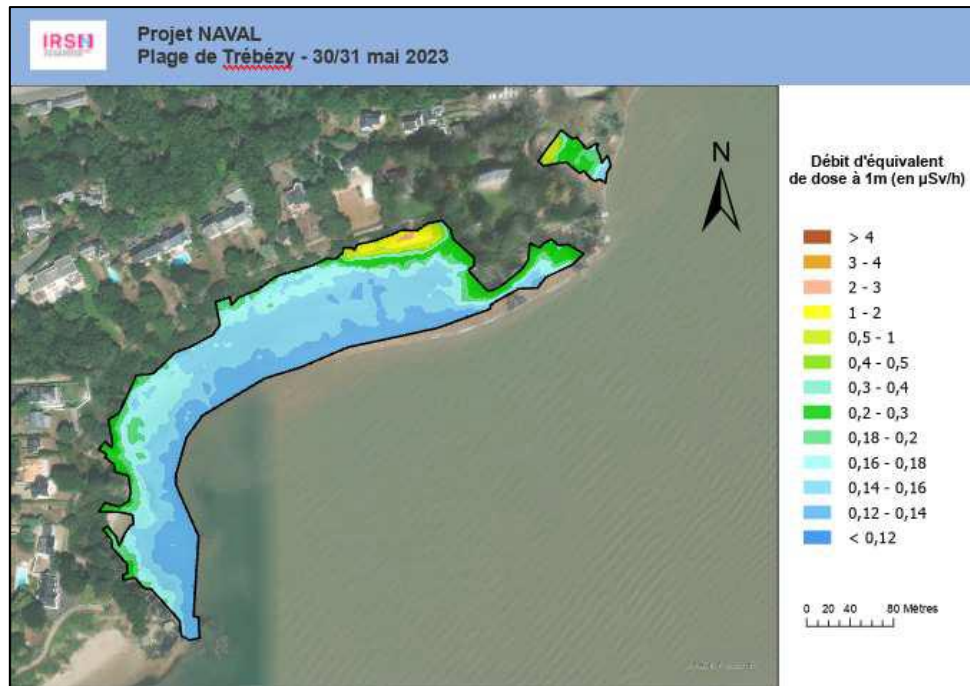


Figure 5. Débit d'équivalent de dose à 1 mètre du sol sur la plage et la crique de Trébézy

La plage et la crique de Trébézy présentent deux zones marquées par une élévation significative du débit d'équivalent de dose. La première, qui s'étend sur une surface d'environ 100 mètres par 30 mètres à l'extrême nord de la plage, présente des valeurs de débit d'équivalent de dose gamma ambiant (à 1 mètre) jusqu'à $2,15 \mu\text{Sv.h}^{-1}$; la seconde, qui s'étend sur une surface d'environ 20 mètres par 5 mètres à l'ouest de la crique, présente des valeurs de débit d'équivalent de dose ambiant jusqu'à $0,91 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. Ces zones présentent les mesures de débit d'équivalent de dose les plus élevées : les 10 mesures les plus élevées, toutes situées dans la zone rose/orange de la Figure 5, sont comprises entre 2,00 et $2,15 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que la valeur maximale documentée dans le rapport de la CRIIRAD [1], c'est-à-dire $1,47 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ à 1 mètre du sol.

2.3.2. Mesures par spectrométrie gamma *in situ*

Afin de déterminer les radionucléides présents dans le sable de la plage et de comparer les activités entre la zone présentant le plus fort débit d'équivalent de dose et une zone proche du fond radiologique local, des mesures par spectrométrie gamma ont été réalisées en deux points de la plage présentant des caractéristiques radiologiques contrastées. Ces points sont représentés sur la Figure 4 et correspondent aux points « chaud » et de « référence ».

Les conditions d'acquisition de ces mesures n'ont pas permis de quantifier précisément l'activité des différents radionucléides émetteurs gamma présents dans les sables de plage. En effet, le champ de vision du détecteur est de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres et les zones d'investigation ne présentent pas les caractéristiques requises (terrain non plat ni homogène, présence d'un bord de mer et d'un relief rocheux à proximité). Les mesures acquises permettent néanmoins d'identifier les radionucléides émetteurs gamma présents, d'examiner les abondances relatives des radionucléides et de vérifier *in fine* l'état d'équilibre⁴ dans les chaînes de décroissance naturelle (uranium 238 et thorium 232).

Les spectres gamma obtenus montrent la présence des radionucléides naturels attendus à savoir le potassium 40 (^{40}K), les descendants du thorium 232 (^{232}Th) et les descendants de l'uranium 238 (^{238}U). On note l'absence de radionucléides émetteurs gamma artificiels.

⁴On désigne par « équilibre » le fait que les radionucléides descendants de l'uranium 238 ou du thorium 232 aient des activités égales, au moins jusqu'au radium 226 (pour la chaîne de l'uranium 238). Le constat de cet équilibre témoigne en faveur d'une origine géogénique des radionucléides considérés (absence de modification d'origine anthropique).

Afin de comparer les deux zones investiguées l'une par rapport à l'autre, les activités calculées ont été ramenées à une valeur en équivalent actinium 228 (^{228}Ac) acquise sur le point de référence. Le Tableau 1 suivant présente ces activités dites « équivalentes ».

Tableau 1. Résultats des mesures réalisées par spectrométrie gamma in situ. Les activités sont dites « équivalentes » car rapportées au signal de ^{228}Ac au point de référence.

En éq. ^{228}Ac	Point de référence	Point "chaud"
Famille ^{232}Th ^{228}Ac	1,00	12,14
^{212}Pb	0,92	10,35
^{212}Bi	1,20	11,98
^{208}Tl	0,38	4,13
Famille ^{238}U $^{234\text{m}}\text{Pa}$	Non détecté	4,30
^{226}Ra	0,52	2,93
^{214}Pb	0,58	2,99
^{214}Bi	0,57	3,08

Ces résultats montrent que :

- les équilibres sont respectés dans les deux chaînes de décroissance présentées, que ce soit sur le point de référence ou sur le point « chaud » ;
- les activités sur le point « chaud » sont environ d'un ordre de grandeur supérieures aux activités sur le point de référence pour les descendants du thorium 232. Ce facteur est d'environ 6 pour les descendants de l'uranium 238 ($2,93 / 0,52 = 5,6$ pour le radium 226) ;
- la prépondérance des descendants de la famille du thorium 232 par rapport aux descendants de la famille de l'uranium 238 est nettement plus marquée sur le point « chaud » que sur le point de référence.

2.3.3. Analyses par spectrométrie gamma des échantillons de sable et d'eau de mer

Des analyses quantitatives par spectrométrie gamma de l'ensemble des radionucléides mesurables dans les différents échantillons de sable et dans l'échantillon d'eau de mer (après préconcentration) ont été réalisées. Il s'agissait en particulier de rechercher les radioisotopes descendants des chaînes radioactives naturelles du ^{232}Th , ^{235}U et ^{238}U , les radionucléides naturels d'origine cosmique (^7Be , ^{22}Na) ou tellurique (^{40}K) et les radionucléides artificiels usuellement observés dans l'environnement (^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{137}Cs , etc.). Les résultats d'analyses sont fournis dans l'Annexe 5.

L'analyse des descendants du ^{232}Th et de ^{238}U , qui sont les éléments radioactifs les plus abondants dans les sables de Trébézy, conduit à une estimation des activités massiques en ^{232}Th et ^{238}U comprises entre 19 à 6 900 Bq.kg⁻¹ et 11 à 1 390 Bq.kg⁻¹, respectivement. Les résultats confirment la prépondérance des descendants de la famille du thorium 232 par rapport aux descendants de la famille de l'uranium 238. L'enrichissement en thorium par rapport à l'uranium est nettement plus marqué pour les points de prélèvements avec un débit de dose élevé (SABL-4, 8, 10) que pour les points de prélèvement où le débit de dose était relativement faible (SABL-5, 6, 11).

L'examen des activités des radionucléides dans les chaînes de l' ^{238}U et du ^{232}Th indique que les équilibres sont respectés dans tous les sables prélevés sur la plage de Trébézy et dans la crique voisine. On notera que l'échantillon de sable prélevé sur la plage de Bonne Anse (SABL-9) présente une signature radiologique proche des sables peu radioactifs prélevés sur la plage de Trébézy. L'absence d'un déséquilibre radioactif significatif

entre radionucléides d'une même chaîne indique que les sables ont une composition radiologique d'origine géogénique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu d'extraction préférentielle anthropique d'un radionucléide au détriment d'un autre. **En d'autres termes, les sables ne présentent pas les caractéristiques d'un matériau qui aurait été exploité en vue d'extraire de l'uranium, du thorium ou du radium seuls** (cf. chapitre 4).

Dans l'échantillon d'eau mer, seul le potassium 40 a été mesuré avec une valeur de $10,2 \pm 0,8 \text{ Bq.L}^{-1}$, cohérente avec les valeurs attendues dans l'océan Atlantique. Les autres radionucléides émetteurs gamma n'ont pas été détectés (valeurs d'activité inférieures au « seuil de décision »).

Sur l'ensemble des échantillons de sable analysés, aucun radionucléide artificiel n'a été mis en évidence⁵.

A noter enfin que le prélèvement de sable SABL-10 présente les valeurs d'activité les plus élevées et que ces activités sont supérieures aux valeurs maximales relevées par la CRIIRAD [1]. Les valeurs d'activité de cet échantillon sont celles qui ont été retenues afin d'évaluer l'exposition radiologique des usagers de la plage de Trébézy (cf. chapitre 3 ci-après).

2.4. Caractérisation chimique et minéralogique des sables

Différentes méthodes d'analyses chimiques et minéralogiques (Annexe 4) ont été mises en œuvre pour déterminer la composition minéralogique des sables, identifier les phases minérales porteuses de la radioactivité dans les sables et les roches et rechercher les marqueurs permettant de lier l'origine des sables radioactifs aux roches présentes dans le secteur investigué.

2.4.1. Analyses chimiques élémentaires des sables

Les données obtenues par spectrométrie de masse (Annexe 6) confirment que les éléments radioactifs les plus abondants dans les sables de Trébézy sont des descendants du thorium 232 et de l'uranium 238 : les teneurs en ces deux éléments varient de 5 à 1 648 mg.kg^{-1} en ^{232}Th et de 1 à 110 mg.kg^{-1} en ^{238}U . En tenant compte des activités spécifiques du thorium 232 ($4,067 \cdot 10^3 \text{ Bq.g}^{-1}$) et de l'uranium 238 ($1,244 \cdot 10^4 \text{ Bq.g}^{-1}$), les valeurs maximales correspondent respectivement à environ 6 700 Bq.kg^{-1} et 1 370 Bq.kg^{-1} en thorium 232 et uranium 238. Ces valeurs sont cohérentes avec celles mesurées par spectrométrie gamma.

Les résultats des analyses chimiques montrent également que certains sables peuvent être très riches en éléments les plus légers de la famille des lanthanides tels que le lanthane (La), le cérium (Ce), le praséodyme (Pr) et le néodyme (Nd). L'échantillon SABL-29 contient jusqu'à 11 137 mg.kg^{-1} de Ce, 5 959 mg.kg^{-1} de La, 4 450 mg.kg^{-1} de Nd et 1 187 mg.kg^{-1} de Pr, alors que l'échantillon SABL-11 contient seulement quelques dizaines de mg.kg^{-1} de ces éléments. Les sables possèdent aussi une quantité significative de zirconium (Zr), de 26 à 1 064 mg.kg^{-1} . Ils sont très riches en titane (Ti) : jusqu'à 80 000 mg.kg^{-1} , soit 8 % (pourcentage massique) dans l'échantillon SABL-29.

La Figure 6 illustre la relation de proportionnalité entre les teneurs en éléments radioactifs (U et Th) et la somme des teneurs des terres rares les plus abondantes (La, Ce, Pr, Nd). Cette relation de proportionnalité indique soit une association entre ces éléments au sein d'une même phase minérale, soit une association dans les sables de phases minérales porteuses de ces éléments. Dans le cas du thorium, l'excellente corrélation observée avec les terres rares ($R^2 = 0,99$) indique que les monazites constituent les principales phases porteuses de thorium. Dans le cas de l'uranium, la corrélation est légèrement moins bonne ($R^2 = 0,94$) suggérant que les monazites ne seraient pas les seules phases minérales porteuses d'uranium.

⁵Les valeurs d'activité des radionucléides artificiels sont inférieures au « seuil de décision ».

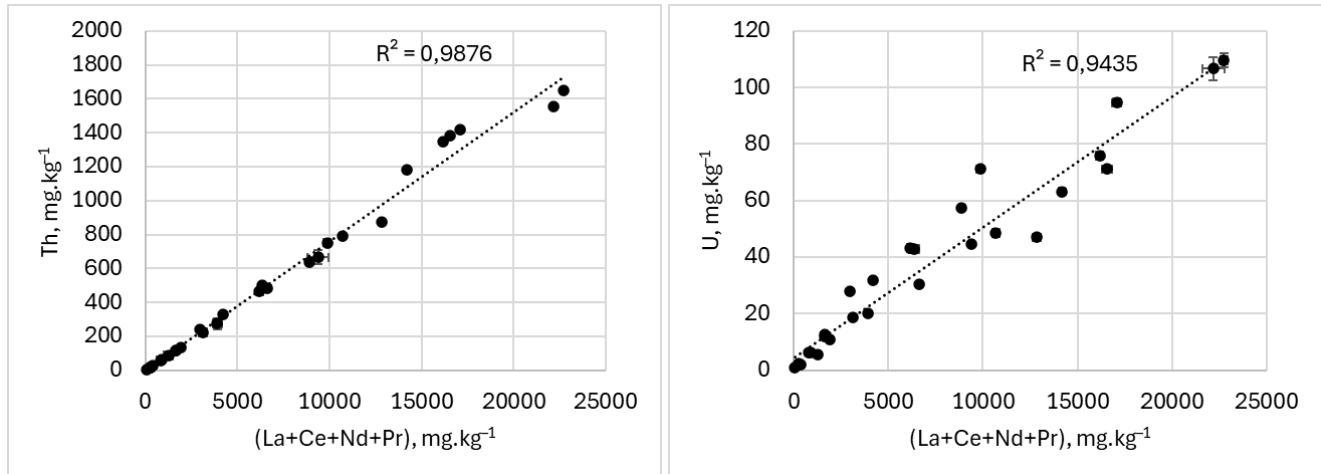


Figure 6. Teneurs en Th (à gauche) et U (à droite) en fonction de la somme des teneurs en terres rares légères (La, Ce, Nd, Pr) dans les sables prélevés dans le secteur d'étude centré sur Trébézy

2.4.2. Caractéristiques physiques des sables

La densité réelle des sables varie de 2,6 (SABL-11) à 4,1 g.cm⁻³ (SABL-22) ; le tableau des résultats est fourni en Annexe 6. Les sables colorés (les plus radioactifs) présentent également la densité la plus importante.

Deux échantillons de sables de Trébézy avec des teneurs en Th très différentes (SABL-3 avec 25 mg.kg⁻¹ de Th et SABL-7 avec 1 554 mg.kg⁻¹ de Th) ont fait l'objet d'une analyse granulométrique pour identifier une éventuelle relation entre taille de grains et radioactivité. Les deux sables ont des distributions granulométriques normales (allure gaussienne) et des valeurs moyennes égales à 367 ± 10 µm pour SABL-3 et 330 ± 1 µm pour SABL-7. Bien que le sable radioactif soit légèrement plus fin que le sable peu radioactif (330 contre 367 µm en moyenne), il n'est pas possible sur cette base de conclure que la radioactivité serait portée par la fraction fine des grains de sables. Pour cela, une analyse de la distribution de la radioactivité par classe de taille des grains de sables serait nécessaire.

2.4.3. Analyse de la minéralogie des échantillons de sable et de roche

L'analyse des échantillons de sable par diffraction de rayons X (DRX) indique la présence systématique de quartz, grenat, ilménite et biotite. Parmi les minéraux susceptibles de porter la radioactivité, l'analyse des sables par spectrométrie infra-rouge (IRTF) a mis en évidence la prépondérance des monazites et des zircons : jusqu'à 9 % et 2 % respectivement dans l'échantillon SABL-7 (Annexe 7). Dans les sables présentant les teneurs en Th les plus élevées (SABL-7,29,36 où Th > 1 347 mg.kg⁻¹) la proportion de quartz est inférieure à 2 %, ce qui illustre le caractère singulier de ce mélange de minéraux dans lequel le quartz, principal constituant d'un sable ordinaire, est presque absent. Sont associés aux minéraux porteurs de la radioactivité (monazites et zircons) d'autres minéraux considérés comme denses (densité supérieure à 2,89 g.cm⁻³) tels que l'ilménite, les grenats, le rutile et la tourmaline. La présence de monazites et de zircons dans les sables a été confirmée par les observations par microscopie (MEB et cathodoluminescence).

Dans les échantillons de roche prélevés dans le secteur d'étude et analysés au microscope polarisant, ont été observés les mêmes minéraux que ceux présents dans les sables de Trébézy, à savoir les quartz, la biotite, les grenats, ainsi que des inclusions avec halo noir caractéristiques des minéraux radioactifs (Figure 7). Les observations en cathodoluminescence ont révélé la présence de zircons en inclusion dans les biotites. Les observations au MEB ont mis en évidence la présence de zircons et de monazites de tailles variables (de 10 à 260 µm) dans les migmatites (Trébézy), le granite (Virechat) et le grès micacé (Virechat) (Figure 7). Il est intéressant de relever que ces grains de minéraux radioactifs ne sont pas exclusivement en inclusion dans les biotites mais se retrouvent tout autant dans le quartz ou le plagioclase.

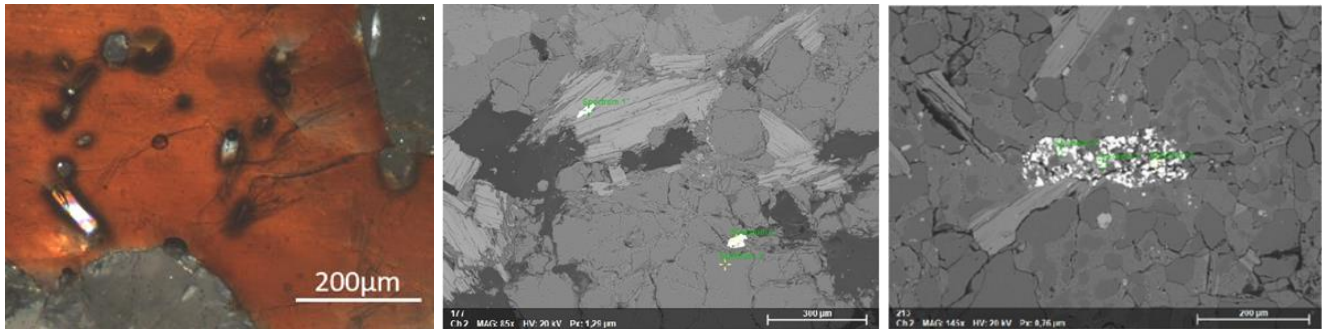


Figure 7. Observation d'inclusions radioactives dans du granite (à gauche, ROC-1), d'inclusions de monazites et de zircons dans les migmatites (au milieu, ROC-2) et de monazites altérées dans le grès micacé (à droite, ROC-6).

Dans les dépôts de sables radioactifs, la monazite n'apparaît pas responsable de la coloration observée, l'observation de grains de monazite au microscope ayant mis en évidence une couleur jaunâtre tirant sur l'ocre. *A contrario*, les grenats, de couleur rose, ont été observés en forte quantité dans les sables radioactifs (jusqu'à 72 % dans l'échantillon SABL-15 prélevé à Bonne Anse ; Annexe 7) ainsi que des grains d'ilménite, de couleur noire (jusqu'à 30 % dans SABL-29 prélevé dans la crique de Trébézy ; Annexe 7). C'est l'association de ces minéraux denses et peu radioactifs qui confère la couleur lie-de-vin aux sables où l'anomalie radioactive a été détectée.

2.5. Conclusion sur la caractérisation de l'anomalie radioactive

La caractérisation radiologique de la plage et de la crique de Trébézy a été réalisée par l'ASNR, sur la base d'investigations de terrain et de l'analyse en laboratoire des prélèvements collectés. La cartographie du débit d'équivalent de dose montre la présence de deux zones « marquées ». La première, qui s'étend sur une surface d'environ 100 mètres par 30 mètres, présente des valeurs de débit d'équivalent de dose gamma ambiant (à 1 mètre) jusqu'à $2,15 \mu\text{Sv.h}^{-1}$; la seconde, qui s'étend sur une surface d'environ 20 mètres par 5 mètres, présente des valeurs de débit d'équivalent de dose ambiant jusqu'à $0,91 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. L'ensemble des mesures de débit d'équivalent de dose gamma ambiant et des résultats d'analyse d'uranium et de thorium dans les sables prélevés sur le reste du secteur d'étude n'a pas révélé d'anomalie radioactive équivalente à celles observées sur la plage et dans la crique de Trébézy. Les résultats de ces analyses et des mesures *in situ* sont cohérents avec ceux publiés par la CRIIRAD [1] en 2022.

La radioactivité de la plage de Trébézy est due majoritairement au thorium 232 et dans une moindre mesure à l'uranium 238. Ces deux radioéléments sont en équilibre avec les différents radioisotopes qui constituent leurs chaînes de décroissance radioactive respectives. Cela indique que les sables ont une composition radiologique d'origine géogénique et que les minéraux qui les composent ne sont pas issus de l'exploitation de minerais ayant subi un traitement chimique en vue d'extraire de l'uranium, du thorium ou du radium.

Le thorium 232 et l'uranium 238 sont contenus majoritairement dans les monazites, une phase minérale présente à des teneurs de l'ordre de plusieurs pourcents dans les sables. D'autres minéraux comme les zircons pourraient porter des quantités plus faibles d'uranium.

3. EVALUATION DOSIMETRIQUE

L'exposition radiologique des usagers de la plage de Trébézy résultant du niveau élevé de radioactivité sur cette plage est estimée ici, en termes de dose efficace, à partir des résultats de mesure de débit d'équivalent de dose ambiant ainsi que de l'analyse des échantillons de sable et d'eau prélevés en mai 2023 [9], sous l'hypothèse de scénarios représentant le comportement supposé des usagers.

Cette exposition résulte de l'irradiation externe par le sable, de l'inhalation des grains les plus fins mis en suspension dans l'air par le vent et de l'ingestion par inadvertance de sable. La dose associée à chaque voie d'exposition est calculée pour les différentes classes d'âge des usagers suivant une estimation majorante, pour

borner la dose susceptible d'être reçue en fréquentant la plage, et suivant une estimation moyenne, pour fournir un ordre de grandeur plus réaliste de l'exposition moyenne. L'estimation majorante considère que la personne représentative des usagers se tient en permanence au point de la plage où le débit de dose le plus élevé a été mesuré, que l'aérosol de sable conduit au niveau maximum d'un empoussièrement moyen suivant le guide de gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives [10] et que les radionucléides sont sous leur forme la plus soluble. L'estimation moyenne retient la valeur médiane du débit de dose ambiant mesuré sur la plage, le niveau minimum d'un empoussièrement moyen et une solubilité gastro-intestinale de 0,5 % pour les radionucléides contenus dans les sables, correspondante à la valeur de solubilité la plus élevée évaluée pour des sables du littoral de Camargue [11].

3.1. Scénario d'exposition

La population qui fréquente la plage de Trébézy et ses habitudes n'ont pas été caractérisées précisément dans le cadre de cette étude. À défaut, les scénarios utilisés pour les précédentes évaluations dosimétriques de l'exposition potentielle liée à l'accumulation naturelle d'uranium et de thorium dans les sables de certaines plages du littoral de Camargue [11] ont été appliqués. Les scénarios qui supposent le temps de présence annuel le plus long sont retenus ici : scénario "villégiature" pour les adolescents et les adultes, scénario "famille touriste" pour les enfants. Les budgets temps quotidiens correspondant sont rapportés dans le Tableau 2. Le nombre annuel de jours de visite de la plage de Trébézy est fixé à 36 jours (18 visites de 2 jours) par an suivant le scénario "villégiature".

Tableau 2. Temps passé, suivant la classe d'âge, à pratiquer différentes activités les jours de visite de la plage de Trébézy (heures par jour)

activité / âge	< 1 an	1 - 2 ans	3 - 7 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans	> 17 ans
repos	6	7	6	5	5,5	5,5
exercice léger	2	1	2	2	7,5	9,75
exercice intense	0	0	0	1	1	0,25
temps hors plage	16	16	16	16	10	8,5

Un débit respiratoire spécifique correspond au niveau d'activité physique, à l'âge et au sexe. Il est fixé, dans le Tableau 3, aux valeurs indiquées par le guide de gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives [10], complétées par la publication 66 de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) [12] pour le débit respiratoire du nourrisson en exercice léger. Pour les âges supérieurs à 7 ans, les valeurs correspondant à l'homme sont retenues car elles sont plus élevées que celles de la femme et conduisent donc à une estimation dosimétrique plus pénalisante.

Tableau 3. Débits respiratoires ($m^3.h^{-1}$) suivant l'activité physique, la classe d'âge et le sexe

activité / âge	< 1 an	1 - 2 ans	3 - 7 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans	> 17 ans
repos (femme)	0,09	0,22	0,32	0,38	0,4	0,39
repos (homme)					0,48	0,54
exercice léger (femme)	0,19	0,35	0,57	1,12	1,3	1,25
exercice léger (homme)					1,38	1,5
exercice intense (femme)	-	-	-	1,84	2,57	2,7
exercice intense (homme)	-	-	-	2,22	2,92	3

Les quantités de sable et d'eau de mer ingérées par inadvertance sont fixées aux valeurs suggérées par le Groupe radioécologie nord Cotentin [13] indiquées dans le Tableau 4.

Tableau 4. Quantités ingérées par inadvertance

matériau / âge	< 1 an	1 - 2 ans	3 - 7 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans	> 17 ans
sable (g.an ⁻¹)	-	5	2	1	0,5	0,5
eau de mer (L.an ⁻¹)	-	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1

3.2. Irradiation externe

La dose efficace n'est pas directement accessible à la mesure. En pratique, l'équivalent de dose ambiant est la grandeur opérationnelle mesurée pour fournir une approximation prudente, c'est-à dire majorante, de la dose efficace. Le débit d'équivalent de dose ambiant le plus élevé mesuré à 1 m du sol sur la plage de Trébézy est de 2,15 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$. Le débit de dose au même emplacement mais au contact du sable est de 2,3 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$. Les valeurs médianes sur la surface de la plage sont de 0,15 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ à 1 m du sol et de 0,16 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ au contact [9].

Le rapport entre l'équivalent de dose ambiant et la dose efficace dépend de l'énergie du rayonnement, de l'âge de la personne exposée et de la géométrie d'irradiation. La conversion entre les deux grandeurs s'appuie ici sur les coefficients de débit de dose efficace et de débit d'équivalent de dose ambiant fournis par la publication CIPR 144 pour chaque radionucléide distribué de façon homogène à la surface du sol [14]. Puisqu'il n'est pas possible de discriminer précisément la contribution des différents radionucléides aux mesures de débit d'équivalent de dose ambiant, la valeur du coefficient de conversion en dose efficace la plus élevée parmi les principaux radionucléides émetteurs de photons dans les chaînes de décroissance de l'uranium 238 (²³⁴Th, ^{234m}Pa, ²³⁴Pa, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi), du thorium 232 (²²⁸Ac, ²¹²Pb, ²¹²Bi, ²⁰⁸Tl) et le potassium 40 est retenue pour cette étude. Le Tableau 5 présente les valeurs ainsi retenues des coefficients de conversion d'équivalent de dose ambiant en dose efficace.

Tableau 5. Rapport entre la dose efficace E et l'équivalent de dose ambiant H

âge	< 1 an	1 - 2 ans	3 - 7 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans	> 17 ans
rapport E/H	0,94	0,85	0,79	0,74	0,69	0,67

Les débits de dose efficace sont multipliés par les temps du Tableau 2 pour obtenir des doses annuelles. Le débit d'équivalent de dose ambiant à 1 m du sol, ajusté par les rapports du Tableau 5, est appliqué aux périodes d'exercice des personnes de 3 ans et plus, alors que le débit d'équivalent de dose ambiant au contact du sable, ajusté par les rapports du Tableau 5, est appliqué aux périodes de repos et à l'ensemble du temps passé par les enfants de moins de 3 ans. Les résultats obtenus sont indiqués dans le Tableau 6.

Tableau 6. Dose efficace reçue par irradiation externe (mSv.an⁻¹)

âge	< 1 an	1 - 2 ans	3 - 7 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans	> 17 ans
estimation majorante	0,62	0,56	0,52	0,48	0,77	0,82
estimation moyenne	0,043	0,039	0,036	0,033	0,054	0,057

3.3. Ingestion

Les activités des radionucléides dans les sables sont estimées dans le Tableau 7 à partir des résultats de mesure de l'échantillon de sable le plus actif en descendants de l'uranium 238 et du thorium 232 (référéncé SABL-10). Lorsque l'activité d'un radionucléide de la chaîne de ²³²Th, ²³⁸U et ²³⁵U n'est pas quantifiable par spectrométrie gamma, l'activité est prise égale à celle du radionucléide qui le précède dans la chaîne en faisant l'hypothèse d'un équilibre radioactif.

Tableau 7. Activités des radionucléides dans le sable le plus actif (Bq.kg⁻¹)

chaîne de l'uranium 238		chaîne du thorium 232		chaîne de l'uranium 235		potassium 40	
radionucléide	activité (Bq.kg ⁻¹)	radionucléide	activité (Bq.kg ⁻¹)	radionucléide	activité (Bq.kg ⁻¹)	radionucléide	activité (Bq.kg ⁻¹)
²³⁸ U	1390	²³² Th	6900	²³⁵ U	72	⁴⁰ K	112
²³⁴ Th	1390	²²⁸ Ra	6900	²³¹ Th	72		
^{234m} Pa	1387	²²⁸ Ac	6900	²³¹ Pa	72		
²³⁴ Pa	4,6	²²⁸ Th	6600	²²⁷ Ac	69		
²³⁴ U	1390	²²⁴ Ra	6500	²²³ F	0,95		
²³⁰ Th	2500	²²⁰ Rn	6600	²²⁷ Th	71		
²²⁶ Ra	1620	²¹² Pb	6500	²²³ Ra	66		
²²² Rn	1545	²¹² Bi	6800	²¹⁹ Rn	69		
²¹⁸ Po	1545	²⁰⁸ Tl	2270	²¹¹ Pb	69		
²¹⁴ Pb	1580			²¹¹ Bi	69		
²¹⁴ Bi	1510			²⁰⁷ Tl	69		
²¹⁰ Pb	1310						
²¹⁰ Bi	1310						
²¹⁰ Po	1310						

Les coefficients de dose efficace engagée par activité ingérée sont ceux de l'arrêté du 16 novembre 2023 [15]. La dose reçue par ingestion de chaque radionucléide est le produit de la quantité de sable ingérée (Tableau 4) par son activité spécifique et par le coefficient de dose. Une étude in vitro de la solubilité des sables de Camargue avait montré que les radionucléides qu'ils contiennent sont très peu solubles, avec au plus 0,5 % d'activité dissoute par des sucs gastrique et intestinal [11]. L'estimation moyenne ne considère donc que la dose résultant de l'ingestion de 0,5 % de l'activité des radionucléides présents dans le sable. Les résultats obtenus sont indiqués dans le Tableau 8.

Tableau 8. Dose efficace reçue par ingestion de radionucléides (mSv.an⁻¹)

âge	< 1 an	1 - 2 ans	3 - 7 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans	> 17 ans
estimation majorante	0	0,35	0,082	0,040	0,024	0,0055
estimation moyenne	0	0,0017	0,00041	0,00020	0,00012	0,000028

3.4. Inhalation

L'analyse granulométrique du sable montre que la fraction thoracique susceptible de se déposer dans le poumon après inhalation, et correspondant aux particules de diamètre inférieur à 50 μm [16], représente environ 0,91 % du volume de sable (résultat obtenu au laboratoire après une mesure par granulométrie laser de l'échantillon SABL-10 le plus actif). Pour le calcul de la dose reçue par inhalation, cette fraction de 0,91 % du sable potentiellement inhalable après une remise en suspension par le vent et les activités de plage est arrondie à 1 %. La masse de sable mise en suspension est estimée aux deux bornes de la gamme de valeurs pour un degré d'empoussièrement qualifié de "moyen" par le guide [10] : 0,1 mg.m^{-3} (valeur présumée plutôt enveloppe et caractéristique d'une situation intermédiaire entre des activités à l'extérieur et du maraîchage) pour l'estimation moyenne et 10 mg.m^{-3} (situation intermédiaire entre du maraîchage et des travaux de chantier) pour l'estimation majorante. Les coefficients de dose efficace engagée par activité inhalée sont ceux de l'arrêté [15] en retenant le type d'absorption qui conduit à la dose la plus élevée. La dose reçue par inhalation de chaque radionucléide est le produit de la fraction thoracique de sable en suspension par son activité spécifique et par le coefficient de dose. Les résultats sont indiqués dans le Tableau 9.

Tableau 9. Dose efficace reçue par inhalation de radionucléides (mSv.an^{-1})

âge	< 1 an	1 - 2 ans	3 - 7 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans	> 17 ans
estimation majorante	0,0075	0,013	0,015	0,022	0,050	0,053
estimation moyenne	0,000075	0,00013	0,00015	0,00022	0,00050	0,00053

3.5. Conclusion

La dose efficace annuelle totale susceptible d'être reçue par les usagers de la plage de Trébézy via les trois voies d'exposition est indiquée dans le Tableau 10.

Tableau 10. Dose efficace totale annuelle susceptible d'être reçue par les usagers de la plage de Trébézy (mSv.an^{-1})

âge	< 1 an	1 - 2 ans	3 - 7 ans	8 - 12 ans	13 - 17 ans	> 17 ans
estimation majorante	0,63	0,92	0,61	0,54	0,84	0,88
estimation moyenne	0,043	0,041	0,037	0,034	0,054	0,058

La dose associée à la fréquentation de la plage de Trébézy est au maximum de l'ordre de 1 mSv.an^{-1} et vraisemblablement beaucoup plus faible, de l'ordre de quelques dizaines de microsieverts par an, en considérant des hypothèses plus réalistes. Elle est due principalement à l'irradiation externe par la plage. Affiner cette évaluation dosimétrique globale (toutes voies d'exposition considérées) en analysant les habitudes des usagers de la plage de Trébézy, en caractérisant les aérosols présents et la solubilité des radionucléides du sable, ne changerait pas son ordre de l'ordre de grandeur.

Les valeurs de dose indiquées dans le Tableau 10, y compris pour l'estimation moyenne, supposent une présence relativement fréquente et prolongée sur la plage, d'environ 290 à 560 h.an^{-1} (pour les enfants et les adultes respectivement). Pour une fréquentation plus réduite de la plage, la dose reçue serait plus faible, en proportion du temps passé sur place. L'exposition étant due principalement à l'irradiation externe, l'ordre de grandeur de la dose reçue est, en première approximation, égal au temps passé sur la plage (h.an^{-1}) multiplié par le débit d'équivalent de dose médian de 0,15 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$, ajusté par le rapport entre la dose efficace et l'équivalent de dose ambiant (Tableau 5). Par exemple, le scénario de fréquentation par une famille locale retenu par l'IRSN pour une plage de Camargue [11] faisait l'hypothèse d'une présence sur la plage 6 h.jour^{-1} pendant 13 jours.an^{-1} soit 78 h.an^{-1} . Une fréquentation de la plage de Trébézy pendant le même temps conduirait à une dose de l'ordre de 0,01 mSv.an^{-1} .

A titre de comparaison, l'exposition moyenne de la population française au rayonnement tellurique, dû aux radionucléides naturellement présents dans le sol, est de l'ordre de $0,63 \text{ mSv.an}^{-1}$, avec une gamme typique de variation de $0,36$ à $1,1 \text{ mSv.an}^{-1}$ sur l'ensemble du territoire [17]. La valeur moyenne correspond à un débit de dose tellurique de l'ordre de $0,07 \text{ } \mu\text{Sv.h}^{-1}$, inférieur d'environ 30 % à 50 % à la valeur moyenne observée sur la plage de Trébézy. Enfin, les doses maximales susceptibles d'être reçues à Trébézy sont du même ordre de grandeur que celles estimées par l'IRSN sur le littoral de Camargue (de $0,13$ à $0,77 \text{ mSv.an}^{-1}$ selon le scénario et la classe d'âge considérés) [11].

4. RECHERCHE DE L'ORIGINE DES MINÉRAUX RADIOACTIFS

La recherche de l'origine des minéraux radioactifs repose sur l'évaluation des hypothèses concernant la provenance des minéraux porteurs de la radioactivité au regard des processus qui ont pu conduire à leur accumulation sur la plage et sur la crique de Trébézy. Quatre hypothèses sont identifiées concernant leur provenance :

- une érosion côtière proximale des formations géologiques locales,
- une érosion d'origine continentale et distale avec un transport par la Loire,
- la reprise d'un stock sédimentaire situé en mer,
- un apport lié à des activités humaines (exploitation minière par exemple).

L'hypothèse d'une érosion côtière proximale a été particulièrement étudiée dans le cadre de ce travail en raison de la nature des formations géologiques présentes sur le secteur d'études (migmatites et granitoïdes), potentiellement porteuses de minéraux radioactifs. Cette hypothèse d'une source locale a également été proposée par L. Chauris dans les années 1980 pour expliquer l'origine des minéraux présents dans les sables des plages de l'estuaire de la Loire [2]. Néanmoins, des éléments de réponse sont également apportés dans cette étude concernant la validité des hypothèses liées à une origine ligérienne ou anthropique.

4.1. Hypothèse d'une origine côtière proximale

4.1.1. Rôle des roches affleurantes et de la dynamique sédimentaire

Les roches des formations géologiques affleurant à Trébézy et ses environs contiennent des monazites et des zircons, deux phases minérales porteuses de thorium (Th) et d'uranium (U) également retrouvées dans les sables de Trébézy. En raisonnant par analogie sur la nature des minéraux, les roches présentes à Trébézy et alentour sont donc susceptibles de libérer les minéraux radioactifs détectés sur la plage et la crique de Trébézy. La présence relevée de sables radioactifs au pied de la falaise suggérerait un apport direct des minéraux libérés par l'érosion de la falaise.

Les investigations de terrain ont mis en évidence en plusieurs endroits de la plage de Trébézy et en profondeur plusieurs niveaux de sables colorés et radioactifs (jusqu'à $1 \text{ } 347 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Th dans l'échantillon SABL-36) intercalés par des sables moins radioactifs (cf. Figure 2, photographie de droite). Ces observations indiquent que la quantité des sables radioactifs excède celle des dépôts potentiellement visibles en surface sur la plage de Trébézy. En d'autres termes, lorsque les dépôts de sables colorés sont visibles en surface, ils le sont dans un périmètre restreint situé au pied de la falaise au nord-est de la plage de Trébézy, tandis qu'en profondeur plusieurs niveaux de dépôts sableux colorés sont visibles et semblent couvrir une surface plus importante. Si l'apport direct de minéraux radioactifs par érosion de la falaise littorale peut expliquer la présence des minéraux radioactifs au pied de la falaise, un autre réservoir serait susceptible d'apporter des minéraux, comme les roches de l'estran appartenant aux mêmes formations géologiques surplombant la plage. Sous l'effet de la houle et des vents, différents processus de dépôt, de remise en suspension et de tri densimétrique peuvent ensuite contribuer à redistribuer les minéraux radioactifs sur toute la surface de la plage et favoriser l'accumulation des minéraux les

plus denses en certains endroits de la plage. Ces accumulations de minéraux denses (radioactifs ou non) sont classiquement observées en contexte littoral et désignées par le terme placers en géologie [18].

L'étude récente de la dynamique sédimentaire dans la baie de Bonne Anse indique un déficit de sédimentation au cours ces dernières décennies probablement causé par le creusement du chenal de navigation de Saint-Nazaire [19]. Le chenal favoriserait l'export vers le large d'une majorité des sédiments arrivant par la Loire et les empêcherait de se déposer sur les plages de Trébézy et ses alentours [19]. Par conséquent, la réduction des apports de sable ordinaire sur les plages au nord de l'estuaire pourrait favoriser la concentration des minéraux denses, radioactifs (monazites, zircons) ou non (ilménite, grenats), issus de l'érosion des formations géologiques locales. En d'autres termes, l'apport par la falaise littorale de minéraux denses sur la plage ne serait plus aussi dilué qu'auparavant par les apports de sable ordinaire en provenance de la Loire.

4.1.2. Signature géochimique des monazites

Les monazites, qui constituent les principales phases minérales porteuses du thorium et dans une moindre mesure de l'uranium, sont des phosphates de terres rares. L'enrichissement en terres rares légères (La, Ce, Nd, Pr) observé dans les sables du secteur de Trébézy est cohérent avec la composition d'autres sables riches en monazites connus dans le monde [20][21].

Pour identifier la provenance des sables de plage enrichis en monazites, une des méthodes repose sur l'examen comparatif de la composition en terres rares et en thorium entre les minéraux contenus dans les sables et les minéraux contenus dans les roches des formations géologiques susceptibles d'avoir libéré ces minéraux [21]. Pour réaliser cet examen, la présence de l'ensemble des quatre terres rares les plus abondantes (La, Ce, Nd, Pr) et de thorium (Th) a été supposée entrer dans la composition d'une monazite de formule théorique $\text{Ce}_a\text{La}_b\text{Nd}_c\text{Pr}_d\text{Th}_e(\text{PO}_4)$.

Sur la base de cette hypothèse, les résultats des analyses de composition élémentaire réalisées pour cette étude indiquent que les monazites du secteur de Trébézy auraient pour composition⁶ $\text{Ce}_{[0,45-0,47]}\text{La}_{[0,24-0,25]}\text{Nd}_{[0,17-0,19]}\text{Pr}_{[0,048-0,055]}\text{Th}_{[0,06-0,08]}(\text{PO}_4)$ dans les sables et $\text{Ce}_{[0,44-0,46]}\text{La}_{[0,21-0,22]}\text{Nd}_{[0,17-0,22]}\text{Pr}_{[0,048-0,055]}\text{Th}_{[0,06-0,13]}(\text{PO}_4)$ dans les roches. Les compositions en terres rares des roches et des sables étant très proches, l'hypothèse d'un apport de minéraux radioactifs par les roches de la falaise littorale est cohérente.

A titre d'information, la Figure 8 permet de situer la composition en Nd et Th des monazites du secteur de Trébézy parmi d'autres monazites présentes ailleurs en France (Pyrénées) et dans le monde (Amérique du Nord, Amérique du Sud, Asie, Asie du Sud, Asie de l'Est, Europe). Le nuage de points observé traduit la variabilité de la composition en Nd et Th dans les monazites. Cette variabilité est une conséquence de l'incorporation des éléments chimiques lors de la cristallisation des monazites qui varie selon les conditions de pression et de température locales. Dans le secteur de Trébézy, le domaine de variation de la composition en Nd et Th est relativement restreint en comparaison avec la variabilité documentée dans les monazites ailleurs dans le monde.

⁶ Les valeurs entre crochets correspondent à la fraction massique d'un élément au regard de la masse des cinq éléments (Ce, La, Nd, Pr, Th).

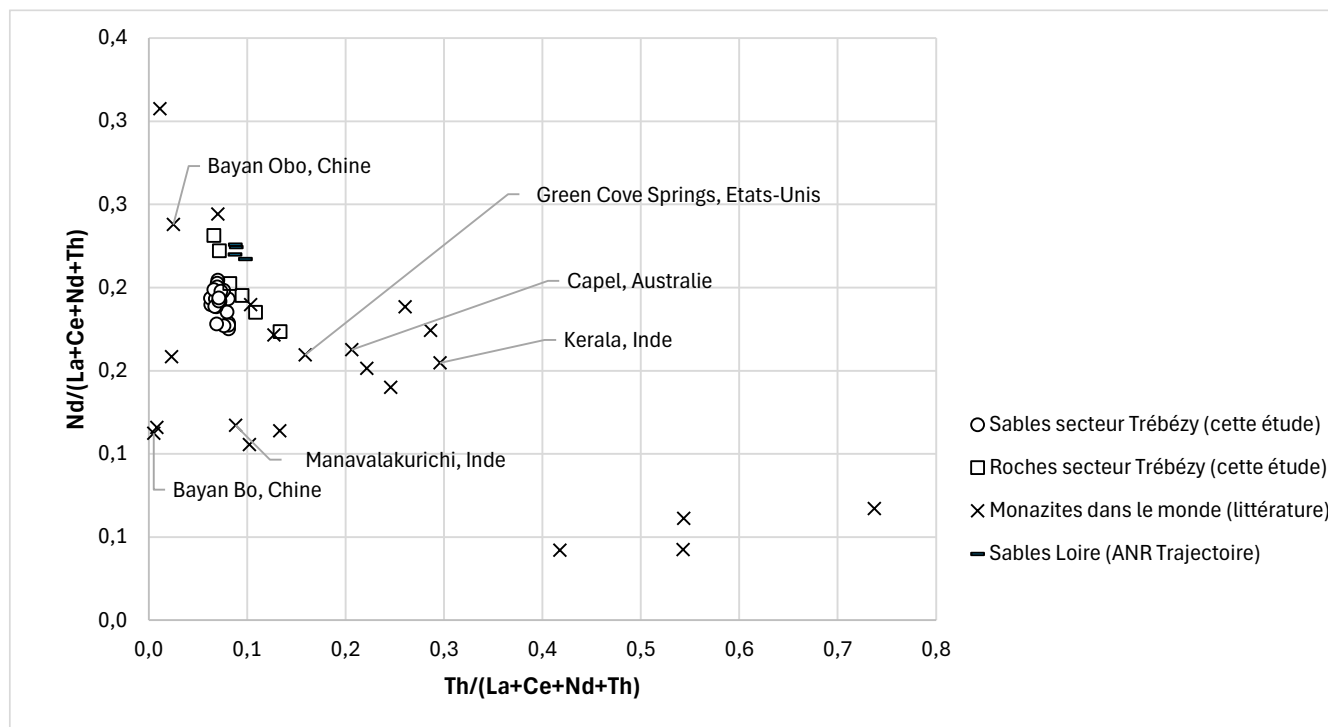


Figure 8. Proportion du Nd en fonction du Th dans une monazite de composition $Ce_aLa_bNd_cTh_d(PO_4)$. Le Nd est choisi ici à titre d'exemple parmi les quatre terres rares les plus abondantes présentes dans les sables de Trébézy afin d'établir cette distribution. Les données des sables et des roches du secteur de Trébézy sont issues de cette étude, celles des sables de la Loire proviennent d'une autre étude (TRAJECTOIRE, ANR-19-CE3-0009, 2020-2025) et celles des monazites présentes ailleurs dans le monde sont issues de la littérature [22][23][24][25][26][27][28][29][30][31][32][33][34][35].

4.2. Hypothèse d'une origine continentale et distale

Le secteur d'étude se situe dans la partie externe de l'estuaire de la Loire, où les influences du fleuve, des marées et des courants se combinent. L'accumulation des sables sur les plages et les criques de la Baie de Bonne Anse peuvent avoir une provenance marine et ligérienne (sables apportés par la Loire). Une méthode permettant de discuter la provenance des minéraux radioactifs en milieu côtier repose sur l'examen de l'anomalie en europium Eu, une autre terre rare [36].

La Figure 9 montre la distribution des teneurs des terres rares dans les sables et permet de constater une anomalie négative en europium Eu (illustré par une valeur plus basse comparée au samarium, Sm, et au gadolinium, Gd). L'anomalie négative en europium est cohérente avec des monazites métamorphiques ou granitiques qui ont cristallisé alors qu'il y avait des plagioclases dans la roche, plagioclases qui incorporent préférentiellement plus d'Eu [37][38].

Pour tester l'hypothèse d'une provenance ligérienne des minéraux radioactifs détectés à Trébézy, un examen comparatif sur l'anomalie en europium Eu a été réalisé entre les sables du site de Trébézy et les sables de la Loire (Figure 9). Quatre échantillons de sable issus d'une carotte prélevée à Montjean-sur-Loire en 2020 prélevés et analysés dans le cadre d'une autre étude ont été sélectionnés (Loire 1 à 4, Figure 9). L'analyse des terres rares indique que les sables de la Loire présentent une faible anomalie positive en Eu (traits rouges sur la Figure 9), alors que les échantillons de sable du secteur de Trébézy présentent une anomalie négative en Eu⁷. L'hypothèse d'un apport des sables radioactifs par érosion d'origine continentale et distale semble donc peu probable à ce

⁷Seul l'échantillon de sable SABL-11, ne contenant que très peu de thorium et d'uranium et considéré comme un sable ordinaire, ne possède pas d'anomalie en Eu.

stade de l'étude. Il serait pertinent d'examiner les sables de l'Orléanais et de Sologne, une formation d'origine détritique présente dans le bassin versant de la Loire et connue pour contenir une quantité d'uranium non négligeable (quelques mg.kg^{-1}) [39]. L'absence d'une anomalie négative en Eu dans ces sables fournirait un argument supplémentaire permettant d'écarter l'hypothèse d'une origine distale et ligérienne des sables radioactifs.

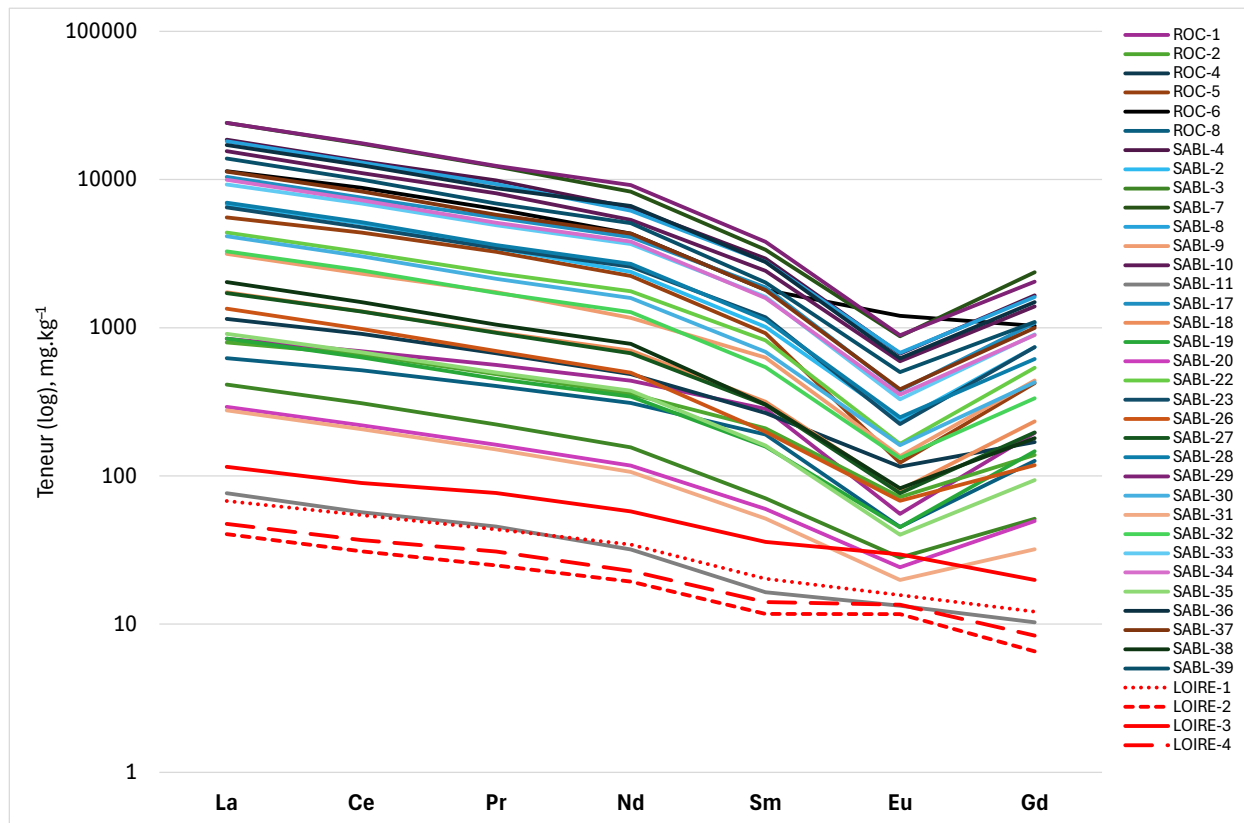


Figure 9. Teneurs en terres rares légères normalisées à celles des chondrites [40] dans les sables et roches du secteur de Trébézy et dans les sables de la Loire (données TRAJECTOIRE, ANR-19-CE3-0009, 2020-2025)

4.3. Hypothèse d'une origine anthropique

L'absence de radionucléides artificiels et l'absence de déséquilibre entre radionucléides d'une même chaîne indiquent que la composition radiologique des sables est d'origine naturelle. Bien que les sables radioactifs soient riches en thorium et uranium, leur composition radiologique est incompatible avec l'hypothèse d'une contamination par des résidus miniers issus d'un processus chimique de concentration de ces deux radioéléments (lixiviation typiquement). Dans l'hypothèse d'un lien avec des activités humaines, le matériau serait issu de l'extraction de roches (carrière ou excavation) suivi d'un éventuel traitement mécanique (ex. broyage en vue d'extraire les minéraux denses par exemple) mais pas suivi d'un traitement chimique (lixiviation).

L'observation d'une stratification verticale dans les dépôts de sables colorés sur la plage de Trébézy ainsi que l'existence d'une documentation scientifique faisant état de ces mêmes observations il y a quarante ans confortent l'hypothèse d'un processus naturel et récurrent. En outre, le dialogue établi avec les usagers locaux de ce territoire met en exergue le caractère variable de la présence et de la distribution spatiale de ces accumulations de sables colorés en certains endroits de la plage. Cette variabilité temporelle et spatiale, même si elle n'a pas été caractérisée de manière quantitative dans cette étude, conforte l'idée d'un processus naturel contrôlé par des facteurs environnementaux d'accumulation (fort marnage, tempêtes).

4.4. Conclusion sur l'origine de la singularité radiologique

La concentration d'éléments radioactifs qui a été découverte sur la plage de Trébézy, dans l'estuaire de Saint-Nazaire, est principalement due à une accumulation de monazites, un minéral riche en thorium et contenant de l'uranium en quantité moindre. Ces monazites ont été observées dans les roches qui constituent les falaises surplombant la plage de Trébézy et ses environs proches.

Les caractéristiques minéralogiques des sables et des roches, ainsi que la composition chimique en certaines terres rares (Ce, La, Nd, Pr, Eu), rendent plausible l'hypothèse selon laquelle les monazites présentes sur la plage de Trébézy proviennent de l'érosion de la falaise littorale.

L'examen de la composition élémentaire à l'échelle du minéral permettrait de s'affranchir des effets de matrice (mélange de minéraux) et de conforter cette hypothèse.

Les monazites observées dans les sables de Trébézy font partie d'un ensemble de minéraux denses, pas forcément tous radioactifs, qui se sont accumulés sur le haut de la plage par des processus hydrologiques de tri densimétrique, probablement liés à des événements extrêmes comme des grandes marées ou des tempêtes. Bien que les processus d'accumulation des minéraux radioactifs n'aient pas été spécifiquement abordés dans cette étude, leur accumulation en pied de falaise est typique de la formation des placers en contexte littoral : lors des fortes tempêtes l'eau a une énergie suffisante pour mobiliser les minéraux denses et les déposer ou les redistribuer sur la plage. Le mouvement des vagues peut également opérer un tri densimétrique des minéraux sur la plage, l'eau des vagues emportant les minéraux légers tels que le quartz et laissant les minéraux denses tels que les grenats, l'ilménite et les monazites qui vont s'accumuler.

5. CONCLUSION GENERALE

La cartographie du débit de dose obtenue en mai 2023 a mis en évidence deux zones remarquables d'un point de vue radiologique sur la plage de Trébézy et dans la crique voisine : la première s'étend sur une surface d'environ 100 mètres par 30 mètres et présente un débit d'équivalent de dose maximal (à 1 mètre au-dessus du sol) de $2,15 \mu\text{Sv.h}^{-1}$; la seconde s'étend sur une surface d'environ 20 mètres par 5 mètres et présente un débit d'équivalent de dose maximal de $0,91 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. Aucun radionucléide émetteur gamma d'origine artificielle n'a été détecté. La radioactivité de la plage de Trébézy est due à la présence d'uranium et de thorium, deux radioéléments naturellement présents sur Terre.

La dose associée à la fréquentation de la plage de Trébézy est inférieure à 1 mSv.an^{-1} et vraisemblablement, en considérant des hypothèses plus réalistes, de quelques dizaines de microsieverts par an. L'irradiation externe est la principale voie d'exposition.

Les investigations de terrain en mars 2024 ont mis en évidence une répartition des sables colorés et radioactifs à la surface de la plage variable au cours du temps et une superposition de sables plus ou moins colorés et radioactifs en profondeur. Cette chronicité des dépôts indique que les processus mis en œuvre dans l'accumulation des sables radioactifs sont d'origine naturelle. La coloration des sables est liée à la présence d'ilménite et de grenats, tandis que la radioactivité des sables est principalement due à la présence de monazites (phosphates de terres rares et de thorium, de couleur ocre). L'hypothèse d'une provenance locale due à l'érosion de la falaise littorale semble aujourd'hui la plus probable, les résultats montrant que les monazites présentes dans les sables et les roches du secteur de Trébézy ont des compositions élémentaires en terres rares et thorium similaires. L'examen de la composition élémentaire à l'échelle du minéral permettrait de s'affranchir des effets de matrice (mélange de minéraux) et de conforter cette hypothèse.

RÉFÉRENCES

- [1] CRIIRAD, « Analyses par spectrométrie gamma d'échantillons de sable prélevés à Saint-Nazaire (44) dans le secteur de la plage de Trébézy ». Note CRIIRAD n°22-18 V3, 2023
- [2] Chauris, L. « Nature et origine des placers littoraux de l'embouchure de la Loire ». Bulletin de la Société des Sciences Naturelles de l'Ouest de la France, Tome 9, n°1, 1987
- [3] Ghosal, S., et al. « Assessment of a Naturally Occurring High Background Radiation Area with Elevated Levels of Thorium along Coastal Odisha, India Using Radiometric Methods ». Chemosphere, vol. 283, novembre 2021, p. 131221. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131221>
- [4] Khan, R., et al. « Studies on Heavy Mineral Placers from Eastern Coast of Odisha, India by Instrumental Neutron Activation Analysis ». Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 319, n° 1, janvier 2019, p. 471 84. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6250-1>
- [5] Mohanty, S., et al. « Geochemical, Mineralogical and Textural Nature of Beach Placers, North-East Sri Lanka: Implications for Provenance and Potential Resource ». International Journal of Sediment Research, vol. 38, n°2, avril 2023, p. 279-293. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.09.004>
- [6] Augier, R., et al. « A Turning-Point in the Evolution of the Variscan Orogen: The ca. 325 Ma Regional Partial-Melting Event of the Coastal South Armorican Domain (South Brittany and Vendée, France) ». Bulletin de La Société Géologique de France, vol. 186, n°2-3, mars 2015, p. 63-91. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.186.2-3.63>
- [7] Cogné, J., et al « Notice explicative carte géologique de France (1/50 000), feuille Saint-Nazaire (479) », BRGM, Orléans. 1973
- [8] Dill, H G., et al. « Zr-Ti-Fe Placers along the Coast of NE Argentina: Provenance Analysis and Ore Guide for the Metallogenesis in the South Atlantic Ocean ». Ore Geology Reviews, vol. 95, avril 2018, p. 131-160. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.025>
- [9] « Projet NAVAL. Résultats des mesures radiologiques réalisées *in situ* et sur prélèvements ». Rapport IRSN n°2024-00089, 2024
- [10] Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, IRSN, ASN. « Guide méthodologique de gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives. Annexes. », Décembre 2011
- [11] Frelon S., et al. « Risk assessment after internal exposure to black sand from Camargue: Uptake and prospective dose calculation ». Radiation Protection Dosimetry, vol. 127, 1-4, pp. 64-67, 2007. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm252>
- [12] ICRP. "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection". ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3), 1994
- [13] Groupe radioécologie nord-Cotentin. Rapport détaillé du GT4. « Estimation des doses et du risque de leucémie associé », Juillet 1999
- [14] ICRP. « Dose coefficients for external exposures to environmental sources ». ICRP Publication 144. Ann. ICRP 49(2), 2020
- [15] Ministère de la transition énergétique. « Arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants »
- [16] « Sampling for particulate airborne contaminants. Review and analysis of techniques ». Rapport IRSN/DPEA/SERAC/LPMAC/02-18, Septembre 2002

- [17] « Exposition de la population française aux rayonnements ionisants ». Bilan 2014-2019. IRSN n°2021-00108, 2021
- [18] Robb, L. « Introduction to ore-forming process », 2nd Edition. Wiley-Blackwell Publishing. 496 pages. 2020. ISBN: 978-1-119-96750-7
- [19] Fattal, P., et al. « Etude du littoral de Saint-Nazaire. [Contrat] Mairie de Saint-Nazaire. Rapport, 2019. hal-02173145 , version 1
- [20] Ghosal, S., et al. « Assessment of a Naturally Occurring High Background Radiation Area with Elevated Levels of Thorium along Coastal Odisha, India Using Radiometric Methods ». Chemosphere, vol. 283, novembre 2021, p. 131221. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131221>
- [21] Natarajan, T., et al. « Rare Earth Elements Geochemistry and ²³⁴U/²³⁸U, ²³⁵U/²³⁸U Isotope Ratios of the Kanyakumari Beach Placer Deposits: Occurrence and Provenance ». Minerals, vol. 13, n° 7, juin 2023, p. 886. <https://doi.org/10.3390/min13070886>
- [22] Overstreet, W.C. « The geologic occurrence of monazite », Geological survey professional paper 530, United States government printing office, Washington, 327 p., 1967.
- [23] Lacomme, A., et al. « La monazite grise du massif de l'Arize (Pyrénées françaises ». Rapport BRGM RR-37041-FR, 50 p., 1993.
- [24] Udayakumar, S., et al. « Characterization of Malaysian monazite concentrate for the recovery of thorium dioxide », IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1082, IOP Publishing, 2018. doi:10.1088/1742-6596/1082/1/012090
- [25] Samin, et al. « The synthesis and certification of in-house monazite sand certified reference materials (CRM) », AIP Conference Proceedings, 020148, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5054552>
- [26] Montel, J.M. « A model for monazite/melt equilibrium and application to the generation of magmas. Chemical Geology, vol. 110, 127-146, 1993. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90250-M](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90250-M)
- [27] Feely, M., et al. « U-Th- and REE-bearing accessory minerals in a high heat production leucogranite within the Galway granite, western Ireland », Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B, 98(B1-82), B27-B32, 1989.
- [28] Ward, C.D., et al., « Rare earth element behaviour during evolution and alteration of the Dartmoor Granite, SW England », Journal of Petrology, vol. 33, part. 4, p. 785-815, 1992.
- [29] Wark, D.A. et Miller, C.F. « Accessory mineral behaviour during differentiation of a granite suite: monazite, xenotime and zircon in the Sweetwater Wash pluton, southeastern California, U.S.A. », Chemical Geology, vol. 110, p. 49-67, 1993. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90247-G](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90247-G)
- [30] Zhu, X.K., et O'Nions, R.K. « Monazite chemical composition: some implications for monazite geochronology », vol. 137, p. 351-363, 1999. <https://doi.org/10.1007/s004100050555>
- [31] Bowles, J.F.W., et al. « A re-examination of cheralite », Mineralogical magazine, vol. 43, 331, p. 885-888, 1980.
- [32] Demartin, F., et al. « Alpine monazite : further data ». Canadian Mineralogist, vol. 29, p. 61-67, 1991.
- [33] Mannucci, G., et al. « A comparative study of some pegmatitic and fissure monazite from the Alps ». Canadian Mineralogist, vol. 24, p. 469-474, 1986.
- [34] Gramaccioli, C.M. and Segalstad, T.M. (1978) A uranium- and thorium-rich monazite from a south-Alpine pegmatite at Piona, Italy. American Mineralogist, vol. 63, p. 757-761, 1978.
- [35] Anitha, J.K., et al. « Monazite chemistry and its distribution along the coast of Neendakara-Kayamkulam belt, Kerala, India », SN Applied Sciences, vol. 2, 812, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2594-6>

- [36] Veerasamy, M., et al. « Geochemical characterization of monazite sands based on rare earth elements, thorium and uranium from a natural high background radiation area in Tamil Nadu, India ». *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 232, p. 106565, juin 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106565>
- [37] Williams, M. L., et al. « Microprobe Monazite Geochronology: Understanding Geologic Processes by Integrating Composition and Chronology ». *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 35, n° 1, mai 2007, p. 137-175. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140228>
- [38] Möller, P., et G. K. Muecke. « Significance of Europium Anomalies in Silicate Melts and Crystal-Melt Equilibria: A Re-Evaluation ». *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 87, n°3, 1984, p. 242-250. <https://doi.org/10.1007/BF00373057>
- [39] Ielsch, G., et al. « Estimation and mapping of uranium content of geological units in France ». *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 166, p. 210-219, 2017. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.022>
- [40] Pourmand A., et al. « A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: Revising CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances », *Chemical Geology*, vol. 291, p. 38-54, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.08.011>
- [41] Moine J., et al., « Qualification des appareils de radioprotection de type radiamètre – Protocole et résultats préliminaires », 2023
- [42] Mange, M.A., et Heinz, F.W. Maurer. « Heavy Minerals in Colour ». Springer Netherlands, 1992. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2308-2>
- [43] Vance, E. R., et D. K. Agrawal. « Incorporation of Radionuclides in Crystalline Titanates ». *Nuclear and Chemical Waste Management*, vol. 3, n°4, janvier 1982, p. 229-234. [https://doi.org/10.1016/0191-815X\(82\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0191-815X(82)90004-3)
- [44] Donelick, R. A. « Apatite Fission-Track Analysis ». *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 58, n°1, janvier 2005, p. 49-94. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.3>
- [45] Ni, Yunxiang, et al. « Crystal Chemistry of the Monazite and Xenotime Structures ». *American Mineralogist*, vol. 80, no 1-2, février 1995, p. 21-26. <https://doi.org/10.2138/am-1995-1-203>
- [46] Kappen, P., et al. « XANES and micro-XRF Investigations of Ilmenite and Derived Products. » 2007. https://hasyweb.desy.de/science/annual_reports/2007_report/part1/contrib/41/20020.pdf

ANNEXES

Annexe 1. Actions liées à l'ouverture vers le public. Recueil des témoignages et questionnements.....	29
Annexe 2. Méthodes de caractérisation radiologique <i>in situ</i>	31
Annexe 3. Liste des échantillons prélevés et analysés	32
Annexe 4. Caractérisation des prélèvements	33
Annexe 5. Résultats des mesures obtenues par spectrométrie gamma.....	35
Annexe 6. Caractéristiques physiques et chimiques des sables et des roches.....	36
Annexe 7. Composition minéralogique des sables	38

Annexe 1. Actions liées à l'ouverture vers le public. Recueil des témoignages et questionnements.

Parce que la découverte d'une anomalie radiologique suscite légitimement des préoccupations, a fortiori en un lieu comme une plage, l'ASNR a souhaité développer cette étude en s'appuyant, en complément des dispositifs techniques de mesures déployés, sur les connaissances locales concernant notamment la présence de sables concentrant la radioactivité en d'autres lieux du littoral, sur leurs observations historiques ou récentes, sur les usages de la (ou des) plage(s) concernée(s). Le dialogue avec les acteurs locaux vise aussi à un meilleur partage des résultats.

L'ASNR a ainsi associé autant que possible les acteurs locaux intéressés par cette investigation radiologique, à commencer par la Ville de Saint Nazaire et l'association VPBN qui est à l'origine des premières mesures.

Le dialogue s'est appuyé sur la création d'une page internet et d'un formulaire d'inscription permettant de recenser les personnes intéressées, de les tenir informées et de leur permettre d'apporter questions ou témoignage. Ce dialogue a également été facilité par la présence d'un chargé de mission 'ouverture à la société' lors des missions sur les plages qui aura permis de faciliter les échanges avec les usagers.

Chaque mission a donné lieu à l'envoi aux personnes inscrites (15) d'un compte rendu imagé des actions de prélèvements et de mesure de la radioactivité.

Les témoignages recueillis de la part des citoyens, directement sur les plages durant les missions ou via le formulaire de manifestation d'intérêt accessible en flashant le QR code de la carte de visite, soulignent :

- l'antériorité historique de la présence des sables colorés,
- la variabilité dans le temps de l'étendue de ces sables colorés,
- la présence de ces sables sur la plage de Bonne Anse, située à proximité de celle de Trébézy.

A titre d'exemple : « Ces sables rouge/noir n'étaient pas toujours visibles dans mon enfance à Bonne anse, se découvrant après les tempêtes, mais on retrouvait des strates de différentes couleurs en creusant le sable ».

D'autres témoignages expriment une préoccupation sur l'origine de ces sables ou sur leur visibilité plus fréquente, à l'exemple de :

- « Avez-vous noté où se trouve la zone maritime dans l'estuaire dans laquelle les sédiments dragués sont rejetés ? Y a-t-il eu des mesures de radioactivités avant rejets de temps en temps ? (...) Y a-t-il une possibilité que les courants / marées ramènent de tels déchets vers la côte ? »
- « Les caractéristiques des sables radioactifs de la plage de Trébézy sont-elles comparables à celles des rejets de la mine d'uranium de Piriac ? »



Figure 10. Carte de visite élaborée par l'ASNR à destination des citoyens et citoyennes intéressés par l'avancement de l'étude.

Annexe 2. Méthodes de caractérisation radiologique *in situ*

Cartographie du débit d'équivalent de dose (DeD)

Un système mobile de mesure de débit d'équivalent de dose ambiant couplé à un système GPS développé pour la mesure à 1 mètre du sol, permettant de cartographier à pied les sites et sols radiologiquement pollués, a été mis en œuvre. Ce système embarque un détecteur constitué d'un cristal d'iodure de sodium (NaI(Tl)) (3 x 3 pouces) et mesure des rayonnements X et gamma dans une gamme d'énergie de 50 keV à 3 MeV, correspondant à une gamme de mesure du débit d'équivalent de dose gamma ambiant de 10 nSv.h⁻¹ à 50 µSv.h⁻¹. Pour chaque mesure, le dispositif rend un débit d'équivalent de dose gamma en µSv.h⁻¹ auquel il convient d'associer une incertitude de 30 % sur la mesure et une incertitude de 50 cm sur la position géographique. Les résultats sont corrigés en tenant compte du rayonnement cosmique [41] et de l'atténuation du rayonnement dû au porteur du dispositif.

Mesures par spectrométrie gamma *in situ*

Une chaîne de mesure de spectrométrie gamma a été mise en œuvre pour réaliser des mesures par spectrométrie gamma *in situ* : un spectromètre gamma ORTEC constitué d'un cristal de germanium hyper pur (Ge(HP)) dopé N d'efficacité relative 50 %. Cet appareil a été paramétré pour réaliser des mesures de rayonnements X et gamma dans une gamme d'énergie de 30 keV à 3 MeV adapté pour identifier les radionucléides émetteurs gamma des chaînes de l'uranium 238 et du thorium 232 et quantifier leurs abondances relatives. Les mesures ont été effectuées à 1 mètre du sol durant un temps d'acquisition de 45 minutes à deux endroits de la plage, l'un correspondant à une zone où le débit de dose est maximal (« point chaud ») et l'autre où le débit de dose est minimal (« point de référence »).

Annexe 3. Liste des échantillons prélevés et analysés

Tableau 11. Liste des échantillons avec les caractéristiques de prélèvement, les étapes de traitement et les analyses effectuées

Caractéristiques du prélèvement					Méthodes de préparation (solides)				Méthodes d'analyse (solides)									
Nom échantillon	Latitude	Longitude	Lieu de prélèvement	Nature du prélèvement	Liqueur dense	Broyage	Minéralisation par fusion alcaline	Minéralisation par digestion acide	Spectrométrie gamma	IRTF	MEB	Lame mince	Cathodoluminescence	Pycno-mètre	Granulo-mètre	DRX	ICP-OES	ICP-MS
EAU-1	47,2507	-2,2559	Crique de Trébézy	Eau de mer					Oui									
ROC-1	47,2558	-2,2428	Plage de Bellefontaine	Roche	Oui	Oui		Oui			Oui	Oui	Oui					Oui
ROC-2	47,2500	-2,2572	Plage de Trébézy	Roche	Oui	Oui		Oui			Oui	Oui	Oui					Oui
ROC-3	47,2500	-2,2572	Plage de Trébézy	Roche							Oui	Oui	Oui					
ROC-4	47,2497	-2,2581	Plage de Trébézy	Roche	Oui	Oui		Oui			Oui	Oui	Oui					Oui
ROC-5	47,2458	-2,2608	Chemin côtier à l'ouest de la plage de Virechat	Roche	Oui	Oui		Oui			Oui	Oui	Oui					Oui
ROC-6	47,2469	-2,2606	Plage de Virechat	Roche	Oui	Oui		Oui			Oui	Oui	Oui					Oui
ROC-7	47,2558	-2,2283	Ville-es-Martin	Roche							Oui	Oui	Oui					
ROC-8	47,2558	-2,2322	Ville-es-Martin	Roche	Oui	Oui		Oui			Oui	Oui	Oui					Oui
SABL-1	47,2507	-2,2561	Crique de Trébézy	Sable		Oui	Oui		Oui							Oui	Oui	
SABL-2	47,2506	-2,2561	Crique de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui				Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
SABL-3	47,2506	-2,2561	Crique de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
SABL-4	47,2506	-2,2562	Crique de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui			Oui	Oui
SABL-5	47,2506	-2,2560	Crique de Trébézy	Sable					Oui					Oui				
SABL-6	47,2500	-2,2573	Plage de Trébézy	Sable					Oui					Oui				
SABL-7	47,2501	-2,2574	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui			Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
SABL-8	47,2501	-2,2577	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui		Oui	Oui	Oui
SABL-9	47,2561	-2,2452	Plage de Bonne Anse	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui			Oui	Oui
SABL-10	47,2501	-2,2573	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui			Oui	Oui
SABL-11	47,2492	-2,2597	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui			Oui	Oui
SABL-12	47,2560	-2,2321	Ville-es-Martin	Sable			Oui										Oui	
SABL-13	47,2564	-2,2393	Bellefontaine plage	Sable		Oui	Oui									Oui	Oui	
SABL-14	47,2561	-2,2452	Bonne Anse plage	Sable		Oui	Oui									Oui	Oui	
SABL-15	47,2561	-2,2452	Bonne Anse plage	Sable		Oui	Oui			Oui			Oui				Oui	Oui
SABL-16	47,2500	-2,2577	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui									Oui	Oui	
SABL-17	47,2558	-2,2447	Plage de Bonne Anse	Sable		Oui	Oui	Oui		Oui							Oui	Oui
SABL-18	47,2558	-2,2447	Plage de Bonne Anse	Sable		Oui	Oui	Oui									Oui	Oui
SABL-19	47,2558	-2,2447	Plage de Bonne Anse	Sable		Oui	Oui	Oui									Oui	Oui
SABL-20	47,2558	-2,2447	Plage de Bonne Anse	Sable		Oui	Oui	Oui									Oui	Oui
SABL-21	47,2558	-2,2447	Plage de Bonne Anse	Sable										Oui				
SABL-22	47,2558	-2,2447	Plage de Bonne Anse	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui			Oui	Oui
SABL-23	47,2500	-2,2572	Plage de Bonne Anse	Sable		Oui	Oui	Oui						Oui			Oui	Oui
SABL-24	47,2558	-2,2433	Plage de Bellefontaine	Sable										Oui				
SABL-25	47,2425	-2,2622	Plage à l'est du phare d'Aiguillon	Sable										Oui				
SABL-26	47,2419	-2,2631	Plage à l'ouest du phare d'Aiguillon	Sable		Oui	Oui	Oui									Oui	Oui
SABL-27	47,2558	-2,2319	Plage de Ville-es-Martin	Sable		Oui	Oui	Oui						Oui			Oui	Oui
SABL-28	47,2506	-2,2561	Crique de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui						Oui			Oui	Oui
SABL-29	47,2506	-2,2561	Crique de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui		Oui							Oui	Oui
SABL-30	47,2500	-2,2569	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui									Oui	Oui
SABL-31	47,2500	-2,2569	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui			Oui	Oui
SABL-32	47,2500	-2,2569	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui									Oui	Oui
SABL-33	47,2500	-2,2569	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui					Oui	Oui			Oui	Oui
SABL-34	47,2500	-2,2572	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui			Oui			Oui			Oui	Oui
SABL-35	47,2500	-2,2572	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui						Oui			Oui	Oui
SABL-36	47,2500	-2,2572	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui		Oui	Oui			Oui	Oui
SABL-37	47,2500	-2,2572	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui		Oui							Oui	Oui
SABL-38	47,2500	-2,2572	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui									Oui	Oui
SABL-39	47,2497	-2,2583	Plage de Trébézy	Sable		Oui	Oui	Oui	Oui					Oui			Oui	Oui

Annexe 4. Caractérisation des prélèvements

Tableau 12. Liste des méthodes de préparation et d'analyses des échantillons solides

Objectif	Méthode utilisée		Préparation des échantillons	
	Laboratoire GEOPS de l'Université Paris-Saclay	Laboratoires de l'IRSN (devenu ASNR le 1er janvier 2025)	Roches	Sables
Analyses des activités des radionucléides		Spectrométrie gamma		Tamissage 2 mm, séchage au lyophilisateur, broyage, homogénéisation puis mise en boîte dans une enveloppe thermosoudée étanche
Identification des minéraux	Microscope Lumière polarisante Cathodoluminescence	Microscope électronique à balayage et spectroscope à dispersion d'énergie (MEB-EDS)	Lame mince	Dépôt sur plot puis métallisation ou enrésinage sur plot
Composition minéralogique semi-quantitative (minéraux principaux)		Diffraction des rayons X (DRX)		Broyage puis dépôt sur plaque
Composition minéralogique (minéraux principaux et accessoires)	Spectromètre infra-rouge à transformée de Fourier (IRTF)			Enrésinage sur plot
Composition chimique semi-quantitative		MEB-EDS	Lame mince	Dépôt sur plot et métallisation
Composition chimique (majeurs)		Spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES)		Broyage puis minéralisation par digestion acide et fusion alcaline
Composition chimique (traces)		Spectromètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS)	Broyage puis extraction à la liqueur dense puis minéralisation par digestion acide	Broyage puis minéralisation par digestion acide
Densité réelle		Pycnomètre à hélium (He)		Sable brut
Distribution granulométrique		Granulomètre laser		Sable brut

Analyse de la radioactivité de l'échantillon liquide

L'échantillon d'eau de mer a été analysé par spectrométrie gamma après une étape de préconcentration de la fraction brute d'un facteur 10 par évaporation.

Analyses de la radioactivité des échantillons solides

Des analyses quantitatives par spectrométrie gamma de l'ensemble des radionucléides mesurables dans les différents échantillons de sables et de roches ont été réalisées. Il s'agissait en particulier de rechercher les radioisotopes descendants des chaînes radioactives naturelles du ^{232}Th , ^{235}U et ^{238}U , les radionucléides naturels d'origine cosmique (^7Be , ^{22}Na) ou tellurique (^{40}K) et les radionucléides artificiels usuellement observés dans l'environnement (^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{137}Cs , etc.).

Les trois chaînes radioactives naturelles (uranium 235 et 238, thorium 232) possèdent un isotope du radon en leur sein, qui se présente à l'état gazeux et dont la perte par émanation peut être la cause de rupture d'équilibre entre ses précurseurs et ses descendants. Pour reconstituer les équilibres, l'échantillon est conditionné dans une enveloppe aluminisée thermosoudée étanche, de laquelle le radon ne s'échappe pas, et un délai de 30 jours (soit environ 7 fois la demi-vie du radon 222) est nécessaire avant la mesure.

La quantification des activités de certains radionucléides émetteurs gamma a nécessité une correction due à l'auto-atténuation (absorption des photons d'énergie inférieure à 100 keV par l'échantillon), soit par l'intermédiaire d'un double comptage avec des mesures en transmission, soit en tenant compte de la composition chimique des sables analysés. Des corrections supplémentaires ont été effectuées sur le rendement de détection pour prendre en compte les effets de sommation due aux coïncidences vraies.

Analyses des minéraux et détermination des phases porteuses de la radioactivité

Parmi les minéraux susceptibles de porter la radioactivité les plus courants, c'est-à-dire les phases minérales capables d'incorporer de l'uranium (235 et 238) et du thorium (232), il y a le zircon ZrSiO_4 [42][43], la sphène CaTiSiO_5 [43], l'apatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3[\text{F},\text{Cl},\text{OH}]$ [44], la monazite $(\text{Ce},\text{La},\text{Nd},\text{Sm},\text{Th})\text{PO}_4$ [42], le xénotime YPO_4 [45] ou encore l'ilménite FeTiO_3 [46]. Ces minéraux, qualifiés de lourds (densité supérieure à 2,89), ont fait l'objet d'une attention particulière lors des différents types de caractérisation réalisés (observations au microscope et par spectrométrie infra-rouge ; analyses des compositions élémentaires). Leur composition, leur densité et teneur courantes en U et Th sont détaillées dans le tableau ci-dessous (Tableau 13).

Tableau 13. Minéraux lourds radioactifs courants avec leur composition, leur densité, et des indications sur leur teneur en U et Th [12][16]

Minéral	Composition chimique	Densité	Teneur en U	Teneur en Th
Zircon	ZrSiO_4	4,6-4,7	mg.kg ⁻¹ à %	mg.kg ⁻¹
Sphène	CaTiSiO_5	3,45-3,55	mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹
Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3[\text{F},\text{Cl},\text{OH}]$	3,10-3,35	mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹
Monazite	$(\text{Ce},\text{La},\text{Nd},\text{Sm},\text{Th})\text{PO}_4$	5-5,3	mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹ à %
Xénotime	YPO_4	4,59	mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹
Ilménite	FeTiO_3	4,7	mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹

Une analyse des corrélations existantes entre les teneurs en terres rares déterminés dans les échantillons de sables (mélange de minéraux) et caractéristiques de certains minéraux (exemple : zirconium (Zr) pour le zircon, yttrium (Y) pour le xénotime, cérium (Ce) et lanthane (La) pour la monazite, calcium (Ca) et phosphore (P) pour l'apatites, etc.), et les teneurs en éléments radioactifs (le thorium (Th) et l'uranium (U)) a été effectuée afin d'identifier la nature des minéraux denses majoritairement porteurs de la radioactivité. Par la suite, les données chimiques obtenues pour les différents échantillons de sables ont été comparées avec celles des roches afin de déterminer si ces dernières peuvent constituer une source pour les minéraux denses radioactifs observés sur la plage (d'après [21][36]).

Annexe 5. Résultats des mesures obtenues par spectrométrie gamma

Tableau 14. Activités des radionucléides dans les sables, exprimées en Bq.kg^{-1} sec, et dans l'eau de mer, en Bq.L^{-1} . La mention « na » signifie « non analysé ».

Echantillon	Chaîne du thorium 232					Chaîne de l'uranium 238						Chaîne de l'uranium 235						
	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Ra-224	Tl-208	Th-234	U-234	Th-230	Ra-226	Pb-214	Bi-214	Pb-210	U-235	Th-227	Ra-223	K-40	Be-7	Cs-137
EAU-1	≤ 0,06	na	na	na	na	na	na	na	≤ 0,02	na	na	na	na	na	na	10,2 ± 0,8	≤ 0,1	≤ 0,01
SABL-1	4030 ± 460	3300 ± 250	3890 ± 300	4010 ± 400	1390 ± 100	880 ± 290	na	1070 ± 380	1170 ± 100	1179 ± 90	1112 ± 92	915 ± 75	1104 ± 94	1126 ± 173	907 ± 98	89 ± 9	na	na
SABL-2	804 ± 90	701 ± 52	789 ± 61	811 ± 78	280 ± 21	215 ± 41	na	236 ± 59	253 ± 28	238 ± 18	227 ± 15	212 ± 17	235 ± 36	227 ± 43	150 ± 28	318 ± 25	na	na
SABL-3	88 ± 10	87 ± 7	90 ± 8	89 ± 9	30 ± 2	34 ± 7	na	38 ± 15	40 ± 7	37 ± 3	35 ± 3	37 ± 8	36 ± 7	24 ± 12	≤ 60	393 ± 31	na	na
SABL-4	4380 ± 490	4230 ± 410	4170 ± 320	4190 ± 410	1450 ± 130	1030 ± 260	≤ 1100	1980 ± 500	1200 ± 100	1140 ± 90	1090 ± 90	970 ± 270	54 ± 6	52 ± 8	38 ± 8	168 ± 16	≤ 9	≤ 1,2
SABL-5	31 ± 4	32 ± 3	28 ± 4	28 ± 4	11 ± 1	19 ± 3	≤ 180	≤ 33	23 ± 5	20 ± 2	17 ± 2	21 ± 4	0,8 ± 0,3	1 ± 0,5	≤ 2,3	347 ± 28	≤ 1,2	≤ 0,18
SABL-6	35 ± 4	35 ± 3	30 ± 4	34 ± 4	12 ± 1	20 ± 4	≤ 210	≤ 26	15 ± 7	20 ± 2	19 ± 2	21 ± 4	1,2 ± 0,5	1,2 ± 0,6	≤ 3,1	415 ± 33	≤ 1,5	≤ 0,23
SABL-7	5400 ± 600	5200 ± 500	5240 ± 400	5100 ± 100	1780 ± 160	1060 ± 260	≤ 1600	1900 ± 500	1200 ± 130	1150 ± 90	1090 ± 80	950 ± 240	53 ± 8	51 ± 8	54 ± 10	92 ± 16	≤ 12	≤ 1,7
SABL-8	2940 ± 330	2810 ± 280	2880 ± 220	2780 ± 270	970 ± 90	470 ± 80	≤ 1000	1000 ± 200	690 ± 70	611 ± 47	586 ± 44	470 ± 90	26 ± 4	26 ± 5	≤ 13	93 ± 11	≤ 7	≤ 1
SABL-9	740 ± 80	720 ± 70	710 ± 60	710 ± 70	244 ± 22	232 ± 49	≤ 500	280 ± 70	300 ± 29	293 ± 22	273 ± 20	230 ± 50	13 ± 2	15 ± 3	17 ± 3	93 ± 9	≤ 2,9	≤ 0,44
SABL-10	6900 ± 800	6500 ± 600	6800 ± 500	6500 ± 600	2270 ± 210	1390 ± 410	≤ 2900	2500 ± 800	1620 ± 150	1580 ± 120	1510 ± 130	1310 ± 400	72 ± 9	71 ± 12	66 ± 20	112 ± 25	≤ 22	≤ 3,1
SABL-11	19 ± 2	20 ± 2	18 ± 3	21 ± 3	6,4 ± 0,7	11 ± 2	≤ 170	≤ 21	11 ± 8	13 ± 1	11 ± 1	15 ± 2	0,6 ± 0,5	≤ 0,9	≤ 2,5	626 ± 48	≤ 1,3	≤ 0,18
SABL-22	930 ± 230	na	na	na	na	420 ± 100	na	na	na	na	na	na	na	na	na	≤ 30	na	na
SABL-31	36 ± 10	na	na	na	na	28 ± 17	na	na	na	na	na	na	na	na	na	370 ± 70	na	na
SABL-36	4000 ± 1000	na	na	na	na	650 ± 130	na	na	na	na	na	na	na	na	na	130 ± 40	na	na
SABL-39	2500 ± 600	na	na	na	na	400 ± 60	na	na	na	na	na	na	na	na	na	123 ± 26	na	na

Echantillon	Ba-140	Ag-108m	Ag-110m	Am-241	Ce-141	Ce-144	Co-57	Co-58	Co-60	Cs-134	I-129	I-131	Mn-54	Na-22	Rh-106	Ru-103	Ru-106	Sb-124	Sb-125	Se-75	Te-123m	Zn-65	Zr-95
EAU-1	≤ 0,2	na	≤ 0,01	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,01	≤ 0,02	≤ 0,1	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,2	≤ 0,01	≤ 0,02	na	≤ 0,02	≤ 0,1	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,02	na	na	≤ 0,03
SABL-1	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
SABL-2	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
SABL-3	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
SABL-4	na	≤ 1,8	≤ 1,6	≤ 1,8	na	na	≤ 0,5	≤ 1	≤ 1,1	≤ 1,1	na	na	≤ 1,4	≤ 1,4	≤ 12	na	na	≤ 1	≤ 3	na	≤ 0,5	≤ 1,7	na
SABL-5	na	≤ 0,25	≤ 0,23	≤ 0,26	na	na	≤ 0,08	≤ 0,16	≤ 0,2	≤ 0,17	na	na	≤ 0,18	≤ 0,29	≤ 1,7	na	na	≤ 0,15	≤ 0,45	na	≤ 0,1	≤ 0,38	na
SABL-6	na	≤ 0,38	≤ 0,31	≤ 0,28	na	na	≤ 0,1	≤ 0,21	≤ 0,29	≤ 0,23	na	na	≤ 0,27	≤ 0,41	≤ 2,1	na	na	≤ 0,22	≤ 0,6	na	≤ 0,12	≤ 0,5	na
SABL-7	na	≤ 2,6	≤ 2,2	≤ 2,9	na	na	≤ 0,8	≤ 1,4	≤ 1,6	≤ 1,7	na	na	≤ 4,4	≤ 2	≤ 17	na	na	≤ 1,5	≤ 4,3	na	≤ 0,9	≤ 2,5	na
SABL-8	na	≤ 1,6	≤ 1,5	≤ 1,5	na	na	≤ 0,46	≤ 0,9	≤ 1	≤ 1	na	na	≤ 2,4	≤ 1,3	≤ 10	na	na	≤ 0,9	≤ 2,6	na	≤ 0,6	≤ 1,5	na
SABL-9	na	≤ 0,6	≤ 0,6	≤ 0,9	na	na	≤ 0,24	≤ 0,37	≤ 0,43	≤ 0,42	na	na	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 4,4	na	na	≤ 0,4	≤ 1,2	na	≤ 0,22	≤ 0,6	na
SABL-10	na	≤ 4,7	≤ 4,4	≤ 6	na	na	≤ 1,3	≤ 2,6	≤ 3	≤ 3,1	na	na	≤ 6	≤ 3,6	≤ 31	na	na	≤ 2,7	≤ 8	na	≤ 1,7	≤ 4,6	na
SABL-11	na	≤ 0,29	≤ 0,25	≤ 0,22	na	na	≤ 0,08	≤ 0,2	≤ 0,24	≤ 0,2	na	na	≤ 0,21	≤ 0,39	≤ 1,9	na	na	≤ 0,18	≤ 0,5	na	≤ 0,1	≤ 0,49	na
SABL-22	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
SABL-31	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
SABL-36	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
SABL-39	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na

Annexe 6. Caractéristiques physiques et chimiques des sables et des roches

Tableau 15. Caractéristiques physiques et chimiques des sables et des roches

Echantillon	DENSITE ±	46,48Ti ±	89Y ±	90Zr ±	139La ±	140Ce ±	141Pr ±	146Nd ±	147Sm ±	153Eu ±										
	g.cm ⁻³	mg.kg ⁻¹																		
ROC-1	>2,89	13815	121	125	1	410	3	208	2	439	4	54	1	213	3	44,1	0,6	3,3	0,1	
ROC-2	>2,89	19301	147	65	0	508	10	196	2	418	5	47	0	174	2	32,6	0,3	4,3	0,0	
ROC-4	>2,89	14042	107	74	1	1329	12	283	4	575	3	64	1	236	3	41,4	0,7	6,9	0,1	
ROC-5	>2,89	27785	331	120	2	1148	25	1371	25	2775	36	312	4	1086	19	142,9	3,0	7,4	0,1	
ROC-6	>2,89	17247	204	538	5	42876	201	2812	26	5570	47	606	3	2098	17	280,0	1,3	72,0	1,0	
ROC-8	>2,89	14548	133	69	1	290	2	154	2	326	3	39	0	151	1	29,6	0,3	2,7	0,0	
SABL-2	na	19665	436	159	6			1680	72	3202	158	332	13	1158	36	157	5	14,1	0,3	
SABL-3	2,770	0,008	3978	81	48	2		102	4	196	7	21,3	0,2	76	1	11,0	0,1	1,68	0,03	
SABL-4	3,453	0,001	45522	680	383	8	836	24	4586	65	8408	97	946	19	3135	60	456	3	40,0	0,7
SABL-7	3,719	0,001	39059	887	473	10		5948	231	11028	244	1175	39	4018	70	522	6	52	2	
SABL-8	3,650	0,002	37928	705	569	21	411	8	4474	68	8210	101	894	17	2987	66	434	8	40,6	0,8
SABL-9	3,652	0,003	16692	127	598	8	111	3	779	10	1464	24	166,7	0,8	565	17	97,9	0,6	8,15	0,03
SABL-10	3,707	0,002	34466	583	484	7	396	8	3839	48	6984	80	775	10	2589	25	377	9	35,6	0,9
SABL-11	2,637	0,002	1141	14	5,85	0,04	26,1	0,4	18,9	0,4	35,9	0,5	4,4	0,1	15,5	0,1	2,55	0,02	0,80	0,02
SABL-17	3,522	0,004	27705	289	528	11	365	10	2575	33	4771	45	531	7	1988	31	291	6	22,6	0,7
SABL-18	na	13957	110	562	3	119,8	0,4	428	3	816	9	89,6	0,5	340	1	49,2	0,9	4,82	0,01	
SABL-19	na	7511	73	568	6	71	2	209	4	398	6	43,3	0,7	167	1	24,5	0,3	2,71	0,04	
SABL-20	na	4253	24	150,6	0,9	65,3	0,9	72,1	0,8	139	2	15,6	0,1	57	1	9,3	0,1	1,45	0,03	
SABL-22	4,052	0,001	21426	149	766	5	128	6	1082	8	2046	11	224	2	855	15	128	2	9,9	0,1
SABL-23	3,948	0,001	25067	465	738	5	163	7	1598	16	3008	30	331	2	1251	13	183	2	13,4	0,1
SABL-26	na	8616	80	106	2	123	2	332	3	620	4	66,8	0,8	241	4	30,9	0,6	4,07	0,05	
SABL-27	3,081	0,002	15233	134	277	2	157	6	423	3	814	9	88,5	0,9	326	6	47,0	0,5	4,58	0,03
SABL-28	3,364	0,002	33252	578	325	5	364	20	1721	19	3264	37	347	4	1307	7	176	2	14,90	0,09
SABL-29	na	80518	559	580	9	1064	20	5959	19	11137	112	1187	16	4450	48	592	9	53	1	
SABL-30	na	24493	172	464	4	268	3	1021	12	1915	12	205	3	770	13	107	1	9,6	0,1	
SABL-31	2,690	0,001	2500	17	25	0	39	1	68	1	130	2	14,5	0,4	52	1	8,0	0,1	1,19	0,01
SABL-32	na	18566	255	375	2	243	2	809	10	1540	28	165	1	619	10	84	3	7,91	0,08	
SABL-33	3,236	0,002	44765	287	318	4	840	37	2282	16	4352	45	472	6	1784	22	252	3	19,7	0,3
SABL-34	3,727	0,002	37637	355	459	7	456	6	2460	25	4581	36	490	8	1852	21	247	2	21,2	0,4
SABL-35	2,679	0,001	5009	58	39,0	0,5	112	3	224	3	432	5	47,8	0,8	183	2	24,9	0,4	2,40	0,03
SABL-36	3,464	0,002	47938	549	475	5	677	45	4225	44	7881	86	838	12	3223	47	432	4	37,2	0,4
SABL-37	na	34233	497	499	8	317	5	2796	30	5248	49	555	6	2095	41	280	7	23,0	0,6	
SABL-38	na	9963	92	155	1	157	3	501	7	942	11	101	1	377	3	47,3	0,5	4,94	0,08	
SABL-39	3,648	0,003	42632	608	461	4	302	3	3423	34	6308	124	661	11	2465	33	314	2	30,1	0,4
LOIRE-1	na	na	na	na	na	na	na	17	2	34	3	4,2	0,4	17	2	3,2	0,3	0,94	0,09	
LOIRE-2	na	na	na	na	na	na	na	10	1	20	2	2,4	0,2	9,4	0,9	1,8	0,2	0,70	0,07	
LOIRE-3	na	na	na	na	na	na	na	28	3	57	6	7,4	0,7	28	3	5,6	0,6	1,8	0,2	
LOIRE-4	na	na	na	na	na	na	na	12	1	23	2	3,0	0,3	11	1	2,2	0,2	0,81	0,08	

Tableau 16. Caractéristiques physiques et chimiques des sables et des roches (suite)

Echantillon	157Gd ±	159Tb ±	163Dy ±	165Ho ±	166Er ±	169Tm ±	172Yb ±	175Lu ±	232Th ±	238U ±										
mg.kg ⁻¹																				
ROC-1	40,8	0,7	5,8	0,1	29,2	0,2	4,96	0,04	10,4	0,1	1,17	0,01	6,29	0,06	0,83	0,01	61	1	15,5	0,2
ROC-2	28,9	0,4	3,6	0,0	15,9	0,2	2,56	0,03	5,8	0,2	0,71	0,01	4,35	0,08	0,64	0,01	71	1	13,1	0,2
ROC-4	35,4	0,4	4,0	0,1	17,6	0,2	2,82	0,03	6,6	0,1	0,86	0,02	5,57	0,11	0,82	0,01	115	2	13,8	0,1
ROC-5	88,3	1,5	7,1	0,1	24,1	0,5	4,15	0,07	11,8	0,2	1,91	0,03	14,86	0,18	2,17	0,03	637	10	30,4	0,4
ROC-6	215,5	2,8	23,4	0,2	110,7	0,6	21,74	0,35	60,0	0,4	9,35	0,12	66,39	0,78	10,83	0,13	1612	19	163,7	3,2
ROC-8	26,5	0,2	3,4	0,0	16,4	0,1	2,83	0,04	6,4	0,1	0,83	0,01	5,19	0,12	0,73	0,01	49	1	9,2	0,1
SABL-2	155	6	12,1	0,3	40,1	1,5	6,4	0,2	19,8	0,4	1,87	0,04	12,0	0,2	1,7	0,1	499	11	42,9	1,4
SABL-3	10,8	0,4	1,4	0,0	8,0	0,2	1,8	0,0	5,6	0,1	0,79	0,01	5,3	0,1	0,77	0,01	25	1	2,0	0,0
SABL-4	346	2	28,1	0,7	102	1	15,4	0,2	42	1	4,32	0,04	26	1	3,66	0,04	1420	24	95	1
SABL-7	495	18	37	1	115	2	18,7	0,3	64	1	6,39	0,25	43	2	6,3	0,2	1554	42	107	4
SABL-8	337	9	28	1	126	3	22,6	0,4	69	1	8,4	0,2	55	2	7,9	0,1	1381	33	71,2	0,6
SABL-9	92	1	13,6	0,5	97	2	23,0	0,4	75	1	10,9	0,1	76,6	0,8	11,1	0,1	242	4	27,9	0,8
SABL-10	291	8	24,7	0,4	109	2	19,5	0,4	58	1	6,9	0,1	45	1	6,5	0,1	1183	23	63	1
SABL-11	2,15	0,05	0,251	0,004	1,2	0,1	0,20	0,03	0,54	0,01	0,07	0,01	0,44	0,02	0,064	0,003	5,3	0,1	0,8	0,1
SABL-17	225	4	23,7	0,5	102	1	18,1	0,8	51,7	0,6	6,6	0,1	42,3	0,4	6,0	0,2	751	10	71	1
SABL-18	48,8	0,4	9,1	0,1	73	1	18,2	0,3	63	1	9,4	0,1	64	1	9,6	0,4	119	2	12,7	0,3
SABL-19	30,7	0,3	7,76	0,06	70	2	18,5	0,2	66,7	0,9	9,6	0,2	64,3	0,6	9,4	0,1	58	1	6,2	0,3
SABL-20	10,4	0,2	2,25	0,02	18,7	0,6	4,9	0,1	16,3	0,2	2,5	0,1	16,5	0,3	2,44	0,03	19,0	0,2	2,3	0,1
SABL-22	112	1	16,6	0,2	108	5	25,3	0,3	86,5	0,9	12,2	0,2	84	1	12,34	0,09	327	6	31,7	0,7
SABL-23	155	1	19,5	0,2	108	2	24,2	0,2	82	2	11,3	0,2	72,6	0,9	10,7	0,2	464	7	43	1
SABL-26	24,8	0,2	2,94	0,05	16,7	0,4	3,5	0,1	10,0	0,1	1,45	0,04	9,7	0,1	1,37	0,02	88	1	5,5	0,1
SABL-27	41,1	0,8	6,0	0,1	40,6	0,6	9,3	0,2	28,7	0,5	4,60	0,08	31	1	4,52	0,07	120	1	12,0	0,2
SABL-28	128,7	0,3	11,9	0,3	56	1	10,8	0,3	30,3	0,6	4,18	0,05	26,1	0,5	3,82	0,03	486	12	30,6	0,7
SABL-29	428	5	36,8	0,8	124	3	19,5	0,3	57,9	0,8	6,0	0,1	35,5	0,7	5,01	0,06	1648	10	110	2
SABL-30	89,6	0,9	11,3	0,1	68,9	0,9	15,0	0,2	48,9	0,8	6,7	0,2	43,2	0,9	6,32	0,05	276	3	20,0	0,3
SABL-31	6,7	0,1	0,81	0,02	4,2	0,2	0,8	0,1	2,33	0,04	0,34	0,04	2,1	0,1	0,29	0,01	16,7	0,2	1,83	0,04
SABL-32	70	1	9,34	0,04	57	1	12,0	0,3	35,0	0,6	5,28	0,14	34,4	0,6	4,9	0,1	223	3	18,7	0,4
SABL-33	189	3	18,2	0,3	68,2	0,5	10,9	0,2	27,4	0,1	3,3	0,2	19,7	0,3	2,72	0,07	638	4	57,5	0,9
SABL-34	187	2	18,9	0,4	80	1	15,0	0,1	47	1	6	1	36,3	0,2	5,18	0,04	666	14	44,7	0,2
SABL-35	19,6	0,1	1,96	0,05	8,3	0,3	1,30	0,06	3,44	0,04	0,42	0,04	2,5	0,1	0,34	0,01	63	1	6,2	0,3
SABL-36	311	3	28,0	0,2	96	1	15,6	0,8	47	1	4,8	0,2	29,5	0,4	4,16	0,08	1347	20	76	1
SABL-37	209	4	20,9	0,3	87	2	16,3	0,3	52,1	0,7	6,4	0,3	41	1	5,8	0,1	790	16	49	2
SABL-38	37,6	0,7	4,49	0,06	25	1	5,1	0,2	14,4	0,1	2,20	0,09	13,7	0,1	1,97	0,04	132	2	10,7	0,1
SABL-39	229	4	20,9	0,2	81,9	0,6	15,4	0,2	50,1	0,6	6,1	0,2	39,9	0,9	5,56	0,09	876	9	47	1
LOIRE-1	2,5	0,3	0,33	0,03	2,0	0,2	0,4	0,04	1,1	0,1	0,16	0,02	1,1	0,1	0,14	0,01	6,6	0,7	2,3	0,2
LOIRE-2	1,4	0,1	0,19	0,02	1,2	0,1	0,2	0,02	0,59	0,06	0,09	0,01	0,6	0,06	0,08	0,01	3,7	0,4	1,2	0,1
LOIRE-3	4,2	0,4	0,63	0,06	3,7	0,4	0,7	0,07	2,1	0,2	0,30	0,03	1,9	0,2	0,26	0,03	11	1	4,1	0,4
LOIRE-4	1,8	0,2	0,24	0,02	1,5	0,2	0,3	0,03	0,77	0,08	0,12	0,01	0,8	0,08	0,11	0,01	5,0	0,5	1,5	0,1

Annexe 7. Composition minéralogique des sables

Tableau 17. Composition minéralogique des sables établie par spectrométrie infra-rouge

% Minéral	SABL-17	SABL-7	SABL-15	SABL-2	SABL-29	SABL-36	SABL-37
albite	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1
amphibole	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
anatase	<1	<1	<1	3	<1	1	<1
andalousite	<1	<1	<1	<1	<1	1	2
apatite	1	<1	1	1	3	<1	1
augite	4	5	2	4	4	5	7
barytine	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
biotite	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
calcite	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
cassitérite	3	<1	<1	4	<1	1	2
chromite	<1	<1	<1	<1	1	2	<1
corundum	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
diopside	<1	<1	<1	1	<1	2	<1
épidote	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
feldspath potassique	<1	<1	<1	5	<1	<1	<1
grenat	38	37	72	8	34	26	47
ilménite	23	22	9	3	30	16	12
kyanite	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
monazite	4	9	1	<1	5	5	5
olivine	2	2	<1	<1	<1	2	<1
plagioclase	<1	<1	<1	4	<1	<1	<1
quartz	3	2	<1	48	1	2	12
rutile	5	4	3	<1	8	4	2
sillimanite	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
staurolite	2	3	3	4	6	8	4
thorite	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
titanite	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
topase	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
tourmaline	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
xénotime	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
zircon	2	2	<1	<1	1	2	<1
non identifié	6	10	5	12	5	19	4

Siège social :
15 rue Louis Lejeune
92120 Montrouge

Adresse postale :
BP 17 - 92262
Fontenay-aux-Roses cedex

Divisions territoriales :
asnr.fr/nous-contacter

info@asnr.fr
Tél. : 01 58 35 88 88

asnr.fr

