



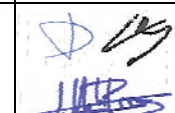
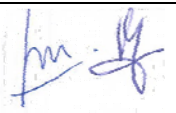

Etude d'impact radiologique dû au dragage des sédiments du port des Minimes à La Rochelle

Exposition des travailleurs et de la population
à la radioactivité naturelle renforcée

Rapport DEI/SECRE n°2010-004

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION

Service d'Etude du Comportement des Radionucléides
dans les Ecosystèmes

| | | | | | |
|---|---|---|---|------------------------|-------------------------------------|
| Demandeur | Mairie de La Rochelle | | | | |
| Référence de la demande | Lettre Mairie de La Rochelle PhM/MLN du 8 juillet 2009 | | | | |
| Numéro de la fiche programme | | | | | |
| Processus de rattachement | R5 | | | | |
| <p align="center">Etude d'impact radiologique dû au dragage des sédiments du port des Minimes à La Rochelle - Exposition des travailleurs et de la population à la radioactivité naturelle renforcée</p> <p align="center">D. BOUST⁽¹⁾, M. CHARTIER⁽²⁾, N. PIRES⁽³⁾</p> <p align="center">(1) Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville</p> <p align="center">(2) Service d'Études et d'expertise en radioprotection</p> <p align="center">(3) Unité d'Expertise en radioprotection des Travailleurs et de la Population</p> <p align="center">Rapport DEI/SECRE n°2010-004</p> | | | | | |
| | Réservé à l'unité | | Visas pour diffusion | | |
| | Auteurs | Vérificateurs | Chef du SECRE | Directeur de la DEI | Directeur Général de l'IRSN * |
| Noms | D. BOUST M. CHARTIER N. PIRES | D. CHAINOT M. MASSON | J. GARNIER- LAPLACE | D. CHAMPION | J. REPUSSARD |
| Dates | 03/03/2010 | 03/03/2010 | 05/02/2010 | | |
| Signatures |  |  |  | | |

DIFFUSION : Libre ☐ Interne ☐ Limitée ☒

*si nécessaire

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

| Version | Date | Auteurs | Pages ou paragraphes modifiés | Description ou commentaires |
|---------|------------|-----------------------|-------------------------------|--|
| 1 | 02/02/2010 | D. BOUST, N. PIRES | - | Emission initiale |
| 2 | 05/02/2010 | N. PIRES, M. CHARTIER | Au fil du texte | Prise en compte des remarques de DEI/SECRE |
| | | | | |
| | | | | |

LISTE DE DIFFUSION

| Nom | Organisme |
|----------------------------|--|
| CHAMPION Didier | IRSN/DEI |
| GARIEL Jean-Christophe | IRSN/DEI |
| BOULAUD Denis | IRSN/DEI |
| GAY Didier | IRSN/DEI/SARG |
| GARNIER-LAPLACE Jacqueline | IRSN/DEI/SECRE |
| PERES Jean-Marc | IRSN/DEI/SESURE |
| ROBE Marie-Christine | IRSN/DEI/STEME |
| BEAUGELIN Karine | IRSN/DEI/SECRE/LME |
| GILBIN Rodolphe | IRSN/DEI/SECRE/LRE |
| MASSON Michel | IRSN/DEI/SECRE/LRC |
| GOURMELON Patrick | IRSN/DRPH |
| RANNOU Alain | IRSN/DRPH |
| VIAL Eric | IRSN/DRPH/SER |
| CHARTIER Michel | IRSN/DRPH/SER |
| PIRES Nathalie | IRSN/DRPH/SER/UETP |
| MORISSET Philippe | Directeur Général des Services Techniques de la Ville de La Rochelle |

RESUME

La Ville de La Rochelle met en place un projet d'extension du Port de Plaisance des Minimes, qui implique le dragage d'environ 1 000 000 m³ de sédiments destinés à être immergés dans la Fosse d'Antioche. La Ville de La Rochelle a sollicité l'appui technique de l'IRSN pour évaluer l'impact radiologique sur les travailleurs et la population, lié à ces travaux de dragage.

Une campagne de carottages des sédiments a été réalisée du 20 juillet au 7 août 2009. Au total, 111 échantillons de sédiments à draguer répartis sur 31 stations, puis deux échantillons sur deux stations de référence situées dans le Fier d'Ars, non soumises à des impacts industriels, et cinq échantillons de sédiments superficiels prélevés sur des plages de sable ont été collectés et analysés. Les résultats de ces mesures ont été transmis à l'IRSN qui les a analysés. Il ressort de cette analyse des données que :

- le choix des stations de référence est pertinent ;
- les activités mesurées dans les sables de plage donnent accès aux activités des radionucléides qui pourraient être contenus dans la fraction sableuse (peu abondante) des sédiments à draguer et qui seraient de l'ordre de 5 Bq.kg⁻¹ sec pour les chaînes du ²³²Th et de l'²³⁸U ;
- les activités mesurées dans les sédiments à draguer ne sont pas significativement différentes de celles mesurées dans les sédiments des stations de référence ;
- il existe de façon sporadique des stocks sédimentaires marqués par des rejets industriels.

L'impact radiologique pour les travailleurs chargés des opérations de dragage des sédiments et celui pour la population ont été estimés sur la base des mesures d'activités des sédiments. La dose efficace maximale calculée pour les travailleurs chargés des opérations de dragage des sédiments est de 0,012 mSv. La dose efficace maximale calculée pour la population est de 0,035 mSv.an⁻¹ pour le groupe de population des pêcheurs professionnels adultes gros consommateurs de produits de la mer. Bien que calculées sur la base d'hypothèses enveloppes, les doses sont faibles et très inférieures à la limite de 1 mSv.an⁻¹.

MOTS-CLES

Dragages, sédiments, espèces marines consommées, radionucléides, évaluation dosimétrique, La Rochelle, Port des minimes.

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| CONTEXTE | 6 |
| 1 DESCRIPTION DES TRAVAUX DE DRAGAGE | 7 |
| 1.1 TECHNIQUE DE LA PELLE SUR PONTON (OU "DEEPER DREDGER") | 8 |
| 1.2 TECHNIQUE DU CHALAND | 9 |
| 1.3 TECHNIQUE DE DRAGAGE HYDRAULIQUE | 10 |
| 2 RAPPEL DES ELEMENTS DE L'EVALUATION DU CAHIER DES CHARGES POUR LA CARACTERISATION DES SEDIMENTS A DRAGUER..... | 11 |
| 3 CARACTERISTIQUES DES SOURCES D'EXPOSITION | 12 |
| 3.1 CONCENTRATIONS DES RADIONUCLEIDES DANS LES SEDIMENTS | 12 |
| 3.1.1 Matériels et méthodes..... | 12 |
| 3.1.2 Nature des sédiments et caractéristiques géochimiques | 15 |
| 3.1.3 Activités retenues pour les calculs | 29 |
| 3.1.4 Comparaison des activités retenues avec les activités mesurées aux stations de référence et sur les plages. | 31 |
| 3.2 CONCENTRATIONS DES RADIONUCLEIDES DANS L'EAU ET LES PRODUITS DE LA MER | 32 |
| 4 IMPACT RADIOLOGIQUE SUR LES TRAVAILLEURS | 35 |
| 4.1 POSTES DE TRAVAIL RETENUS | 35 |
| 4.2 VOIES D'EXPOSITION | 35 |
| 4.2.1 Exposition externe | 35 |
| 4.2.2 Exposition interne par ingestion par inadvertance | 37 |
| 4.2.3 Exposition externe par contact cutané | 38 |
| 4.3 RESULTATS | 38 |
| 5 IMPACT RADIOLOGIQUE SUR LA POPULATION..... | 39 |
| 5.1 SCENARIOS D'EXPOSITION..... | 39 |
| 5.2 VOIES D'EXPOSITION | 39 |
| 5.2.1 Exposition externe | 39 |
| 5.2.2 Exposition interne..... | 40 |
| 5.3 RESULTATS | 42 |
| 6 CONCLUSIONS..... | 43 |
| 7 REFERENCES | 44 |

CONTEXTE

La Ville de La Rochelle projette une extension du Port de Plaisance des Minimes. Ce projet implique le dragage d'environ 1 000 000 m³ de sédiments destinés à être immergés dans la Fosse d'Antioche. Au titre des articles L.214-1 à L.214-5 du Code de l'Environnement (ex "Loi sur l'eau"), la commune de La Rochelle a constitué un dossier de demande d'autorisation en vue de cette extension [1].

Le dossier a été examiné à deux reprises par le Conseil Départemental de l'Environnement et des Risques Sanitaires et Technologiques (CODERST) qui a donné un avis favorable, assorti d'une réserve sur le volet radiologique. Les sédiments à draguer ont, en effet, été potentiellement marqués par les rejets de l'usine Rhodia située à 3 km (production de terres rares à partir de monazite thorifère).

La Ville de La Rochelle a établi un cahier des charges dans la perspective de réaliser une campagne de carottage des sédiments à partir du 20 juillet 2009. Le 18 juin, l'IRSN-DEI a été sollicité par le Préfet de Charente Maritime pour aider la Ville de La Rochelle à définir ce cahier des charges de façon à garantir que les prélèvements et les analyses prévus permettent à l'IRSN de conduire l'étude d'impact radiologique attendue par l'ASN et le CODERST [2]. Le rapport [3], rendu le 16 juillet 2009, avait pour objectif d'évaluer le protocole d'échantillonnage et d'analyses radiologiques des sédiments des zones d'extension du Port des Minimes, proposé par la société CREOCEAN.

La campagne de carottages a été réalisée du 20 juillet au 7 août 2009 et a impliqué les sociétés GEOTEC, pour les carottages, CREOCEAN, pour le suivi des carottages, la préparation des échantillons et leur expédition, et SUBATECH, pour les analyses de radionucléides. Au total, 111 échantillons répartis sur 31 stations ont été collectés et analysés [4].

La Ville de La Rochelle a également sollicité l'appui technique de l'IRSN pour évaluer l'impact radiologique sur les travailleurs et la population de ces travaux de dragage des sédiments. L'objet de ce rapport est de présenter les estimations des conséquences radiologiques des travaux envisagés portant sur les travailleurs qui vont réaliser les opérations de dragage, sur la population consommant les produits de la mer éventuellement marqués par les opérations de clapage, sur les promeneurs et sur les usagers du Port de Plaisance.

Ce rapport résulte des travaux concertés du Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville (LRC) de la Direction de l'Environnement et de l'Intervention (DEI/IRSN) et du Service d'Etudes et d'Expertise en radioprotection (SER) de la Direction de la Radioprotection de l'Homme (DRPH/IRSN). Après un rappel des opérations de dragage envisagées et de la stratégie d'échantillonnage et d'analyse mise en œuvre, les caractéristiques des sources d'exposition retenues pour l'évaluation dosimétrique sont présentées. Dans le cas des sédiments, elles sont déduites des mesures de radionucléides et d'hypothèses réalistes sur l'équilibre des chaînes naturelles du thorium et de l'uranium. Dans le cas de l'eau de mer et des espèces marines consommées, les activités sont estimées à partir des activités retenues pour les sédiments. Ces données sont ensuite utilisées pour évaluer l'impact radiologique des opérations de dragage sur les travailleurs des entreprises qui effectueront des opérations du dragage et sur la population (consommateurs, promeneurs et usagers) selon différentes voies d'exposition.

1.1 TECHNIQUE DE LA PELLE SUR PONTON (OU "DEEPER DREDGER")

La figure 2 présente une illustration de cette technique qui sera vraisemblablement la technique retenue pour la première phase des opérations.

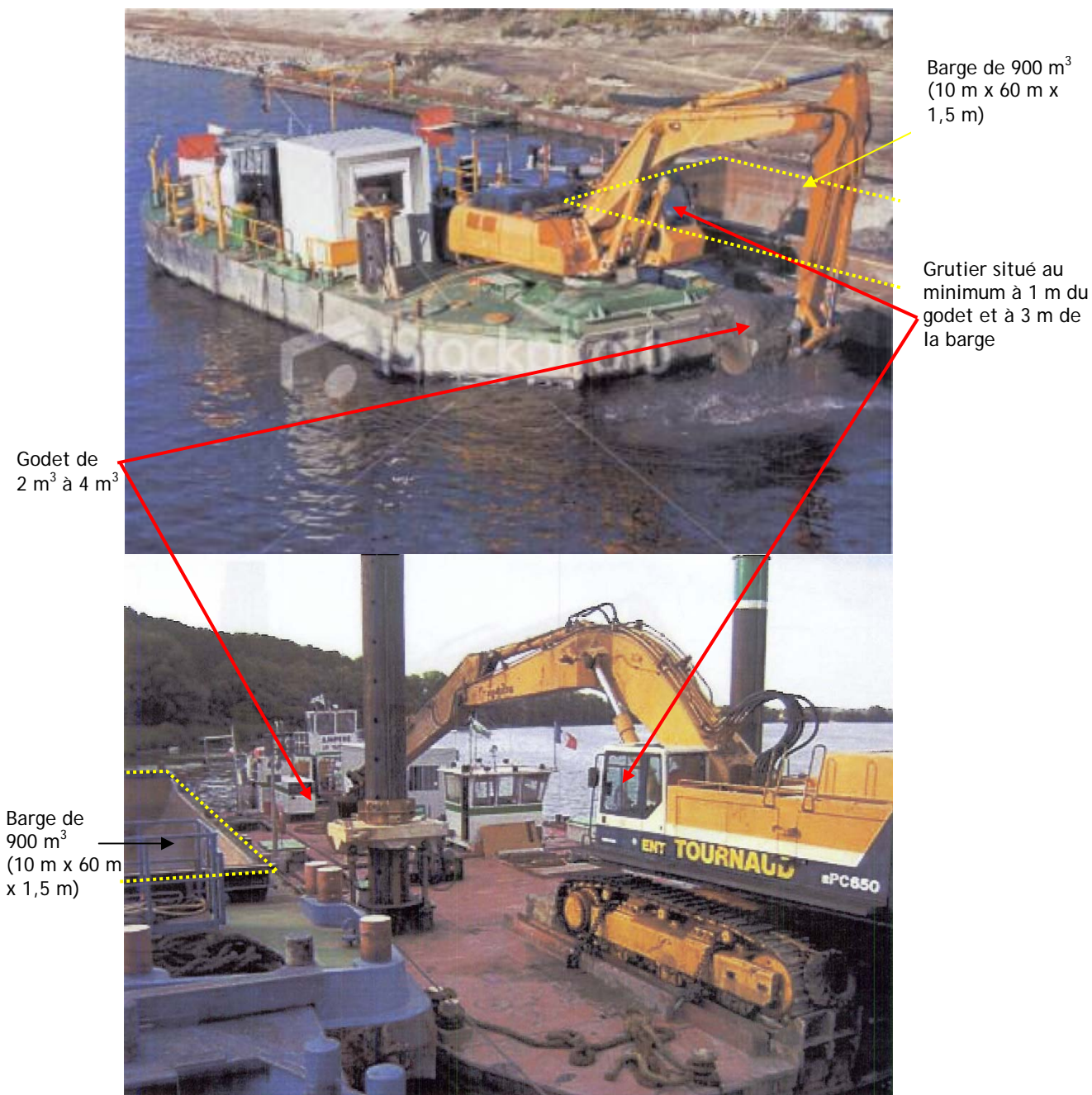


Figure 2. Illustrations d'un « deeper dredger » et conditions d'exposition associées

Une pelleteuse située sur un ponton permet de réaliser les opérations de dragage. Les sédiments contenus dans le godet sont saturés en eau et leur masse volumique est comprise entre 1,2 t.m⁻³ et 1,5 t.m⁻³. Ces sédiments sont transférés dans la barge située sur le côté du ponton. Le phénomène de surverse d'eau est considéré comme faible et la présence de sédiments sur le ponton est considérée comme négligeable.

Certains opérateurs peuvent être en contact direct avec les sédiments : prélèvement d'une poignée de sédiments (~50 g) au rythme en moyenne d'une fois par semaine sans lavage systématique des mains après contact cutané.

La durée estimée pour le remplissage de la barge est de 1h30 à 3 h.

Une fois la barge remplie, les sédiments sont transportés à ciel ouvert dans la zone de clapage ; seuls les opérateurs et le conducteur de la barge sont exposés lors du transport et du clapage des sédiments.

Les postes de travail concernés sont le conducteur situé à 3 m ou 4 m des sédiments et les opérateurs situés à 1 m des sédiments. La durée du trajet (port - zone de clapage) est estimée à 3 h [1] et la durée du clapage est estimée à 5 minutes. Le conducteur de la barge et les opérateurs présents sur la barge n'effectuent qu'un voyage par jour.

Le chantier est réalisé par deux équipes travaillant en 2 x 8 h.

1.2 TECHNIQUE DU CHALAND

La figure 3 présente une illustration de cette technique qui sera éventuellement employée.



Figure 3. Illustration d'un chaland et conditions d'exposition associées

Une grue située sur une barge permet de réaliser les opérations de dragage. Les sédiments dragués sont déposés dans la même barge et la présence de sédiments sur le ponton est considérée comme négligeable.

Une fois la barge remplie, les sédiments sont transportés à ciel ouvert dans la zone de clapage ; seuls les opérateurs situés entre 1 m et 5 m des sédiments et le conducteur de la barge situé entre 2 et 5 m des sédiments sont exposés lors du transport et du clapage des sédiments. Chaque équipage réalise un remplissage et un clapage par jour.

1.3 TECHNIQUE DE DRAGAGE HYDRAULIQUE

La figure 4 présente une illustration de cette technique qui sera vraisemblablement la technique retenue pour la seconde phase des opérations.



Figure 4. Illustrations du bateau utilisé pour le dragage hydraulique

La technique de dragage hydraulique se décompose en deux étapes :

- un désagrégateur (hélice) permet de mettre en suspension les sédiments ;
- une pompe aspire les sédiments avec de l'eau et les refoule via une élinde (tuyau) dans un puits à ciel ouvert (50 m × 10 m × 2,2 m, soit 1 100 m³) situé dans le bateau.

Les conditions d'opération normales prévoient un mélange composé de 20% de solides et de 80% d'eau. Un phénomène de surverse permet de limiter la teneur en eau dans le puits à une valeur d'environ 50%.

La durée de remplissage du puits est d'environ une heure. Une fois le puits rempli, les sédiments sont transportés à ciel ouvert dans la zone de clapage (durée estimée à 3 h [1]).

Les opérateurs se situent à une distance minimale de 1 m lors du remplissage et du transit et le conducteur du bateau se situe à une distance de 2 m du puits et est surélevé de 2 m par rapport à ce dernier.

Pour cette technique, deux dragages et deux clapages par marée et par équipe sont envisageables.

2 RAPPEL DES ELEMENTS DE L'EVALUATION DU CAHIER DES CHARGES POUR LA CARACTERISATION DES SEDIMENTS A DRAGUER

Nous rappelons ci-après, en les résumant, les principaux éléments de l'évaluation du protocole d'échantillonnage proposé par CREOCEAN [3] ; ils ont guidé et orienté les opérations de prélèvement, de conditionnement et les analyses qui s'en sont suivies :

- assurer une couverture complète de la zone à draguer par des carottages uniformément répartis ;
- assurer une caractérisation exhaustive des sédiments (notamment en réalisant des carottages d'une longueur en bonne adéquation avec les épaisseurs de sédiment à draguer) et des radionucléides naturels et artificiels qu'ils contiennent ;
- réaliser des prélèvements et des analyses de radionucléides sur des stations de référence non soumises à des impacts industriels ;
- réaliser les analyses sur des échantillons moyens obtenus par homogénéisation des sédiments contenus dans des tronçons de 0,5 à 1 m ; cette approche doit conduire à une caractérisation moyenne mais exhaustive de l'ensemble du matériel prélevé ;
- obtenir des informations sur la répartition des radionucléides dans différentes fractions granulométriques ; en effet, un comportement différent est attendu entre les particules grossières charriées sur le fond, éventuellement jusque sur les plages de sable, et les particules fines dispersées dans la colonne d'eau, seules prises en compte dans la modélisation de la dispersion des sédiments à partir de la Fosse d'Antioche ;
- disposer des informations nécessaires pour évaluer les activités des radionucléides des chaînes naturelles, notamment la chaîne du ^{232}Th , qui n'auront pas été mesurées par spectrométrie gamma et permettre de juger de leur mise à l'équilibre séculaire.

3 CARACTERISTIQUES DES SOURCES D'EXPOSITION

3.1 CONCENTRATIONS DES RADIONUCLÉIDES DANS LES SEDIMENTS

3.1.1 MATERIELS ET METHODES

La campagne de carottages a été réalisée sur la zone d'intérêt du 20 juillet au 7 août. La description détaillée en est donnée dans le rapport fourni par CREOCEAN en septembre 2009 [4]. Nous en donnons ici les principaux éléments pour une meilleure compréhension du présent document. Les carottages ont été réalisés par GEOTEC (Tab. 1) et complétés par des prélèvements superficiels à la benne. Le plan d'échantillonnage réalisé est présenté sur la figure 5. Le positionnement a été effectué par récepteur GPS pour chaque station prédéfinie. Les carottages ont été réalisés par segments de 1 mètre dans le cas du carottier à piston (1,5 m en début de mission au carottier poinçonneur) depuis le niveau du sol naturel jusqu'à la cote objectif de dragage. Au total, 31 stations ont fait l'objet de prélèvements pour une longueur totale de quelque 102 m, conduisant à un échantillonnage très représentatif des sédiments à draguer.

Deux carottages courts (1 m) ont été réalisés dans le Fier d'Ars (Fig. 6), considéré comme une station de référence susceptible de permettre de déterminer les concentrations en radionucléides naturels hors de toute influence industrielle (fond géochimique régional).

Les tronçons ont été ouverts, assemblés puis photographiés. Des échantillons moyens intégrant des épaisseurs comprises entre 0,2 et 1 m (Tab. 1) ont ensuite été confectionnés par CREOCEAN en vue des analyses de radionucléides. Au total, 111 échantillons ont été transmis à SUBATECH pour analyse.

De plus, des sédiments superficiels ont été prélevés en novembre 2009 sur 5 plages de sable (Fig. 6) pour avoir une information, avant les opérations, sur les concentrations des radionucléides dans des sédiments sableux, donc non impactés par la sédimentation fine, qu'elle soit ou non marquée par une activité industrielle.

Sur quelques échantillons de sédiments (stations 9, 14 et 22, Min1 (campagne de mars 2009) et du Fier d'Ars), quatre fractions granulométriques (< 63, 63-200, 200-1000 et 1000-2000 µm) ont été isolées par lavage, passage aux ultrasons et tamisage sous l'eau dans la perspective d'y déterminer les concentrations de Al, K et Th.

Les activités des radionucléides naturels et artificiels ont été déterminées par spectrométrie gamma par SUBATECH, après élimination des débris de taille supérieure à 2 mm et séchage à 30°C. Trois éléments ont été mesurés par ICPMS par SUBATECH : (1) l'aluminium (Al), élément marqueur de la fraction aluminosilicatée du sédiment (phyllosilicates (argiles) et tectosilicates (feldspaths)) ; (2) le potassium (K), élément marqueur de la fraction aluminosilicatée du sédiment, et pour comparaison avec les mesures obtenues sur le sédiment total par spectrométrie gamma ; (3) le thorium (Th), tête de la série naturelle du ²³²Th non dosé par spectrométrie gamma pour déterminer si cette chaîne est à l'équilibre, ce qui permet d'estimer les activités des autres radionucléides non accessibles par spectrométrie gamma.

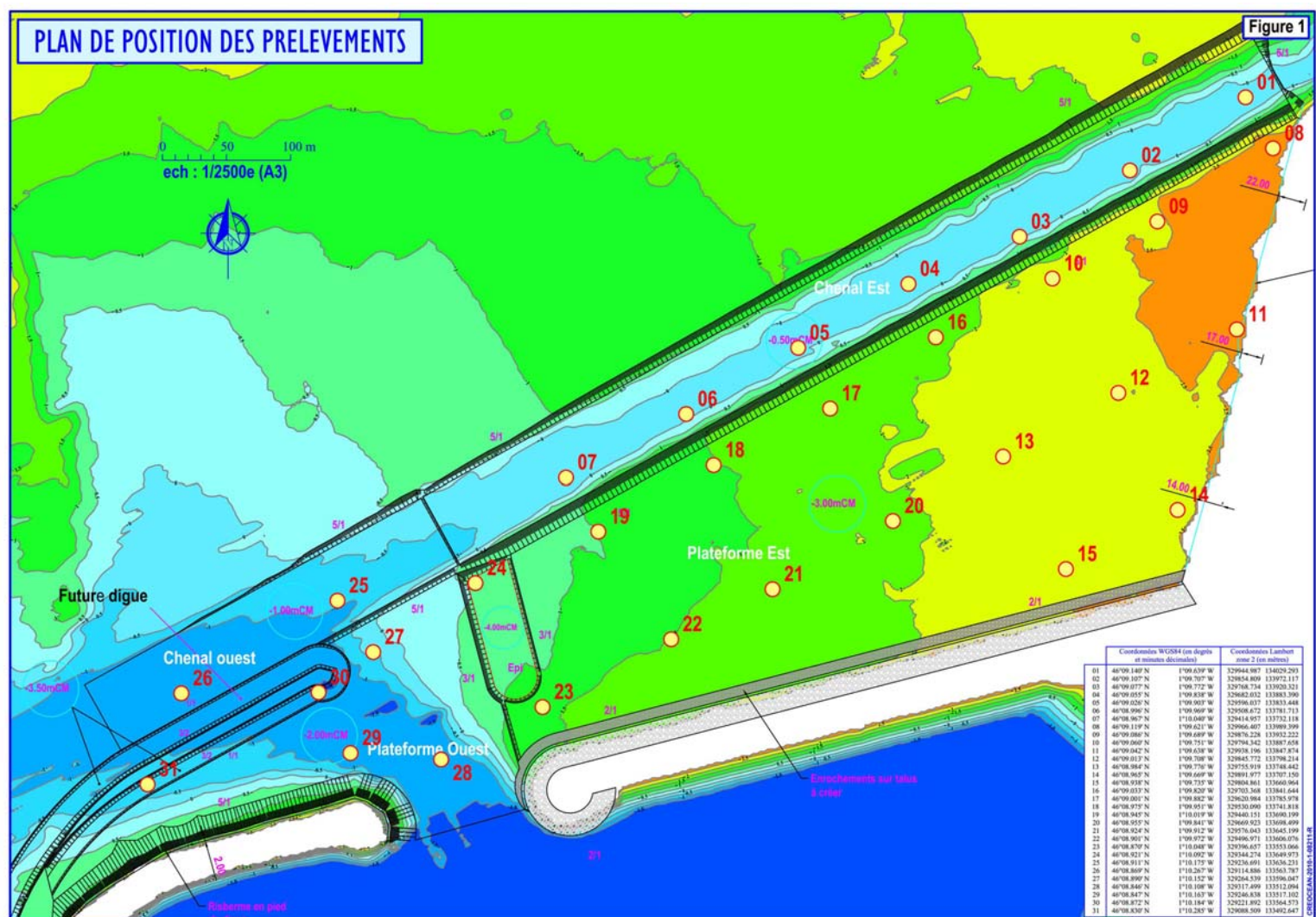


Figure 5. Plan de position des prélèvements dans le Port des Minimes au cours de la campagne de juillet-août 2009 (Document CREOCEAN).

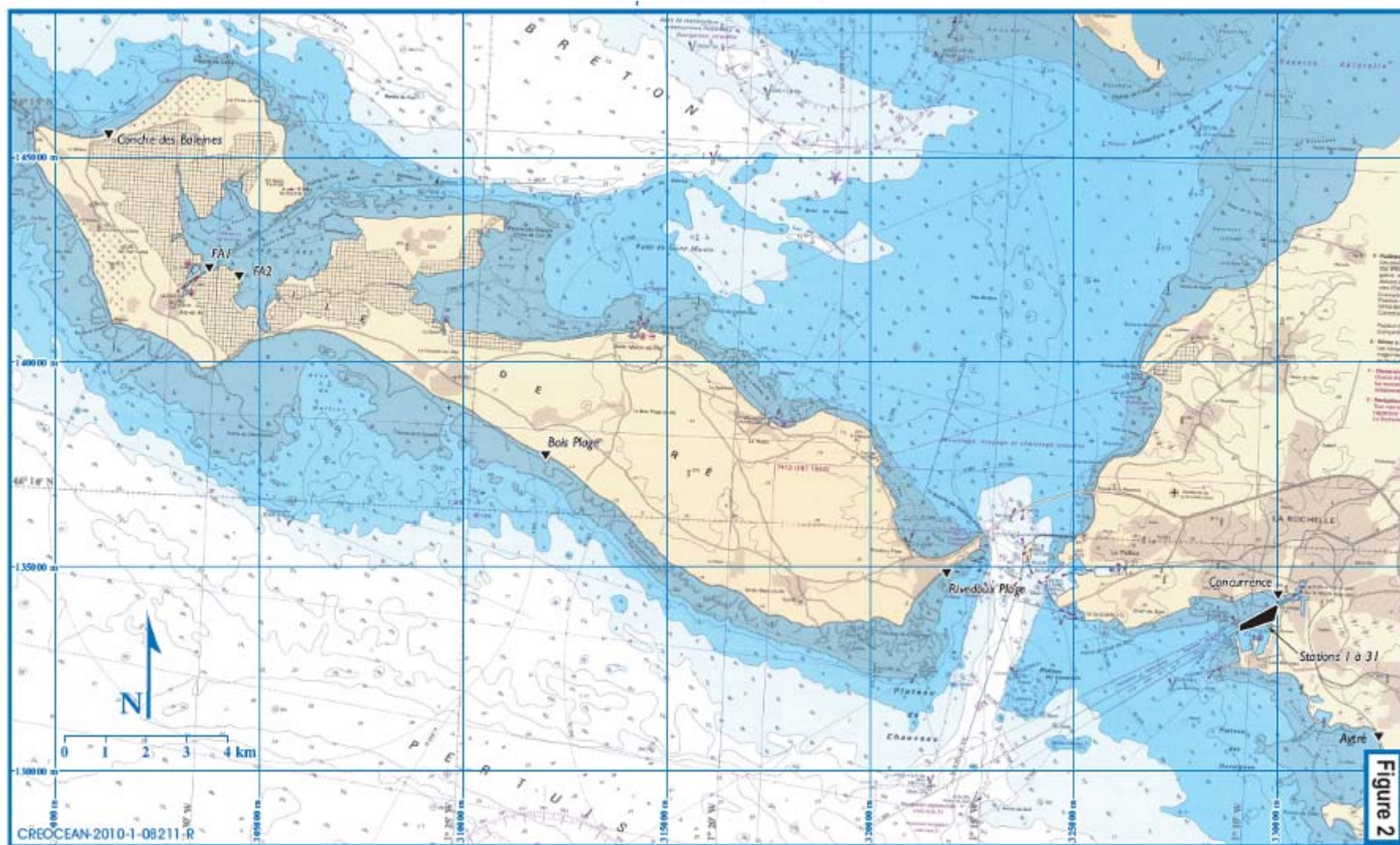


Figure 6. Plan de position des prélèvements réalisés dans la station de référence (Fier d'Ars - FA1 et FA2) et sur cinq plages de sable (Document CREOCEAN).

3.1.2 NATURE DES SEDIMENTS ET CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES

3.1.2.1 Nature des sédiments

Les faciès sédimentaires rencontrés sont caractéristiques d'une vasière intertidale peu soumise aux houles et aux courants de marée ; ils sont dominés par des sédiments fins vaseux (vase fluide à très compacte, grise à noire, parfois marron à verdâtre) avec des passées de vases sableuses ou à débris coquilliers [4], plus rarement de sables vaseux. La coloration et l'odeur des sédiments témoignent de conditions diagénétiques généralement suboxiques ou anoxiques.

3.1.2.2 Radionucléides naturels et artificiels dans les sédiments

Rappel sur l'origine des radionucléides artificiels et naturels

Dans le secteur de La Rochelle, hors d'influence d'installations liées au cycle du combustible nucléaire (et hormis les radionucléides de courte période utilisés en milieu hospitalier), le ^{137}Cs est, a priori, le seul radionucléide d'origine artificielle qui puisse être facilement détecté dans les sédiments par spectrométrie gamma. Il provient des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et éventuellement de l'accident de Tchernobyl.

Le ^{40}K est un radionucléide naturel de longue période ($1,26 \cdot 10^9$ ans) qui a le même comportement et les mêmes phases porteuses (aluminosilicates : argiles et feldspaths) que son isotope stable (^{39}K). Les radionucléides des séries naturelles de ^{238}U , de ^{235}U et du ^{232}Th ont des périodes radioactives allant de quelques millisecondes à plusieurs milliards d'années (Fig.7). Dans un système clos garantissant que les radionucléides produits restent au lieu de leur production, les radionucléides de chacune de ces chaînes sont dits à l'équilibre séculaire : les activités sont égales ; connaître l'une d'elles permet de déduire les autres. Des processus naturels ou liés au traitement de matériaux contenant ces radionucléides peuvent conduire à la rupture de cet équilibre.

Ainsi, certains radionucléides de la chaîne de ^{238}U présentent des activités différentes de celles des autres radionucléides de la chaîne. Le ^{234}Th , naturellement présent dans les sédiments où il est en équilibre avec ^{238}U , est de surcroît produit en permanence par désintégration de ^{238}U de l'eau de mer ; très insoluble, il s'associe avec les particules en suspension. Après dépôt, l'activité du ^{234}Th décroît avec sa propre période (24 j). Sa présence en excès dans les sédiments signe donc un dépôt très récent. De même, un excès de ^{210}Pb , pouvant atteindre une centaine de $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ sec}$, est généralement observé dans les sédiments marins suite à son introduction dans la colonne d'eau par des retombées atmosphériques d'origine tellurique dues à l'émanation de ^{222}Rn par les surfaces continentales. Tout procédé industriel mettant en œuvre une dissolution de phases minérales porteuses d'uranium ou de thorium peut induire une rupture dans leurs chaînes naturelles.

L'uranium et le thorium sont majoritairement portés par la fraction fine des sédiments marins (argiles). Ils peuvent aussi être trouvés dans des minéraux ubiquistes mais en très faible proportion, hors de toute influence industrielle, tels des monazites (Th) ou des zircons (U, Th).

Dans les matériaux naturels, le rapport $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ est de 21,5. Les radionucléides de la série de ^{235}U sont moins abondants et plus difficiles à mesurer que ceux de la série de ^{238}U . Par défaut, ce rapport pourra être utilisé pour déduire l'activité de ^{235}U de l'activité de ^{238}U .

Les concentrations moyennes dans la croûte terrestre et les sédiments terrigènes sont de l'ordre de 12 et 3 mg.kg^{-1} , respectivement pour ^{232}Th et ^{238}U , soit 49 et 37 Bq.kg^{-1} sec.

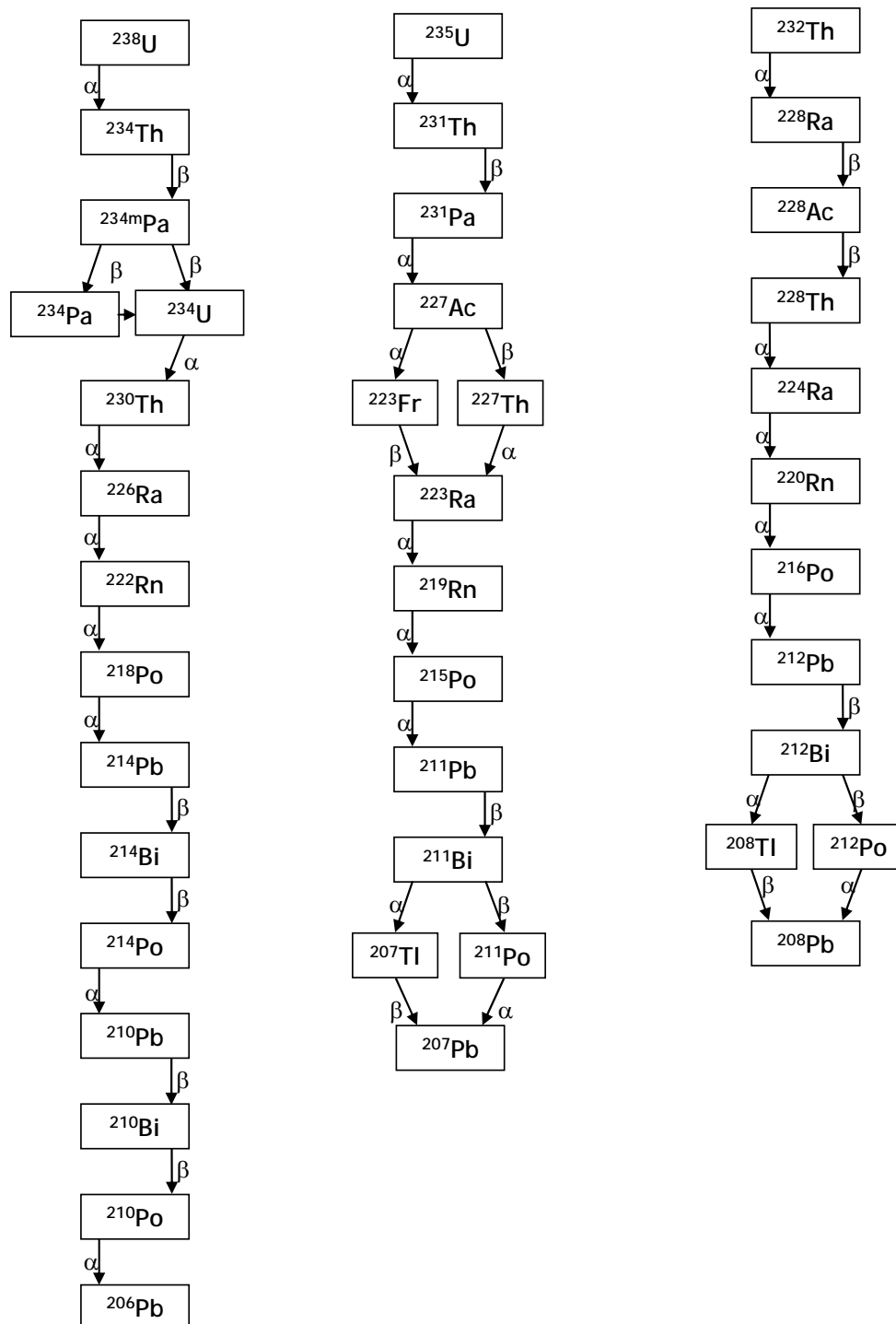


Figure 7. Les chaînes naturelles de ^{238}U , de ^{235}U et du ^{232}Th ; U : uranium ; Th : thorium ; Pa : protactinium ; Ra : radium ; Rn : radon ; Po : polonium ; Pb : plomb ; Bi : bismuth ; Ac : actinium ; Fr : francium ; Tl : thallium.

Activités des radionucléides mesurées dans les sédiments étudiés

Les résultats des analyses de radionucléides par spectrométrie gamma sont donnés en intégralité dans les tableaux 1 à 3.

Neuf radionucléides ont été mesurés dans presque tous les échantillons : ^{40}K , ^{137}Cs ; ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{208}Tl (série ^{238}U) ; ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{210}Pb (série ^{232}Th). Pour quatre autres, seules sont données les limites de détection : $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (série ^{238}U) et ^{235}U , ^{231}Pa , ^{227}Th (série ^{235}U).

Nous citons ci-après quelques éléments concernant les difficultés métrologiques rencontrées par SUBATECH lors des mesures par spectrométrie gamma [7] :

"Pour certains échantillons, la quantité n'a pas été suffisante pour réaliser la géométrie adéquate intégrant les calculs de correction d'atténuation liée à une densité s'écartant de 1 (à 5% près). Pour ces échantillons, les analyses ont donc été réalisées sur notre géométrie la plus plane en adéquation avec la quantité permise afin de limiter les phénomènes d'auto-atténuation prépondérants sur les radioéléments d'émission gamma de faible énergie. Les radionucléides édités les plus concernés sont le ^{210}Pb et le ^{234}Th pour la chaîne de ^{238}U et, dans une moindre mesure, le ^{212}Pb pour la chaîne du ^{232}Th .

Ainsi, sur les 115 échantillons traités et comptés, 100 ont pu être analysés en appliquant les facteurs de correction pertinents, et 15 ont été comptés dans les géométries les plus adaptées n'ayant pas pu faire l'objet de la correction.

Les échantillons n'ayant pas pu être corrigés et qui ont donc été mesurés dans une géométrie plane sont les suivants :

| | | |
|------------|-------------|-------------|
| STA1 0-0,2 | STA5 0,65-1 | STA21 0-0,2 |
| STA2 0-0,2 | STA7 0-0,2 | STA24 4-5 |
| STA3 0-0,2 | STA11 1-2 | STA26 0-0,2 |
| STA4 0-0,2 | STA18 2-3 | STA27 0-1 |
| STA5 0-0,2 | STA20 0-0,2 | STA29 0-1 |

L'équilibre entre le ^{226}Ra et le ^{214}Pb via la recroissance du ^{222}Rn nécessitant au moins 3 semaines après les étapes de prétraitement des échantillons, séchage, tamisage puis mise en géométrie et, les mesures en spectrométrie gamma, n'a pas pu être respectée compte tenu du délai de réalisation demandé.

Dans la chaîne du ^{232}Th , les éléments sélectionnés présentant le moins d'interférences gamma ou de problème d'auto atténuation sont : ^{228}Ac (911 keV), ^{212}Pb (238 keV) et ^{208}Tl (583 keV).

Dans la chaîne de ^{238}U , les éléments édités sont : ^{234}Th (63 keV), ^{226}Ra (186 keV), ^{214}Pb (351 keV) et ^{210}Pb (46,5 keV). Ces différents radionucléides présentent soit des problèmes d'interférence comme le ^{226}Ra avec ^{235}U (corrigé par le calcul), soit des problèmes de correction d'auto atténuation au regard de leurs faibles énergies d'émission ainsi que le problème de recroissance déjà évoqué."

L'ensemble de ces remarques est à prendre en considération lors de l'interprétation des analyses obtenues par spectrométrie gamma.

Tableau 1. Activités massiques exprimées en Bq.kg⁻¹ sec ($\pm 2\sigma$) dans les sédiments carottés dans la zone du Port des Minimes (fraction inférieure à 2 mm) ; les niveaux inférieurs et supérieurs sont donnés en mètres ; dans la colonne DRA, les carrés ouverts indiquent les sédiments prélevés dans des zones qui ne seront pas dragués et qui, de ce fait, n'ont pas été pris en compte dans le calcul des moyennes ; les valeurs précédées du signe "<" sont des limites de détection.

| STA | Niv inf | Niv sup | DRA | DATE | ⁴⁰ K | ¹³⁷ Cs | ²²⁸ Ac | ²¹² Pb | ²⁰⁸ Tl | ²³⁴ Th | ^{234m} Pa | ²²⁶ Ra | ²¹⁴ Pb | ²¹⁰ Pb | ²³⁵ U | ²³¹ Pa | ²²⁷ Th |
|-----|---------|---------|-----|----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0.2 | 0 | □ | 04/08/09 | 670 ± 110 | 4.1 ± 1.2 | 29 ± 6 | 37 ± 5 | 14 ± 7 | 36 ± 20 | < 480 | 34 ± 17 | 25 ± 4 | 96 ± 20 | < 5.1 | < 8.9 | < 4.5 |
| 2 | 0.2 | 0 | □ | 04/08/09 | 660 ± 110 | 4.1 ± 1.0 | 30 ± 5 | 37 ± 5 | 12 ± 6 | 28 ± 15 | < 207 | 30 ± 15 | 24 ± 3 | 75 ± 13 | < 2.1 | < 7 | < 4.1 |
| 3 | 0.2 | 0 | □ | 04/08/09 | 570 ± 90 | 3.4 ± 1.0 | 23 ± 5 | 30 ± 4 | 12 ± 7 | 20 ± 12 | < 390 | 34 ± 17 | 17 ± 3 | 80 ± 16 | < 4.2 | < 7 | < 3.5 |
| 4 | 0.2 | 0 | □ | 04/08/09 | 700 ± 110 | 4.5 ± 1.3 | 27 ± 6 | 39 ± 6 | 13 ± 7 | 35 ± 21 | < 500 | 25 ± 13 | 24 ± 4 | 89 ± 17 | < 4.6 | < 9 | < 5 |
| 5 | 0.2 | 0 | ■ | 11/08/09 | 660 ± 80 | 6.7 ± 1.2 | 28 ± 5 | 38 ± 6 | 11 ± 7 | 31 ± 18 | < 0 | < 46 | 20 ± 4 | 59 ± 15 | < 2.8 | < 8.2 | < 6.1 |
| 5 | 1 | 0.65 | ■ | 04/08/09 | 660 ± 110 | 3.9 ± 1.0 | 30 ± 5 | 33 ± 5 | 10 ± 6 | 17 ± 11 | < 191 | 36 ± 18 | 22 ± 3 | 72 ± 14 | < 0.8 | < 6.2 | < 3.5 |
| 6 | 0.2 | 0 | □ | 04/08/09 | 680 ± 110 | 3.3 ± 1.2 | 29 ± 6 | 35 ± 5 | < 0 | 34 ± 18 | < 260 | 22 ± 11 | 24 ± 4 | 82 ± 18 | < 4 | < 8.3 | < 4.6 |
| 7 | 0.2 | 0 | □ | 04/08/09 | 620 ± 100 | 3.5 ± 1.1 | 23 ± 5 | 33 ± 5 | 12 ± 6 | 33 ± 18 | < 90 | < 38 | 20 ± 3 | 72 ± 14 | < 0.3 | < 8.2 | < 4.5 |
| 8 | 1 | 0 | ■ | 11/08/09 | 600 ± 100 | 1.1 ± 0.6 | 39 ± 6 | 49 ± 9 | 14 ± 2 | 16 ± 10 | < 50 | 38 ± 19 | 18 ± 3 | 41 ± 31 | < 0.6 | < 0.099 | < 0.1 |
| 8 | 2 | 1 | ■ | 11/08/09 | 550 ± 90 | < 0.64 | 15 ± 3 | 17 ± 3 | 7.9 ± 4.2 | < 11 | < 110 | 26 ± 13 | 12 ± 2 | < 18 | < 2.7 | < 6.5 | < 4.2 |
| 8 | 3 | 2 | ■ | 11/08/09 | 610 ± 90 | < 0.77 | 33 ± 5 | 38 ± 6 | 14 ± 6 | 18 ± 17 | < 120 | 58 ± 29 | 31 ± 5 | 22 ± 16 | < 2.2 | < 6.5 | < 5.2 |
| 8 | 4 | 3 | ■ | 24/07/09 | 720 ± 130 | < 0.6 | 33 ± 5 | 39 ± 12 | 16 ± 5 | 18 ± 11 | < 110 | 34 ± 17 | 31 ± 8 | < 17 | < 1.5 | < 11 | < 3.9 |
| 8 | 5 | 4 | ■ | 11/08/09 | 640 ± 90 | < 0.78 | 35 ± 5 | 41 ± 6 | 12 ± 5 | 16 ± 12 | < 140 | 54 ± 27 | 33 ± 5 | 23 ± 14 | < 2.2 | < 5.1 | < 5.1 |
| 8 | 6 | 5 | ■ | 11/08/09 | 510 ± 80 | < 0.71 | 27 ± 4 | 31 ± 5 | 13 ± 5 | 27 ± 18 | < 120 | 42 ± 21 | 29 ± 4 | 22 ± 14 | < 2 | < 4.9 | < 4.5 |
| 9 | 1 | 0 | ■ | 11/08/09 | 580 ± 100 | < 0.83 | 25 ± 4 | 32 ± 6 | 9.5 ± 1.7 | 12 ± 10 | < 140 | 28 ± 14 | 17 ± 3 | < 7 | < 1.5 | < 0.095 | < 2.8 |
| 9 | 2 | 1 | ■ | 07/08/09 | 620 ± 110 | < 0.52 | 18 ± 3 | 22 ± 8 | 9.6 ± 3.5 | 17 ± 11 | < 94 | 14 ± 7 | 16 ± 4 | < 35 | < 1.2 | < 7.7 | < 3.2 |
| 9 | 3 | 2 | ■ | 07/08/09 | 560 ± 80 | < 0.78 | 30 ± 5 | 35 ± 7 | 11 ± 2 | 18 ± 14 | < 140 | 41 ± 20 | 29 ± 5 | 30 ± 20 | < 2.3 | < 6.3 | < 5.2 |
| 9 | 4 | 3 | ■ | 07/08/09 | 580 ± 90 | < 0.56 | 28 ± 4 | 33 ± 6 | 10 ± 4 | 26 ± 15 | < 170 | 51 ± 25 | 28 ± 5 | 60 ± 50 | < 1.5 | < 5.2 | < 3.8 |
| 9 | 5 | 4 | ■ | 11/08/09 | 460 ± 70 | < 0.7 | 25 ± 4 | 27 ± 4 | 12 ± 4 | 18 ± 12 | < 230 | 47 ± 24 | 22 ± 4 | 17 ± 14 | < 0.1 | < 6 | < 4.7 |
| 9 | 6 | 5 | ■ | 07/08/09 | 630 ± 110 | < 0.57 | 30 ± 5 | 38 ± 12 | 11 ± 4 | 36 ± 20 | < 220 | 44 ± 22 | 34 ± 8 | 31 ± 25 | < 1.5 | < 9.4 | < 3.9 |
| 10 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 720 ± 150 | < 0.5 | 20 ± 3 | 24 ± 8 | 7.5 ± 1.3 | 13 ± 9 | < 5 | 20 ± 10 | 18 ± 5 | < 5 | < 0.2 | < 0.4 | < 0.3 |
| 10 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 640 ± 130 | < 0.52 | 27 ± 4 | 35 ± 12 | 11 ± 3 | 25 ± 15 | < 100 | 41 ± 21 | 29 ± 7 | < 27 | < 1.4 | < 8.3 | < 3.6 |
| 10 | 3 | 2 | ■ | 04/08/09 | 670 ± 120 | < 0.61 | 33 ± 5 | 39 ± 13 | 14 ± 4 | 16 ± 12 | < 120 | 56 ± 28 | 33 ± 8 | 23 ± 16 | < 1.6 | < 9.6 | < 4.1 |
| 10 | 4 | 3 | ■ | 04/08/09 | 660 ± 120 | < 0.53 | 26 ± 4 | 32 ± 10 | 9.8 ± 1.5 | 21 ± 13 | < 110 | 36 ± 18 | 27 ± 7 | < 65 | < 1.4 | < 16 | < 3.9 |
| 10 | 5 | 4 | ■ | 04/08/09 | 580 ± 100 | < 0.54 | 28 ± 4 | 32 ± 10 | 14 ± 5 | 32 ± 18 | < 220 | 45 ± 23 | 30 ± 7 | 21 ± 16 | < 1.5 | < 9 | < 3.7 |
| 10 | 5.5 | 5 | ■ | 04/08/09 | 550 ± 100 | < 0.62 | 27 ± 4 | 31 ± 10 | 11 ± 4 | 27 ± 15 | < 10 | 39 ± 19 | 28 ± 7 | < 2 | < 0.5 | < 3 | < 0.7 |
| 11 | 1 | 0 | ■ | 07/08/09 | 570 ± 90 | 1.0 ± 0.7 | 40 ± 6 | 46 ± 8 | 15 ± 2 | 16 ± 10 | < 170 | 39 ± 19 | 23 ± 4 | 20 ± 11 | < 1.8 | < 0.11 | < 3.3 |
| 11 | 2 | 1 | ■ | 07/08/09 | 680 ± 110 | < 0.87 | 37 ± 6 | 37 ± 5 | 13 ± 7 | 20 ± 12 | < 390 | 38 ± 19 | 22 ± 3 | < 10 | < 2 | < 6.8 | < 3.8 |
| 11 | 3 | 2 | ■ | 22/07/09 | 700 ± 110 | < 0.99 | 37 ± 6 | 46 ± 8 | 14 ± 6 | 22 ± 13 | < 190 | 40 ± 20 | 31 ± 5 | 17 ± 8 | < 1.9 | < 0.12 | < 3.5 |
| 11 | 4 | 3 | ■ | 07/08/09 | 670 ± 120 | < 0.57 | 29 ± 4 | 36 ± 12 | 10 ± 2 | 19 ± 11 | < 200 | 36 ± 18 | 31 ± 8 | < 19 | < 1.4 | < 8.5 | < 3.9 |
| 11 | 5 | 4 | ■ | 07/08/09 | 540 ± 100 | < 0.52 | 20 ± 3 | 25 ± 8 | 8.3 ± 3.1 | 13 ± 9 | < 180 | 22 ± 11 | 21 ± 5 | 43 ± 34 | < 1.3 | < 8.3 | < 3.3 |
| 11 | 6 | 5 | ■ | 07/08/09 | 540 ± 80 | < 0.62 | 26 ± 4 | 29 ± 4 | 8.9 ± 3.7 | 16 ± 11 | < 0 | 31 ± 16 | 24 ± 4 | < 7 | < 0.8 | < 0.5 | < 0.2 |
| 12 | 1 | 0 | ■ | 07/08/09 | 500 ± 80 | 1.1 ± 0.5 | 44 ± 6 | 40 ± 5 | 14 ± 5 | 14 ± 9 | < 130 | 20 ± 10 | 18 ± 3 | 16 ± 6 | < 1.4 | < 4.5 | < 2.9 |
| 12 | 2 | 1 | ■ | 06/08/09 | 680 ± 130 | < 0.52 | 25 ± 4 | 32 ± 10 | 9.7 ± 3.9 | 15 ± 10 | < 100 | 34 ± 17 | 23 ± 6 | 24 ± 23 | < 1.3 | < 8.5 | < 3.5 |
| 12 | 3 | 2 | ■ | 06/08/09 | 650 ± 100 | < 0.85 | 35 ± 6 | 37 ± 6 | 14 ± 5 | 20 ± 15 | < 150 | 46 ± 23 | 28 ± 4 | 28 ± 17 | < 2.3 | < 7.1 | < 5.3 |
| 12 | 4 | 3 | ■ | 07/08/09 | 700 ± 130 | < 0.6 | 33 ± 5 | 38 ± 12 | 15 ± 4 | 20 ± 13 | < 210 | 26 ± 13 | 27 ± 7 | < 15 | < 1.5 | < 12 | < 3.9 |
| 12 | 5 | 4 | ■ | 06/08/09 | 640 ± 110 | < 0.56 | 25 ± 4 | 32 ± 10 | 10 ± 4 | 15 ± 10 | < 210 | 42 ± 21 | 27 ± 7 | 28 ± 20 | < 1.5 | < 10 | < 3.7 |

Tableau 1. (suite)

| STA | Niv inf | Niv sup | DRA | DATE | ⁴⁰ K | ¹³⁷ Cs | ²²⁸ Ac | ²¹² Pb | ²⁰⁸ Tl | ²³⁴ Th | ^{234m} Pa | ²²⁶ Ra | ²¹⁴ Pb | ²¹⁰ Pb | ²³⁵ U | ²³¹ Pa | ²²⁷ Th |
|-----|---------|---------|-----|----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 12 | 5.6 | 5 | ■ | 06/08/09 | 520 ± 80 | < 0.86 | 26 ± 5 | 30 ± 5 | 9.9 ± 5 | 18 ± 11 | < 160 | 37 ± 19 | 26 ± 5 | 22 ± 12 | < 1.7 | < 0.11 | < 3 |
| 13 | 1 | 0 | ■ | 06/08/09 | 610 ± 120 | < 0.55 | 30 ± 5 | 37 ± 13 | 12 ± 4 | 16 ± 10 | < 88 | 26 ± 13 | 16 ± 4 | < 24 | < 1.3 | < 8.6 | < 3.4 |
| 13 | 2 | 1 | ■ | 06/08/09 | 550 ± 90 | < 0.77 | 22 ± 4 | 27 ± 5 | 9.8 ± 4.6 | 14 ± 9 | < 140 | 31 ± 16 | 21 ± 4 | 27 ± 23 | < 1.5 | < 0.098 | < 2.7 |
| 13 | 3 | 2 | ■ | 06/08/09 | 510 ± 80 | < 0.83 | 24 ± 5 | 26 ± 5 | 11 ± 5 | 15 ± 9 | < 160 | 38 ± 19 | 19 ± 4 | 15 ± 9 | < 1.6 | < 0.11 | < 2.8 |
| 13 | 4 | 3 | ■ | 06/08/09 | 510 ± 80 | < 0.73 | 25 ± 4 | 29 ± 5 | 8.7 ± 4.8 | 18 ± 12 | < 120 | 41 ± 20 | 23 ± 4 | < 29 | < 2 | < 5.8 | < 4.9 |
| 13 | 4.5 | 4 | ■ | 11/08/09 | 510 ± 80 | < 0.66 | 26 ± 4 | 27 ± 4 | 10 ± 5 | 28 ± 4 | < 30 | 33 ± 17 | 22 ± 4 | 22 ± 15 | < 0 | < 0.5 | < 0.9 |
| 14 | 1 | 0 | ■ | 05/08/09 | 660 ± 100 | < 0.82 | 41 ± 6 | 49 ± 8 | 15 ± 2 | 22 ± 16 | < 120 | 34 ± 17 | 27 ± 4 | 20 ± 14 | < 2.1 | < 5.3 | < 4.8 |
| 14 | 2 | 1 | ■ | 05/08/09 | 720 ± 130 | < 0.64 | 38 ± 6 | 42 ± 14 | 14 ± 4 | 18 ± 11 | < 20 | 34 ± 17 | 29 ± 7 | 25 ± 18 | < 0.6 | < 0.8 | < 0.1 |
| 14 | 3 | 2 | ■ | 05/08/09 | 500 ± 90 | < 0.5 | 15 ± 3 | 20 ± 6 | 6.1 ± 3.1 | 12 ± 8 | < 10 | 24 ± 12 | 18 ± 4 | < 0 | < 0.3 | < 0.2 | < 0.3 |
| 14 | 4 | 3 | ■ | 05/08/09 | 630 ± 110 | < 0.61 | 27 ± 4 | 33 ± 11 | 9.7 ± 1.5 | 22 ± 13 | < 20 | 33 ± 17 | 29 ± 7 | 26 ± 18 | < 0.5 | < 0.6 | < 0.9 |
| 14 | 5 | 4 | ■ | 05/08/09 | 580 ± 100 | < 0.6 | 32 ± 5 | 33 ± 11 | 10 ± 4 | 24 ± 13 | < 20 | 43 ± 21 | 28 ± 7 | < 3 | < 0.2 | < 0.4 | < 0.9 |
| 14 | 6 | 5 | ■ | 06/08/09 | 600 ± 110 | < 0.56 | 26 ± 4 | 31 ± 10 | 10 ± 4 | 27 ± 4 | < 90 | 41 ± 20 | 28 ± 7 | 46 ± 36 | < 0.4 | < 6 | < 0.5 |
| 15 | 1 | 0 | ■ | 07/08/09 | 550 ± 100 | < 0.74 | 19 ± 4 | 25 ± 5 | 7.8 ± 4.2 | | < 30 | 39 ± 20 | 14 ± 3 | < 78 | < 0.4 | < 0.094 | < 0.6 |
| 15 | 2 | 1 | ■ | 07/08/09 | 670 ± 130 | < 0.54 | 21 ± 3 | 27 ± 9 | 8.5 ± 2.9 | 19 ± 12 | < 180 | 26 ± 13 | 19 ± 5 | < 59 | < 1.3 | < 8.4 | < 3.3 |
| 15 | 3 | 2 | ■ | 11/08/09 | 620 ± 100 | < 0.57 | 18 ± 3 | 20 ± 3 | 8 ± 4 | < 11 | < 93 | 26 ± 13 | 15 ± 3 | < 22 | < 2.3 | < 4.1 | < 3.9 |
| 15 | 4 | 3 | ■ | 11/08/09 | 450 ± 70 | < 0.67 | 21 ± 4 | 21 ± 3 | 7.6 ± 4.3 | 13 ± 11 | < 20 | 26 ± 13 | 19 ± 3 | < 7 | < 0.9 | < 0.1 | < 0.4 |
| 15 | 5 | 4 | ■ | 11/08/09 | 550 ± 100 | < 0.55 | 25 ± 4 | 32 ± 10 | 9.5 ± 3.8 | 14 ± 10 | < 130 | 36 ± 18 | 28 ± 7 | 35 ± 25 | < 1.4 | < 8.9 | < 3.7 |
| 16 | 1 | 0 | ■ | 11/08/09 | 590 ± 90 | < 0.58 | 14 ± 3 | 17 ± 3 | 5.8 ± 3.6 | < 9.9 | < 100 | 26 ± 13 | 12 ± 2 | < 18 | < 1.5 | < 4.2 | < 3.7 |
| 16 | 2 | 1 | ■ | 11/08/09 | 660 ± 120 | < 0.58 | 31 ± 5 | 35 ± 11 | 11 ± 4 | 18 ± 12 | < 200 | 51 ± 25 | 30 ± 7 | 54 ± 49 | < 1.4 | < 11 | < 3.7 |
| 16 | 3 | 2 | ■ | 22/07/09 | 700 ± 120 | < 0.61 | 34 ± 5 | 40 ± 13 | 12 ± 2 | 26 ± 16 | < 110 | 43 ± 22 | 32 ± 8 | 31 ± 24 | < 5.6 | < 15 | < 4.2 |
| 16 | 4 | 3 | ■ | 22/07/09 | 590 ± 90 | < 0.83 | 31 ± 5 | 37 ± 6 | 11 ± 2 | 20 ± 12 | < 160 | 54 ± 27 | 31 ± 6 | 29 ± 17 | < 1.7 | < 0.1 | < 3.2 |
| 16 | 5 | 4 | ■ | 06/08/09 | 550 ± 80 | < 0.71 | 27 ± 4 | 32 ± 5 | 13 ± 5 | 15 ± 11 | < 120 | 51 ± 25 | 27 ± 4 | 18 ± 12 | < 1.9 | < 4.7 | < 4.6 |
| 17 | 0.2 | 0 | ■ | 04/08/09 | 740 ± 130 | 3.2 ± 0.5 | 34 ± 5 | 43 ± 14 | 14 ± 2 | 21 ± 12 | < 140 | 38 ± 19 | 27 ± 6 | 63 ± 36 | < 1.6 | < 13 | < 4.3 |
| 17 | 1 | 0.5 | ■ | 04/08/09 | 680 ± 130 | < 0.52 | 24 ± 4 | 30 ± 10 | 10 ± 3 | 16 ± 10 | < 99 | 37 ± 18 | 19 ± 5 | < 49 | < 1.3 | < 8.6 | < 3.4 |
| 17 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 700 ± 140 | < 0.46 | 18 ± 3 | 22 ± 8 | < 7.8 | < 7.9 | < 190 | 29 ± 14 | 17 ± 4 | < 24 | < 1.2 | < 8.5 | < 3.2 |
| 17 | 3 | 2 | ■ | 04/08/09 | 640 ± 120 | < 0.48 | 18 ± 3 | 21 ± 7 | 6.4 ± 1.1 | < 0.8 | < 8 | 31 ± 16 | 19 ± 5 | < 7 | < 0.2 | < 0 | < 0.3 |
| 17 | 4 | 3 | ■ | 04/08/09 | 650 ± 120 | < 0.59 | 32 ± 5 | 35 ± 11 | 12 ± 4 | 21 ± 13 | < 110 | 38 ± 19 | 30 ± 7 | 44 ± 29 | < 1.5 | < 9.9 | < 3.7 |
| 17 | 5 | 4 | ■ | 04/08/09 | 560 ± 90 | < 0.69 | 29 ± 5 | 30 ± 6 | 12 ± 4 | 21 ± 15 | < 30 | 29 ± 15 | 25 ± 4 | < 9 | < 0.1 | < 0.4 | < 0.7 |
| 18 | 1 | 0 | ■ | 05/08/09 | 640 ± 110 | < 0.55 | 19 ± 3 | 22 ± 7 | 8.7 ± 3.2 | 16 ± 10 | < 97 | < 20 | 12 ± 3 | < 14 | < 1.2 | < 7.5 | < 3.2 |
| 18 | 2 | 1 | ■ | 05/08/09 | 560 ± 100 | < 0.5 | 19 ± 3 | 21 ± 7 | 6 ± 1 | 12 ± 8 | < 90 | 25 ± 12 | 16 ± 4 | < 3 | < 0.2 | < 0.6 | < 0.3 |
| 18 | 3 | 2 | ■ | 05/08/09 | 630 ± 130 | < 0.49 | 21 ± 4 | 29 ± 10 | 11 ± 4 | 21 ± 13 | < 90 | 25 ± 13 | 25 ± 6 | < 31 | < 1.3 | < 7.6 | < 3.4 |
| 18 | 4 | 3 | ■ | 05/08/09 | 660 ± 120 | < 0.52 | 28 ± 4 | 33 ± 11 | 11 ± 4 | 23 ± 14 | < 100 | 38 ± 19 | 29 ± 7 | < 18 | < 1.4 | < 16 | < 3.7 |
| 18 | 5 | 4 | ■ | 05/08/09 | 590 ± 110 | < 0.62 | 28 ± 4 | 30 ± 10 | 9.1 ± 1.5 | 23 ± 13 | < 50 | 47 ± 24 | 26 ± 6 | 22 ± 16 | < 0.5 | < 0 | < 0.9 |
| 19 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 640 ± 130 | 0.8 ± 0.4 | 23 ± 4 | 28 ± 10 | 8.5 ± 3.2 | 15 ± 11 | < 5 | 20 ± 10 | 17 ± 5 | < 34 | < 0.2 | < 0.3 | < 0.1 |
| 19 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 560 ± 90 | < 0.58 | 21 ± 4 | 24 ± 4 | 6.8 ± 1.2 | 23 ± 16 | < 0 | 21 ± 11 | 19 ± 3 | < 7 | < 0.7 | < 0.5 | < 0.3 |
| 19 | 3 | 2 | ■ | 24/07/09 | 540 ± 120 | < 0.45 | 17 ± 3 | 22 ± 7 | 7.3 ± 3.2 | 17 ± 11 | < 6 | 30 ± 14 | 21 ± 6 | < 9 | < 0.2 | < 0.6 | < 0.1 |
| 19 | 4 | 3 | ■ | 04/08/09 | 550 ± 100 | < 0.55 | 22 ± 4 | 27 ± 9 | 9.2 ± 3.8 | 21 ± 13 | < 20 | 39 ± 19 | 25 ± 6 | 25 ± 20 | < 0.4 | < 0.1 | < 0.4 |

Tableau 1. (suite)

| STA | Niv inf | Niv sup | DRA | DATE | ⁴⁰ K | ¹³⁷ Cs | ²²⁸ Ac | ²¹² Pb | ²⁰⁸ Tl | ²³⁴ Th | ^{234m} Pa | ²²⁶ Ra | ²¹⁴ Pb | ²¹⁰ Pb | ²³⁵ U | ²³¹ Pa | ²²⁷ Th |
|-----|---------|---------|-----|----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 19 | 5 | 4 | ■ | 04/08/09 | 530 ± 100 | < 0.52 | 23 ± 4 | 27 ± 9 | 9.2 ± 3.3 | 24 ± 15 | < 6 | 32 ± 16 | 25 ± 6 | < 0 | < 0.3 | < 0.7 | < 0.2 |
| 20 | 0.2 | 0 | ■ | 11/08/09 | 590 ± 70 | 3.2 ± 1.2 | 33 ± 6 | 33 ± 5 | 12 ± 7 | 28 ± 17 | < 230 | < 46 | 19 ± 4 | 34 ± 17 | < 2.8 | < 8.3 | < 6.1 |
| 20 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 650 ± 140 | < 0.47 | 14 ± 3 | 18 ± 6 | 7.6 ± 3 | < 0.4 | < 70 | 27 ± 14 | 15 ± 15 | < 8 | < 0.1 | < 0.8 | < 0.9 |
| 20 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 540 ± 100 | < 0.65 | 20 ± 4 | 22 ± 4 | 7.3 ± 3.5 | < 4 | < 99 | 31 ± 15 | 16 ± 3 | < 68 | < 1.6 | < 5.2 | < 4.5 |
| 20 | 3 | 2 | ■ | 04/08/09 | 560 ± 120 | < 0.45 | 19 ± 3 | 23 ± 8 | 8.2 ± 3 | < 0.1 | < 8 | 34 ± 17 | 19 ± 5 | < 5 | < 0.2 | < 0.4 | < 0.2 |
| 20 | 4 | 3 | ■ | 04/08/09 | 610 ± 130 | < 0.47 | 19 ± 3 | 23 ± 8 | 8.4 ± 3.2 | 13 ± 9 | < 84 | 34 ± 17 | 21 ± 5 | < 130 | < 1.2 | < 7.5 | < 3 |
| 20 | 5 | 4 | ■ | 04/08/09 | 540 ± 100 | < 0.53 | 23 ± 4 | 27 ± 9 | 8.8 ± 3.7 | 20 ± 12 | < 60 | 38 ± 19 | 25 ± 6 | < 1 | < 0.4 | < 0 | < 0.7 |
| 21 | 0.2 | 0 | ■ | 11/08/09 | 670 ± 110 | 3.5 ± 1.0 | 36 ± 6 | 37 ± 5 | 13 ± 6 | 25 ± 15 | < 200 | 40 ± 20 | 25 ± 4 | 68 ± 12 | < 1.9 | < 6.7 | < 3.8 |
| 21 | 1 | 0.6 | ■ | 04/08/09 | 690 ± 150 | 1.8 ± 0.5 | 29 ± 5 | 37 ± 13 | 12 ± 4 | 21 ± 13 | < 95 | 29 ± 14 | 18 ± 5 | < 270 | < 1.3 | < 11 | < 3.5 |
| 21 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 650 ± 130 | < 0.5 | 17 ± 3 | 21 ± 7 | 6.4 ± 2.7 | 19 ± 12 | < 89 | < 19 | 14 ± 4 | < 24 | < 1.2 | < 7.9 | < 3.2 |
| 21 | 3 | 2 | ■ | 04/08/09 | 660 ± 140 | < 0.48 | 20 ± 3 | 25 ± 8 | 8.4 ± 8.4 | 21 ± 14 | < 3 | 13 ± 6 | 16 ± 4 | < 4 | < 0.2 | < 0.3 | < 0.1 |
| 21 | 4 | 3 | ■ | 04/08/09 | 690 ± 110 | < 0.69 | 27 ± 4 | 32 ± 5 | 15 ± 5 | < 3 | < 10 | 59 ± 30 | 27 ± 4 | 32 ± 27 | < 1.9 | < 4.7 | < 4.5 |
| 21 | 5 | 4 | ■ | 04/08/09 | 620 ± 120 | 1.4 ± 0.7 | 38 ± 6 | 45 ± 9 | 15 ± 5 | < 15 | < 100 | 46 ± 23 | 18 ± 3 | < 156 | < 2 | < 5.4 | < 4.7 |
| 22 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 720 ± 130 | 1.5 ± 0.7 | 72 ± 10 | 87 ± 28 | 30 ± 6 | 21 ± 14 | < 20 | 33 ± 17 | 29 ± 7 | 60 ± 46 | < 0.8 | < 1 | < 0.6 |
| 22 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 670 ± 140 | < 0.56 | 29 ± 5 | 34 ± 12 | 10 ± 3.7 | 14 ± 12 | < 90 | 36 ± 18 | 22 ± 6 | < 4 | < 0.3 | < 0.8 | < 0.4 |
| 22 | 3 | 2 | ■ | 04/08/09 | 720 ± 130 | < 0.62 | 36 ± 6 | 42 ± 14 | 14 ± 5 | 26 ± 15 | < 30 | 49 ± 25 | 34 ± 8 | < 4 | < 0.7 | < 0.9 | < 0.1 |
| 22 | 4 | 3 | ■ | 04/08/09 | 660 ± 120 | < 0.6 | 29 ± 5 | 36 ± 12 | 11 ± 4 | 19 ± 12 | < 220 | 52 ± 26 | 32 ± 8 | < 16 | < 1.5 | < 8.6 | < 4 |
| 22 | 5 | 4 | ■ | 04/08/09 | 680 ± 120 | < 0.67 | 34 ± 6 | 40 ± 13 | 14 ± 5 | 22 ± 14 | < 120 | 47 ± 24 | 35 ± 9 | < 12 | < 1.6 | < 13 | < 4.1 |
| 23 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 710 ± 130 | 2.1 ± 0.6 | 81 ± 11 | 99 ± 32 | 35 ± 7 | 29 ± 17 | < 240 | 28 ± 14 | 30 ± 7 | < 19 | < 1.9 | < 18 | < 4.9 |
| 23 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 600 ± 120 | < 0.53 | 27 ± 4 | 34 ± 12 | 10 ± 2 | 19 ± 12 | < 98 | 47 ± 23 | 30 ± 7 | < 87 | < 1.4 | < 8.5 | < 3.5 |
| 23 | 3 | 2 | ■ | 04/08/09 | 640 ± 110 | < 0.61 | 30 ± 5 | 38 ± 12 | 12 ± 2 | 20 ± 12 | < 130 | 52 ± 26 | 33 ± 8 | 28 ± 18 | < 1.6 | < 9.4 | < 4.1 |
| 23 | 4 | 3 | ■ | 04/08/09 | 660 ± 120 | < 0.71 | 34 ± 6 | 41 ± 13 | 12 ± 5 | 25 ± 14 | < 40 | 38 ± 19 | 37 ± 9 | < 2 | < 0.7 | < 6 | < 0.4 |
| 23 | 5 | 4 | ■ | 04/08/09 | 590 ± 90 | < 1 | 34 ± 6 | 41 ± 7 | 12 ± 2 | 16 ± 11 | < 210 | 81 ± 41 | 31 ± 6 | 18 ± 9 | < 1.9 | < 0.12 | < 3.4 |
| 24 | 1 | 0 | ■ | 22/07/09 | 660 ± 100 | < 0.72 | 29 ± 5 | 34 ± 5 | 14 ± 5 | 22 ± 14 | < 120 | 42 ± 21 | 27 ± 5 | 20 ± 18 | < 2 | < 4.9 | < 4.4 |
| 24 | 2 | 1 | ■ | 22/07/09 | 620 ± 90 | < 0.8 | 27 ± 4 | 28 ± 4 | 9.8 ± 4.9 | 22 ± 19 | < 120 | 21 ± 10 | 20 ± 3 | 27 ± 20 | < 2 | < 5.8 | < 5 |
| 24 | 3 | 2 | ■ | 22/07/09 | 660 ± 100 | < 0.86 | 27 ± 5 | 32 ± 5 | 9.7 ± 1.7 | 16 ± 11 | < 330 | 36 ± 18 | 22 ± 4 | 24 ± 13 | < 1.7 | < 0.11 | < 3.1 |
| 24 | 4 | 3 | ■ | 07/08/09 | 560 ± 80 | < 0.71 | 30 ± 5 | 35 ± 5 | 11 ± 5 | 25 ± 16 | < 120 | 50 ± 25 | 27 ± 4 | 14 ± 10 | < 2.1 | < 10 | < 4.6 |
| 24 | 5 | 4 | ■ | 07/08/09 | 560 ± 91 | < 0.89 | 29 ± 5 | 33 ± 5 | < 8 | 32 ± 18 | < 230 | 57 ± 28 | 31 ± 4 | 26 ± 9 | < 2.1 | < 6.8 | < 4.1 |
| 25 | 0.2 | 0 | □ | 04/08/09 | 660 ± 110 | 3.6 ± 1.1 | 24 ± 5 | 32 ± 4 | 9.9 ± 1.7 | 23 ± 5 | < 248 | 37 ± 19 | 19 ± 3 | 77 ± 15 | < 2 | < 7.7 | < 4.2 |
| 26 | 0.2 | 0 | □ | 04/08/09 | 750 ± 120 | 5.4 ± 1.4 | 32 ± 7 | 44 ± 6 | < 0.5 | 29 ± 18 | < 304 | 35 ± 17 | 25 ± 4 | 100 ± 20 | < 2.8 | < 10 | < 5.5 |
| 27 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 660 ± 110 | 3.5 ± 1.0 | 41 ± 6 | 37 ± 5 | 16 ± 6 | 21 ± 12 | < 190 | 42 ± 21 | 24 ± 4 | 54 ± 11 | < 1.9 | < 6.3 | < 3.9 |
| 27 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 610 ± 110 | < 0.56 | 29 ± 4 | 33 ± 11 | 9.9 ± 4.4 | 18 ± 12 | < 10 | 35 ± 17 | 29 ± 7 | 21 ± 18 | < 0.4 | < 1 | < 0.8 |
| 28 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 700 ± 110 | 5.4 ± 1.3 | 39 ± 7 | 43 ± 7 | 15 ± 8 | 20 ± 15 | < 438 | 39 ± 20 | 25 ± 4 | 76 ± 15 | < 2.3 | < 8.1 | < 4.5 |
| 29 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 690 ± 110 | 4.6 ± 1.2 | 32 ± 6 | 39 ± 5 | < 2.7 | 27 ± 17 | < 226 | 31 ± 16 | 27 ± 4 | 74 ± 16 | < 2.3 | < 7.3 | < 4.4 |
| 30 | 1 | 0 | ■ | 04/08/09 | 670 ± 120 | 1.1 ± 0.3 | 34 ± 5 | 39 ± 13 | 12 ± 5 | 19 ± 12 | < 20 | 39 ± 19 | 28 ± 7 | 40 ± 24 | < 0.6 | < 1 | < 0.1 |
| 30 | 2 | 1 | ■ | 04/08/09 | 630 ± 110 | < 0.68 | 32 ± 5 | 38 ± 12 | 11 ± 4 | 25 ± 15 | < 30 | 47 ± 23 | 33 ± 8 | 30 ± 18 | < 0.7 | < 1 | < 0.3 |
| 31 | 1 | 0 | ■ | 05/08/09 | 630 ± 100 | 4.9 ± 1.2 | 40 ± 7 | 37 ± 5 | 14 ± 7 | 21 ± 12 | < 430 | 48 ± 24 | 23 ± 3 | 69 ± 16 | < 2.3 | < 8.4 | < 4.6 |
| 31 | 2 | 1 | ■ | 05/08/09 | 540 ± 100 | < 0.56 | 22 ± 4 | 26 ± 9 | 8.7 ± 4 | 20 ± 13 | < 110 | 41 ± 21 | 22 ± 5 | 23 ± 17 | < 1.4 | < 9.1 | < 3.5 |
| 31 | 3 | 2 | ■ | 05/08/09 | 640 ± 120 | < 0.5 | 28 ± 4 | 33 ± 11 | 9.8 ± 4 | 22 ± 15 | < 98 | 39 ± 20 | 30 ± 7 | < 21 | < 1.4 | < 8.8 | < 3.6 |

Tableau 2. Activités massiques exprimées en Bq.kg⁻¹ sec ($\pm 2\sigma$) dans les sédiments carottés dans le Fier d'Ars ; fraction inférieure à 2 mm ; les valeurs précédées du signe "<" sont des limites de détection.

| STA | Niv inf | Niv sup | DRA | DATE | ⁴⁰ K | ¹³⁷ Cs | ²²⁸ Ac | ²¹² Pb | ²⁰⁸ Tl | ²³⁴ Th | ^{234m} Pa | ²²⁶ Ra | ²¹⁴ Pb | ²¹⁰ Pb | ²³⁵ U | ²³¹ Pa | ²²⁷ Th |
|-----|---------|---------|-----|----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| FA1 | 1 | 0 | □ | 11/08/09 | 580 | 1.6 ± 0.6 | 23 ± 4 | 29 ± 5 | 11 ± 5 | 19 ± 12 | < 140 | 28 ± 14 | 20 ± 4 | 51 ± 49 | < 1.5 | < 0.097 | < 2.7 |
| FA2 | 1 | 0 | □ | 11/08/09 | 610 | < 1.4 | 26 ± 4 | 30 ± 5 | 9.5 ± 1.5 | 19 ± 14 | < 100 | 32 ± 16 | 22 ± 3 | 30 ± 18 | < 2 | < 4.7 | < 4.3 |

Tableau 3. Activités massiques exprimées en Bq.kg⁻¹ sec ($\pm 2\sigma$) dans les sédiments des plages de sable de l'île de Ré ; fraction inférieure à 2 mm ; les valeurs précédées du signe "<" sont des limites de détection.

| STA | DRA | DATE | ⁴⁰ K | ¹³⁷ Cs | ²²⁸ Ac | ²¹² Pb | ²⁰⁸ Tl | ²³⁴ Th | ^{234m} Pa | ²²⁶ Ra | ²¹⁴ Pb | ²¹⁰ Pb | ²³⁵ U | ²³¹ Pa | ²²⁷ Th |
|------------------------|-----|----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| La Conche des Baleines | □ | 09/11/09 | 110 ± 20 | < 0.26 | < 1.8 | 3.7 ± 0.7 | 1.2 ± 0.3 | < 4.1 | < 43 | 7.6 ± 3.8 | 3.5 ± 0.9 | < 3 | < 0.69 | < 1.9 | < 1.7 |
| Bois plage en Ré | □ | 09/11/09 | 250 ± 50 | < 0.24 | 3.7 ± 0.9 | 3.9 ± 1.3 | 1.0 ± 0.3 | < 5.6 | < 45 | 12 ± 6 | 5.3 ± 1.5 | < 3 | < 0.57 | < 3.9 | < 1.5 |
| Rivedoux plage | □ | 09/11/09 | 440 ± 90 | < 0.29 | 5.1 ± 1.3 | 6.2 ± 2.7 | 1.9 ± 0.4 | 8.2 ± 6.3 | < 110 | 5.8 ± 2.9 | 7.3 ± 2 | < 4 | < 0.68 | < 4.1 | < 1.8 |
| La Concurrence | □ | 09/11/09 | 240 ± 50 | < 0.24 | 4.7 ± 1.1 | 5.7 ± 2 | 1.7 ± 0.4 | 4.0 ± 4.1 | < 48 | < 10 | 6.3 ± 1.7 | 4.6 ± 3.8 | < 0.61 | < 3.6 | < 1.5 |
| Aytré plage | □ | 09/11/09 | 360 ± 80 | < 0.27 | 5.2 ± 1.2 | 6.7 ± 2.4 | 2 ± 0.4 | 5 ± 4 | < 51 | 8 ± 4 | 6 ± 1.7 | 3.4 ± 2.8 | < 0.63 | < 3.9 | < 1.7 |

Le tableau 4 présente les activités mesurées sous forme de moyennes calculées pour cinq lots d'échantillons : Port des Minimes (valeurs moyennes brutes ou pondérées de l'épaisseur des sections mesurées), Fier d'Ars (zone de référence hors influence industrielle), station 14 (niveaux anciens de référence) et plages de sable (une sur le continent et quatre sur l'île de Ré). Les activités moyennes ont été calculées sur les seuls stations et niveaux pour lesquels la cote observée était supérieure à la cote objectif : ils sont repérés dans les tableaux 1 à 3 (colonne DRA). Les rapports entre les valeurs moyennes brutes et les valeurs moyennes pondérées de l'épaisseur des sections mesurées montrent que les premières sont supérieures de moins de 10% aux secondes ; l'écart est plus important dans le cas du ^{137}Cs (ce qui s'explique par le fait que le ^{137}Cs est toujours détecté dans les niveaux superficiels) et dans le cas du ^{210}Pb (cf. Section : *Rappel sur l'origine des radionucléides artificiels et naturels*). Dans la suite, les calculs ont été réalisés sur les valeurs moyennes brutes non pondérées de l'épaisseur des tranches mesurées.

Ces données appellent les commentaires suivants :

- le césium 137 (^{137}Cs) n'est détecté que dans une vingtaine d'échantillons superficiels dans les sédiments fins, y compris au Fier d'Ars à des activités comprises entre 0,6 et 6,7 Bq.kg⁻¹, conformes à celles attendues pour des sédiments fins côtiers ; le ^{137}Cs n'est pas détecté dans les sables de plage ;
- les teneurs en potassium 40 (^{40}K) sont de l'ordre de 600 Bq.kg⁻¹ dans les sédiments vaseux du Port des Minimes, de même que dans les échantillons de référence (Fier d'Ars et station 14) ; leur variabilité dépend de l'abondance en argiles des sédiments ; dans les sables de plage, les activités en ^{40}K sont très variables (110-440 Bq.kg⁻¹), au moins partiellement à cause des variations de l'abondance de feldspaths potassiques ; les activités du ^{40}K correspondent à des concentrations en feldspaths potassiques (KAlSi_3O_8) de l'ordre de 6 % ;
- dans la chaîne du ^{232}Th , trois radionucléides ont été détectés dans presque tous les échantillons : l'actinium 228 (^{228}Ac), le plomb 212 (^{212}Pb) et le thallium 208 (^{208}Tl). Les deux premiers ont des activités moyennes de l'ordre de la trentaine de Bq.kg⁻¹. Des valeurs sensiblement plus élevées ne sont rencontrées que dans deux échantillons (tronçons de 0 à 1 m des stations 22 et 23) et n'ont, de ce fait, aucune influence sur l'activité moyenne du stock sédimentaire à draguer ; elles n'en témoignent pas moins de l'existence sporadique de stocks sédimentaires indubitablement marqués par des rejets industriels ; les activités du ^{208}Tl sont presque trois fois plus faibles : elles sont conformes aux activités du ^{228}Ac et du ^{212}Pb , eu égard au rapport d'embranchement de ce radionucléide (0,36) ; ces valeurs ne sont pas significativement différentes de celles mesurées dans les échantillons de référence (Fier d'Ars et station 14 - 4-6) et environ 6 fois supérieures à celles mesurées sur les plages ;

Tableau 4. Activités massiques exprimées en Bq.kg⁻¹ sec, mesurées dans les sédiments superficiels ou carottés ; (1) moyenne et écart-type (moy. ± σ) calculés sur les n activités significatives dont les valeurs minimales et maximales sont indiquées (min-max) ; (2) moyenne et écart-type, valeurs minimales et maximales des activités pondérées de l'épaisseur de la tranche mesurée ; (3) rapport moyennes brutes sur moyennes pondérées ; (4) radionucléide non détecté : la valeur représente la moyenne des limites de détection.

| | ⁴⁰ K | ¹³⁷ Cs | Série du ²³² Th | | | Série de l' ²³⁸ U | | | | | Série de l' ²³⁵ U | | |
|-------------------------|-----------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
| | | | ²²⁸ Ac | ²¹² Pb | ²⁰⁸ Tl | ²³⁴ Th | ^{234m} Pa | ²²⁶ Ra | ²¹⁴ Pb | ²¹⁰ Pb | ²³⁵ U | ²³¹ Pa | ²²⁷ Th |
| | | | | | | | (4) | | | | (4) | (4) | (4) |
| <i>Port des Minimes</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Moy, ± σ (1) | 616 ± 65 | 2,8 ± 1,8 | 29 ± 10 | 33 ± 11 | 11,2 ± 3,9 | 20 ± 5 | 88 | 37 ± 11 | 24,4 ± 5,9 | 34 ± 17 | 1,3 | 5,3 | 2,9 |
| min-max | 450 - 740 | 0,8 - 6,7 | 14 - 81 | 17 - 99 | 5,8 - 35,0 | 12 - 36 | | 13 - 81 | 12,0 - 37,0 | 14 - 76 | | | |
| n | 105 | 18 | 105 | 105 | 102 | 94 | | 101 | 105 | 55 | | | |
| Moy, ± σ (2) | 578 ± 133 | 1,9 ± 1,6 | 27 ± 11 | 31 ± 13 | 10,5 ± 4,5 | 19 ± 6 | | 36 ± 12 | 23,0 ± 7,6 | 29 ± 16 | | | |
| min-max | 118 - 720 | 0,6 - 5,4 | 6 - 81 | 7 - 99 | 2,2 - 35,0 | 4 - 36 | | 8 - 81 | 3,8 - 37,0 | 7 - 76 | | | |
| Rapport (3) | 1,07 | 1,50 | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 1,09 | | 1,05 | 1,06 | 1,15 | | | |
| <i>Fier d'Ars</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Moy, ± σ | 595 | 1,6 | 24,5 | 29,5 | 10,25 | 19 | 28 | 30 | 21 | 40,5 | 1,8 | 2,4 | 3,5 |
| min-max | 580 - 610 | 1,6 - 1,6 | 23 - 26 | 29 - 30 | 9,5 - 11,0 | 19 - 19 | | 28 - 32 | 20,0 - 22,0 | 30 - 51 | | | |
| n | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | | 2 | 2 | 2 | | | |
| <i>Station 14 (4-6)</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Moy, | 590 | | 29 | 32 | 10,0 | 26 | | 42 | 28,0 | 46 | 0,3 | 3,2 | 0,7 |
| min-max | 580 - 600 | | 32 | 33 | 10 | 24 - 27 | | 41 - 43 | 28,0 - 28,0 | 46 - 46 | | | |
| n | 2 | | 2 | 2 | 2 | 2 | | 2 | 2 | 1 | | | |
| <i>Plages</i> | | | | | | | | | | | | | |
| Moy, ± σ | 280 ± 126 | 0,3 | 4,7 ± 0,7 | 5 ± 1 | 1,6 ± 0,4 | 6 ± 2 | 28 | 8 ± 3 | 5,7 ± 1,4 | 4 ± 1 | 0,6 | 3,5 | 1,6 |
| min-max | 110 - 440 | | 4 - 5 | 4 - 7 | 1,0 - 2,0 | 4 - 8 | | 6 - 12 | 3,5 - 7,3 | 3 - 5 | | | |
| n | 5 | | 4 | 5 | 5 | 3 | | 4 | 5 | 2 | | | |

- dans la chaîne de l' ^{238}U , quatre radionucléides ont été détectés dans presque tous les échantillons : le thorium 234 (^{234}Th), le radium 226 (^{226}Ra), le plomb 214 (^{214}Pb) et le plomb 210 (^{210}Pb) ; les limites de détection moyennes du protactinium 234m ($^{234\text{m}}\text{Pa}$) sont données à titre indicatif ; les valeurs des incertitudes liées à ces analyses (10 à 20 Bq.kg $^{-1}$ pour ^{234}Th , ^{226}Ra et ^{210}Pb et 5 Bq.kg $^{-1}$ pour ^{214}Pb) ne permettent toutefois pas de conclure sur un éventuel déséquilibre de la chaîne. Notons cependant que, comme attendu, les valeurs les plus élevées en ^{210}Pb sont mesurées dans les sédiments des niveaux supérieurs (cf. Section : *Rappel sur l'origine des radionucléides artificiels et naturels*) ; les activités mesurées dans les sables de plage sont comprises entre 4 et 8 Bq.kg $^{-1}$.
- dans la chaîne de l' ^{235}U , aucun radionucléide n'a pu être détecté ; les limites de détection moyennes en uranium 235 (^{235}U), protactinium 231 (^{231}Pa) et thorium 227 (^{227}Th) sont données à titre indicatif ; elles sont compatibles avec les activités en ^{235}U estimées à partir des activités en ^{238}U (rapport d'activité $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 21,5$).

Il ressort de cette première analyse des données que :

- le choix des stations de référence (Fier d'Ars et niveaux 4-6 m de la station 14) est pertinent ;
- les activités mesurées dans les sables de plage donnent accès aux activités des radionucléides qui pourraient être contenus dans la fraction sableuse (peu abondante) des sédiments à draguer et qui seraient de l'ordre de 5 Bq.kg $^{-1}$ sec pour les chaînes du ^{232}Th et de l' ^{238}U ;
- les activités mesurées dans les sédiments à draguer ne sont pas significativement différentes de celles mesurées dans les sédiments des stations de référence ;
- il existe de façon sporadique des stocks sédimentaires marqués par des rejets industriels.

Activités des radionucléides mesurées dans quelques fractions granulométriques extraites des sédiments étudiés

Le tableau 5 donne les concentrations en Al, K et Th mesurées par ICPMS dans 4 fractions granulométriques (< 63, 63-200, 200-1000 et 1000-2000 μm) extraites des sédiments des stations 9, 14 et 22, Min1 (campagne de mars 2009) et du Fier d'Ars. Les concentrations en K (exprimées en %) et Th (exprimées en ppm) ont permis de calculer les activités spécifiques équivalentes en ^{40}K et ^{232}Th pour faciliter la comparaison avec les activités mesurées sur le sédiment total.

Comme les sédiments analysés sont majoritairement constitués de particules fines (taille inférieure à 63 μm), les concentrations en ^{40}K attendues dans la fraction inférieure à 63 μm doivent être supérieures ou égales à celles mesurées dans le sédiment total. La comparaison entre ces deux séries de données obtenues par spectrométrie gamma et par ICPMS (Fig. 8) montre une très nette sous-estimation des activités dérivées des analyses par ICPMS et conduit à les invalider. Elle est probablement due à la minéralisation incomplète du sédiment ou un problème purement métrologique (SUBATECH, communication personnelle) qui conduisent à invalider également les teneurs en aluminium.

La comparaison entre les activités du ^{232}Th dérivées des analyses réalisées par ICPMS sur la fraction inférieure à 63 μm des sédiments en fonction des activités de l' ^{228}Ac mesurées par spectrométrie gamma dans le sédiment total semble plus cohérente (Fig. 9) et autorise une analyse plus fine de la

répartition de cet élément dans les différentes fractions granulométriques. La figure 10 montre l'évolution des concentrations du Th en fonction du grain moyen des 4 fractions granulométriques extraites, aux stations 9, 14, 22, Min1 et Fier d'Ars. Eu égard aux doutes déjà évoqués sur cette série d'analyses par ICPMS, la prudence s'impose sur leur interprétation. Comme attendu, les activités en ^{232}Th diminuent quand la taille des grains augmente ; la concentration dans la fraction la plus grossière (1-2 mm) est généralement moins de 10 fois inférieure, voire peu différente, de celle mesurée dans la fraction inférieure à 63 μm . Même si l'extraction des fractions les plus grossières n'a pas été idéale (présence de particules fines adhérant sur les grains sédimentaires), ces données conduisent à envisager la présence de thorium dans ces fractions, soit sous forme adsorbée à la surface des particules, soit dans la matrice de minéraux tels les zircons ou les monazites ($< 10 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$).

Tableau 5. Concentrations en Al, K et Th mesurées par ICPMS dans 4 fractions granulométriques extraites des sédiments des stations 9, 14 et 22, Min1 (campagne de mars 2009) et du Fier d'Ars ; activités massiques équivalentes en ^{40}K et ^{232}Th , exprimées en $\text{Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$; les valeurs d'Al et K ont été invalidées (cf. texte).

| STA | Niv.sup (m) | Niv.inf (m) | Fraction (μm) | Al (%) | K (%) | Th (ppm) | ^{40}K (Bq/kg) | ^{232}Th (Bq/kg) |
|------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------------------|------------------------------|
| 9 | 0 | 1 | < 63 | $1,535 \pm 0,097$ | $0,529 \pm 0,028$ | $14,6 \pm 0,5$ | 148 ± 8 | $59,0 \pm 2,2$ |
| | | | 63 - 200 | <0,111 | $0,045 \pm 0,003$ | $2,7 \pm 0,1$ | 13 ± 1 | $10,8 \pm 0,4$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,007 \pm 0,000$ | $0,036 \pm 0,003$ | $2,1 \pm 0,1$ | 10 ± 1 | $8,6 \pm 0,5$ |
| | | | 1000 - 2000 | $0,157 \pm 0,007$ | $0,127 \pm 0,007$ | $2,2 \pm 0,1$ | 35 ± 2 | $9,1 \pm 0,4$ |
| 9 | 1 | 2 | < 63 | $0,892 \pm 0,039$ | $0,316 \pm 0,023$ | $11,1 \pm 0,3$ | 88 ± 6 | $44,7 \pm 1,3$ |
| | | | 63 - 200 | $0,131 \pm 0,013$ | $0,043 \pm 0,003$ | $2,6 \pm 0,1$ | 12 ± 1 | $10,7 \pm 0,4$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,510 \pm 0,024$ | $0,317 \pm 0,020$ | $2,4 \pm 0,1$ | 88 ± 5 | $9,8 \pm 0,4$ |
| | | | 1000 - 2000 | $0,002 \pm 0,000$ | <0,019 | <1,0 | <5 | <4,0 |
| 9 | 2 | 3 | < 63 | $0,509 \pm 0,025$ | $0,161 \pm 0,007$ | $5,2 \pm 0,2$ | 45 ± 2 | $21,0 \pm 0,7$ |
| | | | 63 - 200 | $0,173 \pm 0,013$ | $0,044 \pm 0,003$ | $2,5 \pm 0,1$ | 12 ± 1 | $10,0 \pm 0,5$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,013 \pm 0,001$ | $0,130 \pm 0,009$ | $2,0 \pm 0,1$ | 36 ± 2 | $8,1 \pm 0,4$ |
| | | | 1000 - 2000 | $0,008 \pm 0,000$ | $0,022 \pm 0,003$ | <0,9 | 6 ± 1 | <3,7 |
| 14 | 3 | 4 | < 63 | $0,452 \pm 0,017$ | $0,150 \pm 0,016$ | $6,0 \pm 0,2$ | 42 ± 4 | $24,1 \pm 0,8$ |
| | | | 63 - 200 | $0,146 \pm 0,014$ | $0,048 \pm 0,004$ | $2,7 \pm 0,1$ | 13 ± 1 | $11,1 \pm 0,5$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,016 \pm 0,001$ | $0,072 \pm 0,005$ | $2,3 \pm 0,1$ | 20 ± 1 | $9,2 \pm 0,4$ |
| | | | 1000 - 2000 | <0,001 | $0,017 \pm 0,001$ | <0,9 | 5 ± 0 | <3,8 |
| 14 | 4 | 5 | < 63 | $0,776 \pm 0,036$ | $0,309 \pm 0,030$ | $6,7 \pm 0,2$ | 86 ± 8 | $27,2 \pm 0,9$ |
| | | | 63 - 200 | $0,674 \pm 0,029$ | $0,226 \pm 0,024$ | $3,1 \pm 0,1$ | 63 ± 7 | $12,5 \pm 0,5$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,025 \pm 0,002$ | $0,113 \pm 0,006$ | <4,5 | 32 ± 2 | <18,1 |
| | | | 1000 - 2000 | $0,003 \pm 0,000$ | $0,019 \pm 0,001$ | <1,0 | 5 ± 0 | <3,9 |
| 14 | 5 | 6 | < 63 | $0,572 \pm 0,027$ | $0,201 \pm 0,008$ | $7,6 \pm 0,2$ | 56 ± 2 | $30,9 \pm 1,0$ |
| | | | 63 - 200 | $0,181 \pm 0,015$ | $0,043 \pm 0,003$ | $2,5 \pm 0,1$ | 12 ± 1 | $9,9 \pm 0,4$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,123 \pm 0,004$ | $0,059 \pm 0,004$ | $1,8 \pm 0,1$ | 16 ± 1 | $7,1 \pm 0,4$ |
| | | | 1000 - 2000 | <0,118 | $0,024 \pm 0,001$ | <1,0 | 7 ± 0 | <4,0 |
| 22 | 0 | 1 | < 63 | $0,789 \pm 0,027$ | $0,199 \pm 0,008$ | $22,5 \pm 0,7$ | 55 ± 2 | $91,1 \pm 2,9$ |
| | | | 63 - 200 | <0,113 | $0,035 \pm 0,003$ | $4,6 \pm 0,2$ | 10 ± 1 | $18,7 \pm 0,6$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,010 \pm 0,000$ | <0,018 | $2,7 \pm 0,1$ | <5 | $10,9 \pm 0,5$ |
| | | | 1000 - 2000 | $0,023 \pm 0,001$ | <0,019 | <1,0 | <5 | <4,0 |
| 22 | 1 | 2 | < 63 | $1,051 \pm 0,052$ | $0,363 \pm 0,021$ | $17,5 \pm 0,5$ | 101 ± 6 | $70,9 \pm 2,2$ |
| | | | 63 - 200 | $0,113 \pm 0,014$ | $0,036 \pm 0,004$ | $2,5 \pm 0,1$ | 10 ± 1 | $10,3 \pm 0,5$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,160 \pm 0,016$ | $0,116 \pm 0,008$ | $3,0 \pm 0,1$ | 32 ± 2 | $12,1 \pm 0,5$ |
| | | | 1000 - 2000 | $0,007 \pm 0,000$ | $0,005 \pm 0,000$ | <0,9 | 1 ± 0 | <3,8 |
| 22 | 2 | 3 | < 63 | $0,487 \pm 0,030$ | $0,189 \pm 0,024$ | $6,5 \pm 0,2$ | 53 ± 7 | $26,2 \pm 0,8$ |
| | | | 63 - 200 | $0,168 \pm 0,015$ | $0,056 \pm 0,004$ | $2,7 \pm 0,1$ | 16 ± 1 | $10,8 \pm 0,5$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,001 \pm 0,000$ | $0,096 \pm 0,013$ | $2,8 \pm 0,1$ | 27 ± 3 | $11,4 \pm 0,5$ |
| | | | 1000 - 2000 | $0,001 \pm 0,000$ | $0,007 \pm 0,000$ | <1,0 | 2 ± 0 | <3,9 |
| Min1 | 0 | 0,2 | < 63 | $1,101 \pm 0,039$ | $0,294 \pm 0,016$ | $31,3 \pm 1,0$ | 82 ± 4 | $126,7 \pm 3,9$ |
| | | | 63 - 200 | $0,307 \pm 0,022$ | $0,097 \pm 0,004$ | $16,7 \pm 0,4$ | 27 ± 1 | $67,7 \pm 1,8$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,051 \pm 0,003$ | $0,162 \pm 0,009$ | $24,6 \pm 0,8$ | 45 ± 2 | $99,6 \pm 3,1$ |
| | | | 1000 - 2000 | | | | | |
| FA1 | 0 | 1 | < 63 | $0,828 \pm 0,039$ | $0,316 \pm 0,026$ | $6,8 \pm 0,2$ | 88 ± 7 | $27,4 \pm 0,9$ |
| | | | 63 - 200 | $0,135 \pm 0,016$ | $0,055 \pm 0,004$ | $2,5 \pm 0,1$ | 15 ± 1 | $10,2 \pm 0,4$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,366 \pm 0,026$ | $0,181 \pm 0,017$ | $4,0 \pm 0,1$ | 50 ± 5 | $16,1 \pm 0,5$ |
| | | | 1000 - 2000 | $0,024 \pm 0,001$ | $0,014 \pm 0,001$ | <1,0 | 4 ± 0 | <4,0 |
| FA2 | 0 | 1 | < 63 | $1,041 \pm 0,040$ | $0,414 \pm 0,022$ | $8,4 \pm 0,3$ | 116 ± 6 | $33,9 \pm 1,1$ |
| | | | 63 - 200 | $0,162 \pm 0,016$ | $0,048 \pm 0,005$ | $2,6 \pm 0,1$ | 13 ± 1 | $10,4 \pm 0,4$ |
| | | | 200 - 1000 | $0,324 \pm 0,024$ | $0,206 \pm 0,008$ | $3,2 \pm 0,2$ | 57 ± 2 | $13,0 \pm 0,6$ |
| | | | 1000 - 2000 | $0,024 \pm 0,001$ | $0,116 \pm 0,010$ | $3,4 \pm 0,3$ | 32 ± 3 | $13,9 \pm 1,3$ |

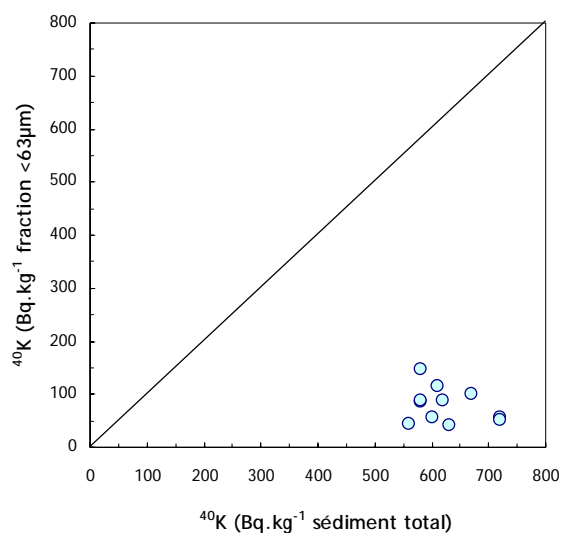


Figure 8. Activités massiques en ^{40}K dérivées des analyses réalisées par ICPMS sur la fraction inférieure à 63 µm des sédiments en fonction des activités massiques mesurées par spectrométrie gamma dans le sédiment total.

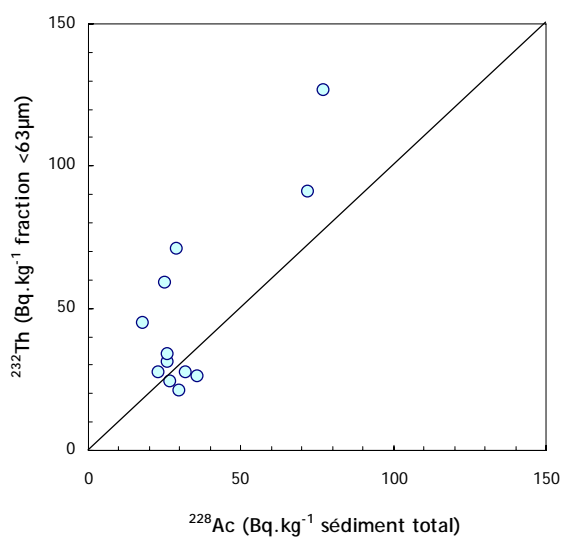


Figure 9. Activités massiques en ^{232}Th dérivées des analyses réalisées par ICPMS sur la fraction inférieure à 63 µm des sédiments en fonction des activités massiques en ^{232}Th mesurées par spectrométrie gamma dans le sédiment total.

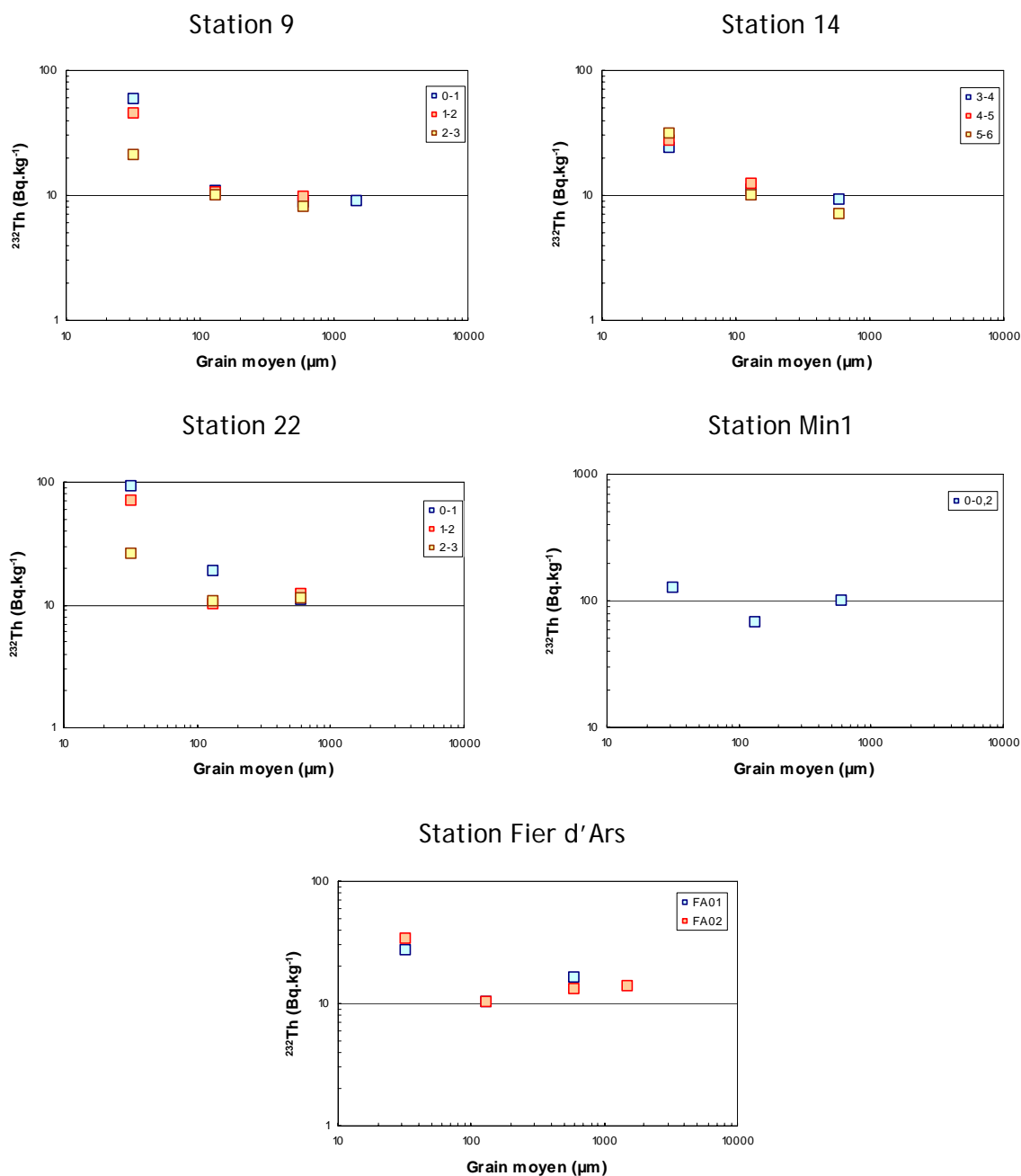


Figure 10. Activités massiques en ²³²Th dans 4 fractions granulométriques aux stations 9, 14, 22, Min1 et Fier d'Ars ; les légendes font référence aux niveaux et sont exprimées en mètres ; l'axe des ordonnées est différent pour la station Min1.

3.1.3 ACTIVITES RETENUES POUR LES CALCULS

L'évaluation dosimétrique suppose de déterminer les activités de tous les radionucléides présents dans les sédiments. Pour ceux qui n'ont pas été mesurés dans les chaînes naturelles du ^{232}Th , de ^{238}U et de ^{235}U , certaines hypothèses permettent d'estimer les données manquantes.

Chaîne naturelle du ^{232}Th

Trois radionucléides sur les 11 de cette chaîne ont été mesurés. Le ^{232}Th n'a pas été mesuré sur les mêmes échantillons que ceux analysés par spectrométrie gamma ; les mesures disponibles ne permettent pas de mettre en évidence un déséquilibre dans cette chaîne naturelle (Fig. 11). On retient donc comme activité des radionucléides de l'ensemble de la chaîne, l'activité moyenne des 3 radionucléides mesurés, soit $31 \pm 11 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$, en y appliquant les rapports d'embranchement adéquats (Tab. 6), soit 0,36 et 0,64, pour ^{208}Tl et ^{212}Po , respectivement.

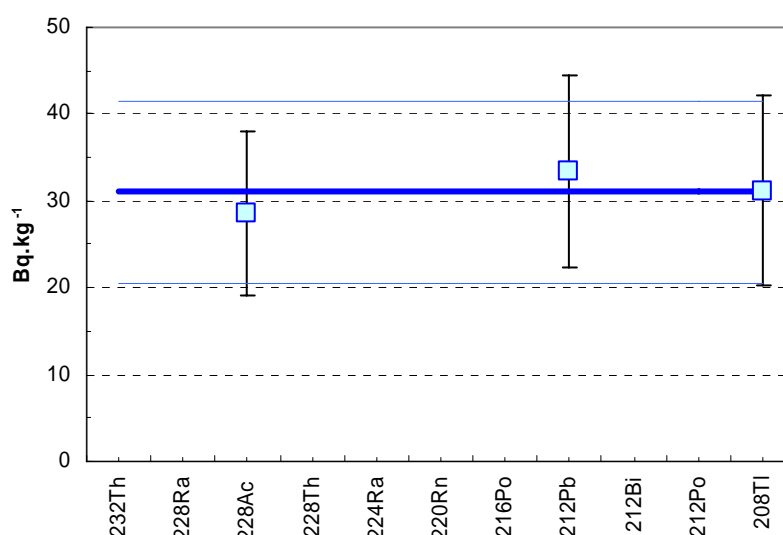


Figure 11. Activités moyennes mesurées dans les sédiments à draguer et écarts-types sur ces activités pour 3 radionucléides de la chaîne du ^{232}Th ; valeur moyenne (trait plein) et valeurs minimales et maximales (trait fin) retenues pour l'activité de la chaîne : $31 \pm 11 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$; l'activité du ^{208}Tl a été corrigée de son rapport d'embranchement (0,36) pour que son activité puisse être comparée avec celles des autres radionucléides de la chaîne.

Chaîne naturelle de ^{238}U

Quatre radionucléides sur les 15 de cette chaîne ont été mesurés. L' ^{238}U n'a pas été mesuré par spectrométrie gamma ; les mesures disponibles ne permettent pas de mettre en évidence un déséquilibre dans cette chaîne naturelle (Fig. 12) eu égard aux réserves apportées sur la métrologie. On retient donc comme activité des radionucléides de l'ensemble de la chaîne, l'activité moyenne des 4 radionucléides mesurés, soit $29 \pm 10 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$, en y appliquant les rapports d'embranchement adéquats (Tab. 6), soit $1,6 \cdot 10^{-3}$ pour ^{234}Pa .

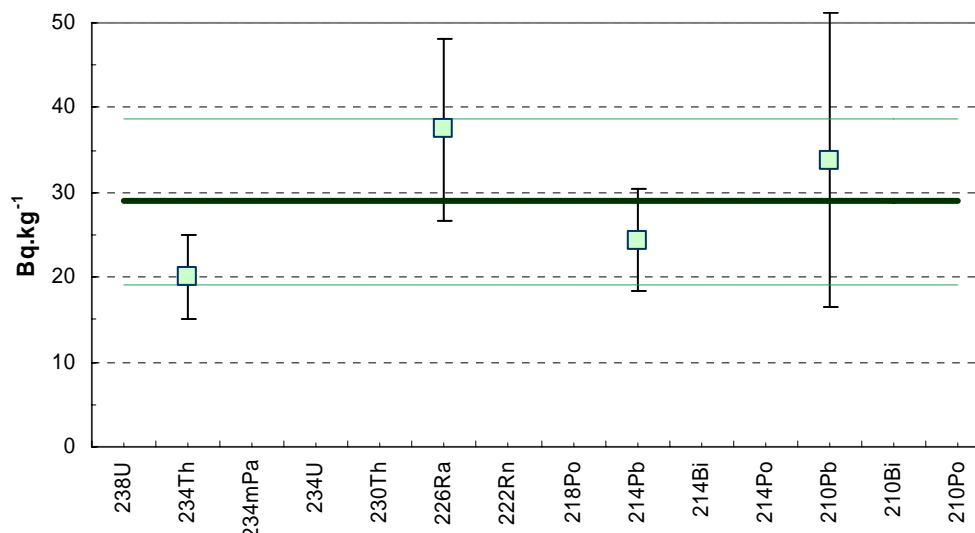


Figure 12. Activités moyennes mesurées dans les sédiments à draguer et écarts-types sur ces activités pour 4 radionucléides de la chaîne de l' ^{238}U ; valeur moyenne (trait plein) et valeurs minimales et maximales (trait fin) retenues pour l'activité de la chaîne : $29 \pm 10 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec.}$

Chaîne naturelle de ^{235}U

Aucun radionucléide sur les 13 de cette chaîne n'a pu être mesuré. On retient donc comme activité des radionucléides de l'ensemble de la chaîne, l'activité moyenne de la chaîne de ^{238}U , corrigée du rapport naturel d'activité entre ces deux radionucléides (rapport d'activité $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 21,5$), soit $1,35 \pm 0,45 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ sec.}$ en y appliquant les rapports d'embranchement adéquats (Tab. 6), soit 0,014, 0,996 et 0,003 pour ^{223}Fr , ^{207}Tl et ^{211}Po , respectivement.

Les activités dans les sédiments exprimées en $\text{Bq.kg}^{-1} \text{ sec}$ ont permis de calculer les activités en Bq.kg^{-1} humide en retenant une teneur en eau (rapport masse d'eau/masse de sédiment humide) de 50 %, valeurs pertinentes pour l'évaluation de l'impact radiologique sur les travailleurs [4].

Tableau 6. Activités retenues dans les sédiments pour l'évaluation dosimétrique, exprimées en $\text{Bq.kg}^{-1} \text{ sec.}$

| Série du ^{232}Th | | Série de l' ^{238}U | | Série de l' ^{235}U | | Autres | |
|----------------------------|------|------------------------------|------|------------------------------|-------|-------------------|-----|
| ^{232}Th | 31,0 | ^{238}U | 28,9 | ^{235}U | 1,35 | ^{40}K | 616 |
| ^{228}Ra | 31,0 | ^{234}Th | 28,9 | ^{231}Th | 1,35 | ^{137}Cs | 2,8 |
| ^{228}Ac | 31,0 | $^{234\text{m}}\text{Pa}$ | 28,9 | ^{231}Pa | 1,35 | | |
| ^{228}Th | 31,0 | ^{234}Pa | 0,05 | ^{227}Ac | 1,35 | | |
| ^{224}Ra | 31,0 | ^{234}U | 28,9 | ^{223}Fr | 0,02 | | |
| ^{220}Rn | 31,0 | ^{230}Th | 28,9 | ^{227}Th | 1,33 | | |
| ^{216}Po | 31,0 | ^{226}Ra | 28,9 | ^{223}Ra | 1,35 | | |
| ^{212}Pb | 31,0 | ^{222}Rn | 28,9 | ^{219}Rn | 1,35 | | |
| ^{212}Bi | 31,0 | ^{218}Po | 28,9 | ^{215}Po | 1,35 | | |
| ^{212}Po | 19,9 | ^{214}Pb | 28,9 | ^{211}Pb | 1,35 | | |
| ^{208}Tl | 11,2 | ^{214}Bi | 28,9 | ^{211}Bi | 1,35 | | |
| | | ^{214}Po | 28,9 | ^{207}Tl | 1,34 | | |
| | | ^{210}Pb | 28,9 | ^{211}Po | 0,004 | | |
| | | ^{210}Bi | 28,9 | | | | |
| | | ^{210}Po | 28,9 | | | | |

3.1.4 COMPARAISON DES ACTIVITES RETENUES AVEC LES ACTIVITES MESUREES AUX STATIONS DE REFERENCE ET SUR LES PLAGES.

Les figures 13 et 14 permettent de comparer les activités retenues pour les radionucléides des séries du ^{232}Th et de l' ^{238}U , avec celles qui ont été mesurées dans les sédiments de la station de référence du Fier d'Ars et dans les niveaux situés entre 4 et 6 m de profondeur à la station 14, considérés comme exempts de toute influence industrielle locale. Les figures illustrent le bien-fondé du choix de ces stations de référence.

Les sédiments sableux des plages ne sont pas complètement dépourvus de radionucléides naturels : les activités qui y sont mesurées sont très inférieures à celles mesurées dans les sédiments fins du Port des Minimes et des stations de référence ; elles sont probablement dues à la présence de minéraux lourds porteurs de thorium ou d'uranium, tels les zircons ou les monazites.

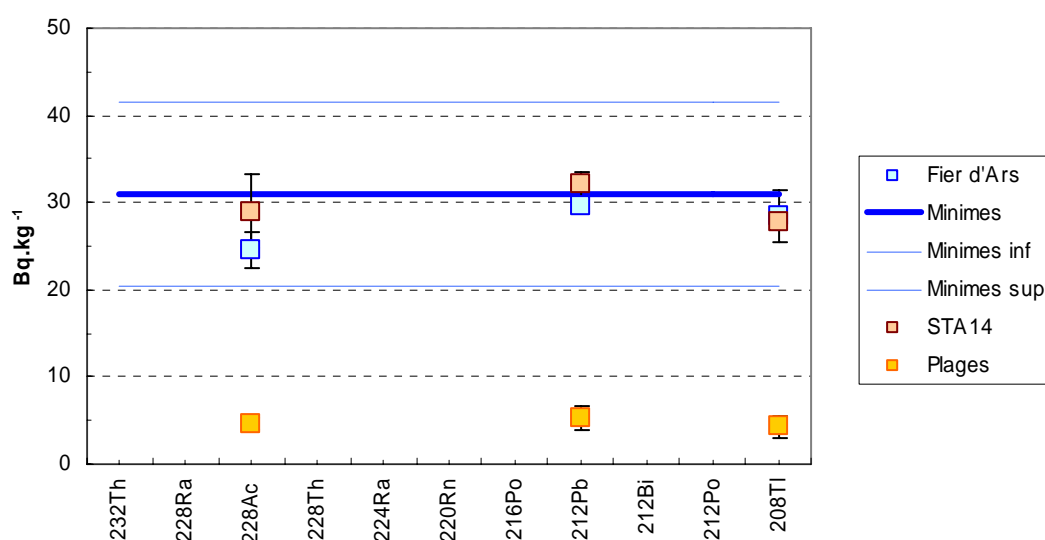


Figure 13. Activité moyenne retenue pour les radionucléides de la chaîne du ^{232}Th dans les sédiments à draguer et activités mesurées aux stations de référence et sur les plages ; l'activité du ^{208}Tl a été corrigée de son rapport d'embranchement (0,36) pour que son activité puisse être comparée avec celles des autres radionucléides de la chaîne.

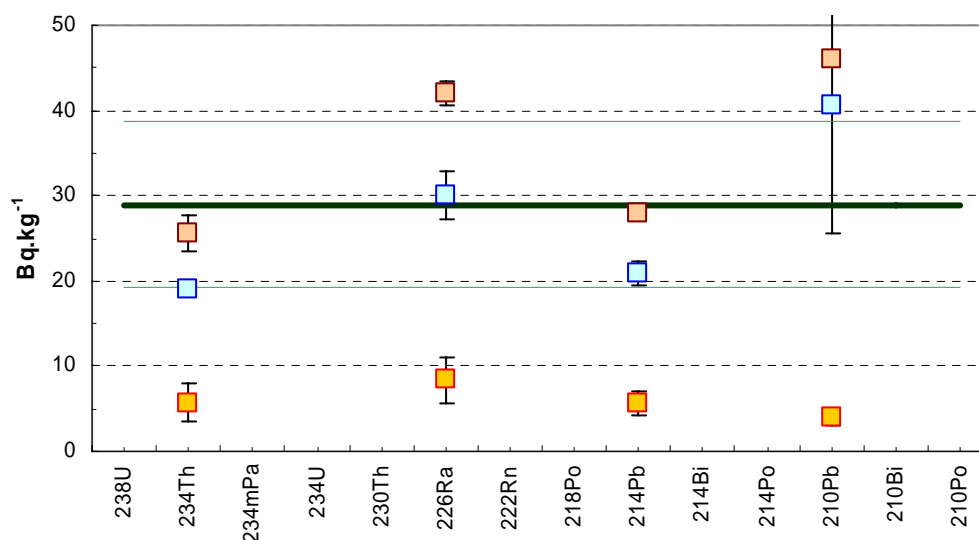


Figure 14. Activité moyenne retenue pour les radionucléides de la chaîne de l' ^{238}U dans les sédiments à draguer et activités mesurées aux stations de référence et sur les plages.

3.2 CONCENTRATIONS DES RADIONUCLÉIDES DANS L'EAU ET LES PRODUITS DE LA MER

Comme aucune mesure de radioactivité n'a été réalisée sur les produits de la mer, les activités dans les espèces consommées sont estimées à partir des activités dans les sédiments. La démarche et les résultats sont présentés ci-dessous.

La méthode repose sur l'utilisation du concept de Kd ou coefficient de distribution, qui permet de déduire la concentration de l'eau de mer en radionucléides à partir de celle des sédiments sous l'hypothèse d'équilibre comme suit :

$$Kd = \frac{A_s}{A_e}$$

où A_s et A_e font respectivement référence à l'activité du radionucléide dans le sédiment et dans l'eau, exprimée en Bq.kg⁻¹ sec et Bq.L⁻¹.

De même, le facteur de concentration, FC, défini comme le rapport entre l'activité du radionucléide dans l'espèce vivante, A_v , exprimée en Bq.kg⁻¹ frais, et son activité dans l'eau, exprimée en Bq.L⁻¹ :

$$FC = \frac{A_v}{A_e}$$

permet de déduire l'activité dans les espèces vivantes à partir de l'activité dans l'eau.

Les valeurs des Kd et des FC peuvent être extraites de différents documents de référence [8] ; le tableau 7 présente les valeurs de Kd et de FC utilisées pour les calculs. Cette méthode de calcul a été appliquée pour tous les radionucléides sauf le ⁴⁰K pour lequel l'activité dans l'eau de mer et les espèces marines est constante et connue (Tab. 8).

Tableau 7. Coefficients de distribution (Kd en L.kg⁻¹ sec) et facteurs de concentration (FC en L.kg⁻¹ frais) retenues pour le calcul des concentrations dans l'eau de mer et dans la fraction consommable des espèces marines (*i.e.* muscles pour les poissons et tissus mous pour crustacés et mollusques) [8].

| Elément | Kd | FC (partie consommable) | | |
|---------|----------|-------------------------|------------|----------|
| | | Crustacés | Mollusques | Poissons |
| Ac | 2,00E+06 | 1,00E+03 | 1,00E+03 | 5,00E+01 |
| Bi | 2,00E+03 | 1,00E+03 | 1,00E+03 | 1,50E+01 |
| Cs | 4,00E+03 | 5,00E+01 | 6,00E+01 | 1,00E+02 |
| Fr | 4,00E+03 | 5,00E+01 | 6,00E+01 | 1,00E+02 |
| Pa | 5,00E+06 | 1,00E+01 | 5,00E+02 | 5,00E+01 |
| Pb | 1,00E+05 | 9,00E+04 | 5,00E+04 | 2,00E+02 |
| Po | 2,00E+07 | 2,00E+04 | 2,00E+04 | 2,00E+03 |
| Ra | 2,00E+03 | 1,00E+02 | 1,00E+02 | 1,00E+02 |
| Rn | 8,00E-01 | 8,00E-01 | 8,00E-01 | 8,00E-01 |
| Th | 3,00E+06 | 1,00E+03 | 1,00E+03 | 6,00E+02 |
| Tl | 2,00E+04 | 1,00E+03 | 6,00E+03 | 5,00E+03 |
| U | 1,00E+03 | 1,00E+01 | 3,00E+01 | 1,00E+00 |

L'activité dans l'eau de mer (eau filtrée) a été calculée comme suit :

$$A_e = \frac{A_s \times m_{ajoutée}}{1 + Kd \times m_{totale}}$$

où A_e et A_s font respectivement référence à l'activité du radionucléide dans l'eau filtrée et dans le sédiment, exprimée en $Bq.L^{-1}$ et $Bq.kg^{-1}$ sec, $m_{ajoutée}$ est la charge de matières en suspension ajoutée dans l'eau de mer par les opérations de clapage en $kg.L^{-1}$ et m_{totale} est la charge totale de matières en suspension dans l'eau de mer en $kg.L^{-1}$. La valeur de la charge ajoutée ($5 mg.L^{-1}$) correspond à la concentration maximale de matières en suspension simulées pour la zone « Frayères Nord » [9]. La charge totale en suspension dans l'eau de mer retenue pour les calculs ($100 mg.L^{-1}$) est déduite du document cité en référence [1] qui précise que « *la turbidité observée dans les Pertuis est directement soumise aux influences de ces fleuves, et dépasse généralement les 500 mg/l pour atteindre des valeurs supérieures au gramme, voire de 1 à 4 g/l (dans les estuaires), et inférieure à 100 mg/l au niveau des seuils des Pertuis* ». Les activités dans l'eau de mer ainsi calculées sont données dans le tableau 8.

En plus de l'activité calculée à partir du facteur de concentration par rapport à l'eau de mer, il a été ajouté, pour les seuls mollusques, une activité liée à la présence de particules sédimentaires qui sont ingérées avec la chair de l'animal par le consommateur.

En effet, les mollusques marins bivalves sont des filtreurs ou suspensivores qui se nourrissent des suspensions ou des dépôts sédimentaires. Ils filtrent l'eau de mer pour se nourrir en triant par divers mécanismes la partie "consommable", essentiellement le phytoplancton, de la partie "non consommable", essentiellement les particules minérales du seston. Les particules, inorganiques et organiques, qui sont triées par les branchies ou les siphons, sont rejetées sous forme de pseudo-fèces. Les particules qui transitent par le système digestif sont rejetées sous forme de fèces.

Il est admis que les bivalves compensent activement les grandes variations naturelles de la composition du seston en qualité et quantité par des mécanismes physiologiques de tri pré- et post- ingestifs. En conséquence, le taux d'épuration du seston peut varier de plusieurs ordres de grandeur en fonction de la qualité du seston, des paramètres du milieu, en particulier la température, mais aussi du cycle de reproduction et des besoins énergétiques des mollusques. La taille des particules retenues est de l'ordre de quelques micromètres. Cependant, certains mollusques comme les coquilles Saint-Jacques ou les mollusques fouisseurs (coques, palourdes) peuvent contenir, en plus des pseudo-fèces, des particules dans l'espace intervalvaire, pour des tailles de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres. Le consommateur peut donc être conduit par le biais de la consommation des mollusques à ingérer des particules minérales si les mollusques n'ont pas été épurés en bassin de quarantaine. La masse de ces particules a été estimée à 1% de la masse totale de la chair consommée. En tenant compte du rapport entre la charge ajoutée et la charge totale en suspension dans l'eau de mer, une masse de 0,5 g de sédiments marqués dans un kilogramme frais de chair consommée a été retenue.

Les activités dans les trois groupes d'espèces marines consommées sont données dans le tableau 8.

Tableau 8. Activités massiques retenues dans l'eau de mer (en Bq.L⁻¹) et les produits de la mer (en Bq.kg⁻¹ frais de muscles pour les poissons et de tissus mous pour les crustacés et les mollusques).

| Radionucléide | Activité massique | | | |
|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Eau | Crustacés | Mollusques | Poissons |
| ⁴⁰ K | 1,2.10 ¹ | 1,3.10 ² | 1,3.10 ² | 1,3.10 ² |
| ¹³⁷ Cs | 1,0.10 ⁻⁵ | 5,0.10 ⁻⁴ | 2,0.10 ⁻³ | 1,0.10 ⁻³ |
| ²³² Th | 5,2.10 ⁻⁷ | 5,2.10 ⁻⁴ | 1,6.10 ⁻² | 3,1.10 ⁻⁴ |
| ²²⁸ Ra | 1,3.10 ⁻⁴ | 1,3.10 ⁻² | 2,8.10 ⁻² | 1,3.10 ⁻² |
| ²²⁸ Ac | 7,7.10 ⁻⁷ | 7,7.10 ⁻⁴ | 1,6.10 ⁻² | 3,9.10 ⁻⁵ |
| ²²⁸ Th | 5,2.10 ⁻⁷ | 5,2.10 ⁻⁴ | 1,6.10 ⁻² | 3,1.10 ⁻⁴ |
| ²²⁴ Ra | 1,3.10 ⁻⁴ | 1,3.10 ⁻² | 2,8.10 ⁻² | 1,3.10 ⁻² |
| ²²⁰ Rn | 1,6.10 ⁻⁴ | 1,2.10 ⁻⁴ | 1,6.10 ⁻² | 1,2.10 ⁻⁴ |
| ²¹⁶ Po | 7,8.10 ⁻⁸ | 1,6.10 ⁻³ | 1,7.10 ⁻² | 1,6.10 ⁻⁴ |
| ²¹² Pb | 1,4.10 ⁻⁵ | 1,3 | 7,2.10 ⁻¹ | 2,8.10 ⁻³ |
| ²¹² Bi | 1,3.10 ⁻⁴ | 1,3.10 ⁻¹ | 1,4.10 ⁻¹ | 1,9.10 ⁻³ |
| ²¹² Po | 5,0.10 ⁻⁸ | 9,9.10 ⁻⁴ | 1,1.10 ⁻² | 9,9.10 ⁻⁵ |
| ²⁰⁸ Tl | 1,9.10 ⁻⁵ | 1,9.10 ⁻² | 1,2.10 ⁻¹ | 9,3.10 ⁻² |
| ²³⁸ U | 1,3.10 ⁻⁴ | 1,3.10 ⁻³ | 1,8.10 ⁻² | 1,3.10 ⁻⁴ |
| ²³⁴ Th | 4,8.10 ⁻⁷ | 4,8.10 ⁻⁴ | 1,5.10 ⁻² | 2,9.10 ⁻⁴ |
| ^{234m} Pa | 2,4.10 ⁻⁵ | 2,4.10 ⁻⁴ | 2,7.10 ⁻² | 1,2.10 ⁻³ |
| ²³⁴ Pa | 4,6.10 ⁻¹⁰ | 4,6.10 ⁻⁹ | 2,3.10 ⁻⁵ | 2,3.10 ⁻⁸ |
| ²³⁴ U | 1,3.10 ⁻⁴ | 1,3.10 ⁻³ | 1,8.10 ⁻² | 1,3.10 ⁻⁴ |
| ²³⁰ Th | 4,8.10 ⁻⁷ | 4,8.10 ⁻⁴ | 1,5.10 ⁻² | 2,9.10 ⁻⁴ |
| ²²⁶ Ra | 1,2.10 ⁻⁴ | 1,2.10 ⁻² | 2,7.10 ⁻² | 1,2.10 ⁻² |
| ²²² Rn | 1,4.10 ⁻⁴ | 1,2.10 ⁻⁴ | 1,5.10 ⁻² | 1,2.10 ⁻⁴ |
| ²¹⁸ Po | 7,2.10 ⁻⁸ | 1,4.10 ⁻³ | 1,6.10 ⁻² | 1,4.10 ⁻⁴ |
| ²¹⁴ Pb | 1,3.10 ⁻⁵ | 1,2 | 6,7.10 ⁻¹ | 2,6.10 ⁻³ |
| ²¹⁴ Bi | 1,2.10 ⁻⁴ | 1,2.10 ⁻¹ | 1,4.10 ⁻¹ | 1,8.10 ⁻³ |
| ²¹⁴ Po | 7,2.10 ⁻⁸ | 1,4.10 ⁻³ | 1,6.10 ⁻² | 1,4.10 ⁻⁴ |
| ²¹⁰ Pb | 1,3.10 ⁻⁵ | 1,2 | 6,7.10 ⁻¹ | 2,6.10 ⁻³ |
| ²¹⁰ Bi | 1,2.10 ⁻⁴ | 1,2.10 ⁻¹ | 1,4.10 ⁻¹ | 1,8.10 ⁻³ |
| ²¹⁰ Po | 7,2.10 ⁻⁸ | 1,4.10 ⁻³ | 1,6.10 ⁻² | 1,4.10 ⁻⁴ |
| ²³⁵ U | 6,1.10 ⁻⁶ | 6,1.10 ⁻⁵ | 8,6.10 ⁻⁴ | 6,1.10 ⁻⁶ |
| ²³¹ Th | 2,2.10 ⁻⁸ | 2,2.10 ⁻⁵ | 7,0.10 ⁻⁴ | 1,3.10 ⁻⁵ |
| ²³¹ Pa | 1,3.10 ⁻⁸ | 1,3.10 ⁻⁷ | 6,8.10 ⁻⁴ | 6,7.10 ⁻⁷ |
| ²²⁷ Ac | 3,3.10 ⁻⁸ | 3,3.10 ⁻⁵ | 7,1.10 ⁻⁴ | 1,7.10 ⁻⁶ |
| ²²³ Fr | 6,6.10 ⁻⁸ | 3,3.10 ⁻⁶ | 1,3.10 ⁻⁵ | 6,6.10 ⁻⁶ |
| ²²⁷ Th | 2,2.10 ⁻⁸ | 2,2.10 ⁻⁵ | 6,9.10 ⁻⁴ | 1,3.10 ⁻⁵ |
| ²²³ Ra | 5,6.10 ⁻⁶ | 5,6.10 ⁻⁴ | 1,2.10 ⁻³ | 5,6.10 ⁻⁴ |
| ²¹⁹ Rn | 6,7.10 ⁻⁶ | 5,4.10 ⁻⁶ | 6,8.10 ⁻⁴ | 5,4.10 ⁻⁶ |
| ²¹⁵ Po | 3,4.10 ⁻⁹ | 6,7.10 ⁻⁵ | 7,4.10 ⁻⁴ | 6,7.10 ⁻⁶ |
| ²¹¹ Pb | 6,1.10 ⁻⁷ | 5,5.10 ⁻² | 3,1.10 ⁻² | 1,2.10 ⁻⁴ |
| ²¹¹ Bi | 5,6.10 ⁻⁶ | 5,6.10 ⁻³ | 6,3.10 ⁻³ | 8,4.10 ⁻⁵ |
| ²⁰⁷ Tl | 2,2.10 ⁻⁶ | 2,2.10 ⁻³ | 1,4.10 ⁻² | 1,1.10 ⁻² |
| ²¹¹ Po | 9,2.10 ⁻¹² | 1,8.10 ⁻⁷ | 2,0.10 ⁻⁶ | 1,8.10 ⁻⁸ |

4 IMPACT RADIOLOGIQUE SUR LES TRAVAILLEURS

4.1 POSTES DE TRAVAIL RETENUS

Les différents postes de travail identifiés sont décrits ci-dessous [5].

- Pour la technique mettant en œuvre une pelle sur ponton ou un chaland :
 - o le grutier : il est exposé aux sédiments contenus à la fois dans la barge et dans le godet lors des opérations de chargement,
 - o l'opérateur : il est exposé aux sédiments contenus dans la barge lors des opérations de chargement et de transport,
 - o le conducteur de la barge : il est exposé aux sédiments contenus dans la barge lors des opérations de chargement et de transport,
- Pour la technique du dragage hydraulique, l'opérateur et le conducteur du bateau sont exposés aux sédiments contenus dans le puits lors des opérations de chargement et de transport.

4.2 VOIES D'EXPOSITION

Les voies d'exposition retenues sont l'exposition externe aux sédiments, l'irradiation externe par contamination cutanée des mains et l'ingestion par inadvertance de sédiments sur les mains souillées. L'inhalation de sédiments est jugée négligeable du fait de l'absence de mise en suspension dans l'air des sédiments.

4.2.1 EXPOSITION EXTERNE

L'exposition externe a été modélisée à l'aide du code MICROSHIELD v 5.05 [10], [11]. Les configurations d'exposition retenues ont été définies sur la base des informations présentées au paragraphe 1 [5] et sont présentées sur les figures 15 à 18.

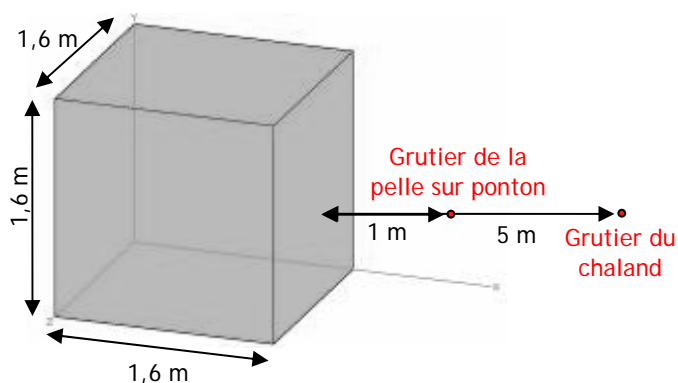


Figure 15. Pelle sur ponton ou chaland ; exposition due au godet.

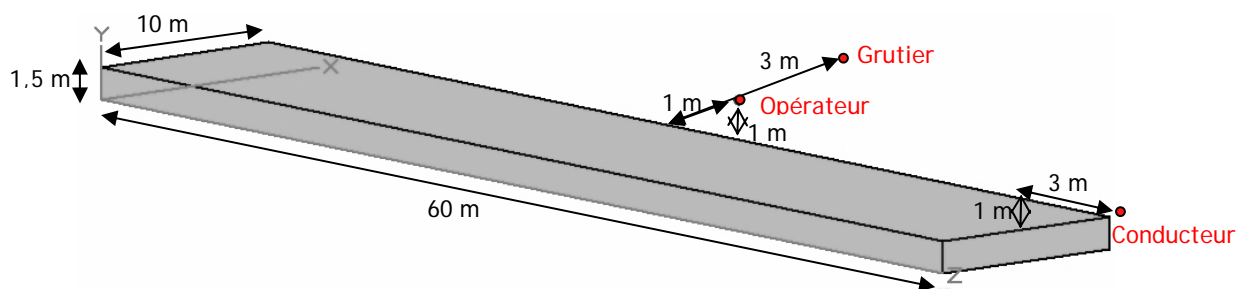


Figure 16 : Pelle sur ponton- Exposition due à la barge

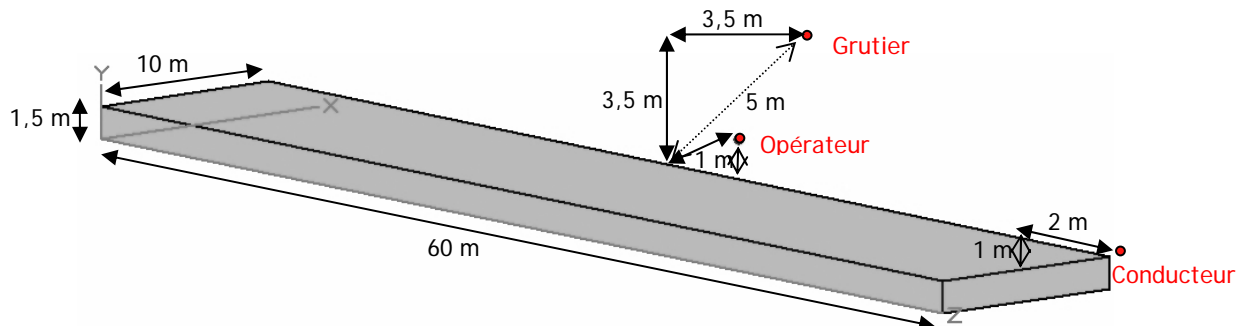


Figure 17 : Chaland - Exposition due à la barge

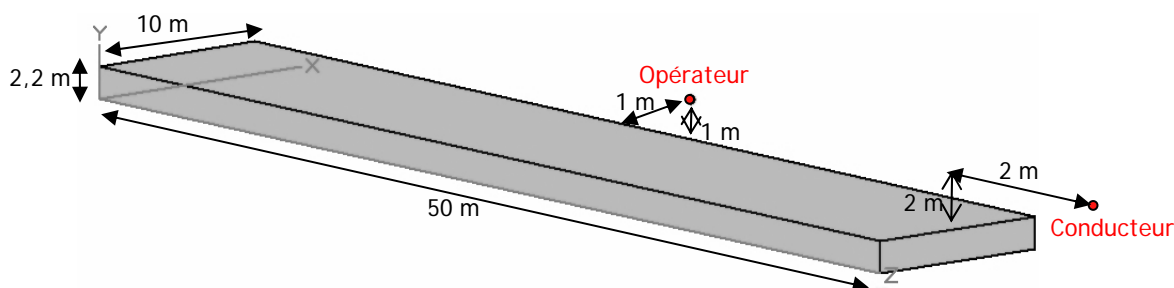


Figure 18. Exposition lors du dragage hydraulique

Une masse volumique de $1,5 \text{ t.m}^{-3}$ [4],[6] a été retenue pour les sédiments humides. Pour les techniques de dragage mettant en œuvre la pelle sur ponton ou le chaland, la barge est supposée être remplie par 100% de sédiments humides. Pour la technique du dragage hydraulique, le puits est supposé être rempli en volume par 50% d'eau et 50% de sédiments humides [5] ; la densité du chargement est alors de $1,25 \text{ t.m}^{-3}$.

Enfin, de manière conservatrice, l'atténuation due aux interactions des rayonnements avec les contenants en acier n'a pas été modélisée.

Le tableau 9 présente les débits de dose ainsi calculés.

Pour la technique de dragage mettant en œuvre une pelle sur ponton, le grutier n'est exposé que lors des opérations de chargement de la barge ; sa durée d'exposition est de 3 h.j^{-1} . L'opérateur ainsi que le conducteur de la barge sont exposés à la fois lors des opérations de chargement et de transport des sédiments ; leur durée d'exposition est alors de 6 h.j^{-1} (cf. § 1.1). Faute de données spécifiques pour la technique de dragage mettant en œuvre le chaland, les mêmes durées d'exposition ont été retenues. Pour la technique de dragage hydraulique, l'opérateur et le conducteur de la barge sont exposés lors des opérations de chargement et de transport des sédiments ; leur durée d'exposition est de 8 h.j^{-1} (cf. § 1.3) Le tableau 9 présente également les doses efficaces calculées dues à l'exposition externe en tenant compte de la durée des opérations de 6 mois et en supposant que les intervenants travaillent 7 jours sur 7.

Tableau 9. Débits de dose et doses efficaces dues à l'exposition externe calculés.

| Technique de dragage | Poste de travail | Source d'exposition | Débit de dose (mSv.h ⁻¹) | | Dose efficace pour les opérations de dragage des sédiments (mSv) |
|----------------------|------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|--|
| Pelle sur ponton | Grutier | Godet | 6,8.10 ⁻⁶ | 1,3.10 ⁻⁵ | 0,007 |
| | | Barge | 5,9.10 ⁻⁶ | | |
| | Opérateur | Barge | 1,1.10 ⁻⁵ | 4,6.10 ⁻⁶ | 0,012 |
| | | Conducteur | 4,6.10 ⁻⁶ | | |
| Chaland | Grutier | Godet | 4,6.10 ⁻⁷ | 7,1.10 ⁻⁶ | 0,004 |
| | | Barge | 6,6.10 ⁻⁶ | | |
| | Opérateur | Barge | 1,1.10 ⁻⁵ | 6,6.10 ⁻⁶ | 0,012 |
| | | Conducteur | 6,6.10 ⁻⁶ | | |
| Dragage hydraulique | Opérateur | Barge | 5,8.10 ⁻⁶ | 3,6.10 ⁻⁶ | 0,008 |
| | Conducteur | Barge | 3,6.10 ⁻⁶ | | |

4.2.2 EXPOSITION INTERNE PAR INGESTION PAR INADVERTANCE

Certains opérateurs sont supposés être en contact direct avec les sédiments lors notamment d'un prélèvement hebdomadaire d'une poignée de sédiments. Une exposition interne par ingestion involontaire de particules marquées déposées sur la main et ensuite portées à la bouche peut avoir lieu. Cette voie d'exposition a été modélisée de la manière suivante [12].

$$\text{Dose}_{\text{ingestion}} = \sum_{\text{RN}} \left(A_{\text{sed-RN}} \times 10^{-6} \times \text{FA}_{\text{sed-peau}} \times S_{\text{main}} \times \text{FT}_{\text{main-bouche}} \times F_{\text{main-bouche}} \times \text{CD}_{\text{RN}} \times t \right)$$

avec

$\text{Dose}_{\text{ingestion}}$: dose efficace reçue par contact main-bouche (Sv)

RN : radionucléide

$A_{\text{sed-RN}}$: activité massique des sédiments humides pour le radionucléide RN (Bq.kg⁻¹ de sédiments humides)

10^{-6} : coefficient de conversion d'unité (kg.mg⁻¹)

$\text{FA}_{\text{sed-peau}}$: facteur d'adhérence sédiments-peau (0,2 mg (de sédiments humides).cm⁻²) [12]

S_{main} : aire de la main en contact avec la surface contaminée (227,75 cm²) [12]

$\text{FT}_{\text{main-bouche}}$: fraction transférée par contact main-bouche (0,1) [12]

$F_{\text{main-bouche}}$: fréquence de contacts main-bouche par heure (2 évt.h⁻¹) [12]

CD_{RN} : coefficient de dose efficace pour l'ingestion pour le radionucléide RN (Sv.Bq⁻¹) [13]

t : temps d'exposition (8 h.j⁻¹ × 1 j.semaine⁻¹ × 26 semaines = 208 h)

La dose efficace par ingestion involontaire de particules marquées déposées sur la main lors des opérations de dragage des sédiments est de 0,00007 mSv. Cette dose est négligeable.

4.2.3 EXPOSITION EXTERNE PAR CONTACT CUTANE

Les opérateurs supposés en contact direct avec les sédiments lors du prélèvement hebdomadaire d'une poignée de sédiments subissent une irradiation externe par contamination cutanée des mains. Celle-ci a été modélisée de la manière suivante.

$$\text{Dose}_{\text{peau-contact}} = \sum_{\text{RN}} \left(A_{\text{sed-RN}} \times 10^{-6} \times \text{FA}_{\text{sed-peau}} \times \text{CD}_{\text{RN}} \times t \right)$$

avec $\text{Dose}_{\text{peau-contact}}$: dose équivalente à la peau de main reçue par contact cutané (Sv)
 RN : radionucléide
 $A_{\text{sed-RN}}$: activité massique des sédiments humides pour le radionucléide RN (Bq.kg⁻¹ de sédiments humides)
 10^{-6} : coefficient de conversion d'unité (kg.mg⁻¹)
 $\text{FA}_{\text{sed-peau}}$: facteur d'adhérence sédiments-peau (0,2 mg (de sédiments humides).cm⁻²) [12]
 CD_{RN} : débit de dose équivalente à la peau pour une contamination de 1 Bq.cm⁻² pour le radionucléide RN (Sv.cm².h⁻¹.Bq⁻¹) [14]
 t : temps d'exposition (8 h.j⁻¹ × 1 j.semaine⁻¹ × 26 semaines = 208 h)

La dose équivalente à la peau de main due à l'irradiation externe par contamination cutanée des mains lors des opérations de dragage des sédiments est de 0,00003 mSv. Cette dose étant tout à fait négligeable, la dose efficace pour le corps entier due à l'irradiation externe par contamination cutanée des mains l'est également.

4.3 RESULTATS

Les doses efficaces calculées pour les différents travailleurs chargés des opérations de dragage sont présentées dans le tableau 10.

Tableau 10. Doses efficaces calculées pour les travailleurs chargés des opérations de dragage.

| Technique de dragage | Poste de travail | Dose efficace pour les opérations de dragage des sédiments (mSv) |
|----------------------|------------------|--|
| Pelle sur ponton | Grutier | 0,007 |
| | Opérateur | 0,012 |
| | Conducteur | 0,005 |
| Chaland | Grutier | 0,004 |
| | Opérateur | 0,012 |
| | Conducteur | 0,007 |
| Dragage hydraulique | Opérateur | 0,008 |
| | Conducteur | 0,005 |

Quel que soit le poste de travail, les résultats montrent que la dose efficace reçue par les différents opérateurs est très faible et représente au maximum environ un centième de la limite de dose pour les travailleurs dits non exposés (1 mSv.an⁻¹) prescrite par le décret n°2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants [15]. La voie d'exposition prépondérante est l'exposition externe aux sédiments ; le ¹³⁷Cs représente moins de 1% de la dose efficace reçue et le ⁴⁰K représente environ 41% de la dose efficace reçue.

Il est souligné que les résultats présentés ci-dessus correspondent à la fois à l'exposition due aux sédiments éventuellement marqués par les rejets de l'usine Rhodia, à l'exposition due la radioactivité naturellement présente dans l'environnement et à celle due aux retombées des essais atmosphériques d'armes et de Tchernobyl.

5 IMPACT RADIOLOGIQUE SUR LA POPULATION

5.1 SCENARIOS D'EXPOSITION

En premier lieu, l'IRSN a estimé l'impact radiologique des sédiments contaminés pour des promeneurs séjournant régulièrement sur ces sédiments avant les travaux de dragage.

En second lieu, l'IRSN a estimé les conséquences radiologiques des travaux envisagés sur deux populations :

- la population générale séjournant périodiquement sur les sédiments avant les opérations de dragage, puis consommant des produits de la mer éventuellement marqués par les opérations de clapage et se baignant dans la mer ;
- des pêcheurs professionnels, « gros consommateurs » de produits de la mer éventuellement marqués par les opérations de clapage.

Les classes d'âge considérées sont celles de la publication 66 de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) [16], à savoir : les enfants de 1 à 2 ans ("enfant de 1 an"), les enfants de 3 à 7 ans ("enfant de 5 ans"), les enfants de 8 à 12 ans ("enfant de 10 ans"), les adolescents de 13 à 17 ans ("adolescent") et les adultes.

5.2 VOIES D'EXPOSITION

D'une manière générale, la population est susceptible d'être exposée selon les voies suivantes :

- l'exposition externe aux sédiments avant les opérations de dragage,
- l'exposition externe par baignade,
- l'exposition interne par ingestion des produits de la mer éventuellement marqués par les opérations de clapage,
- l'exposition interne par ingestion d'eau et de sédiments par inadvertance.

On suppose que la population générale et les pêcheurs sont exposés à l'ingestion par inadvertance.

5.2.1 EXPOSITION EXTERNE

5.2.1.1 Exposition externe aux sédiments avant les opérations de dragage

Pour cette voie d'exposition, les coefficients de dose utilisés sont ceux correspondant à une contamination des sols semi-infinie et extraits de la publication 12 du Federal Guidance [17]. Cette approche est cohérente avec celle recommandée dans le guide méthodologique de gestion des sites industriels potentiellement contaminés par des substances radioactives [18]. L'exposition externe aux sédiments a été modélisée de la manière suivante.

$$\text{Dose}_{\text{externe-sed}} = \sum_{\text{RN}} (A_{\text{sed-RN}} \times Mv_{\text{sed}} \times CD_{\text{RN}} \times t)$$

avec

- $\text{Dose}_{\text{externe-sed}}$: dose efficace due à l'exposition externe des sédiments avant les opérations de dragage (Sv)
- RN : radionucléide
- $A_{\text{sed-RN}}$: activité massique des sédiments humides pour le radionucléide RN (Bq.kg^{-1} de sédiments humides)
- Mv_{sed} : masse volumique des sédiments humides ($1\,500\text{ kg.m}^{-3}$) [4],[6]
- CD_{RN} : coefficient de dose efficace due à l'exposition externe résultant d'une contamination des sols semi-infinie ($\text{Sv}/(\text{Bq.s.m}^{-3})$) [17]
- t : temps d'exposition (180 000 s soit 50 h pour toutes les classes d'âge) [19]

La dose efficace due à l'exposition aux sédiments est de 0,001 mSv.

5.2.1.2 Exposition externe par baignade

Pour cette voie d'exposition, les coefficients de dose utilisés sont extraits de la publication 12 du Federal Guidance [17] et une durée d'exposition par baignade de 2,5 h est retenue pour les enfants de 1 an et de 10 h pour les autres classes d'âge [19]. L'exposition externe par baignade est modélisée de la manière suivante :

$$\text{Dose}_{\text{baignade}} = \sum_{\text{RN}} (A_{\text{eau-RN}} \times Mv_{\text{eau}} \times CD_{\text{RN}} \times t)$$

avec

- $\text{Dose}_{\text{baignade}}$: dose efficace reçue par baignade (Sv)
- RN : radionucléide
- $A_{\text{eau-RN}}$: activité massique dans l'eau du radionucléide RN (Bq.kg^{-1} d'eau)
- Mv_{eau} : masse volumique de l'eau ($1\,000\text{ kg.m}^{-3}$)
- CD_{RN} : coefficient de dose efficace externe par immersion pour le radionucléide RN ($\text{Sv.Bq}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{m}^3$) [17]
- t : temps d'exposition (s)

Les doses efficaces dues à la baignade sont de $0,000002\text{ mSv.an}^{-1}$ pour les enfants de 1 an et $0,000008\text{ mSv.an}^{-1}$ pour les autres classes d'âge. Ces doses sont tout à fait négligeables.

5.2.2 EXPOSITION INTERNE

Pour cette voie d'exposition, le potassium 40 est ignoré, dans la mesure où, dans l'organisme humain, le potassium est soumis à un contrôle homéostatique. Quelle que soit la quantité incorporée, la charge corporelle en ^{40}K reste à environ 60 Bq.kg^{-1} , ce qui conduit à une dose efficace naturelle de 0,180 mSv par an. De ce fait, le ^{40}K contenu dans les aliments n'est pas susceptible d'accroître l'exposition interne des personnes et il n'est donc pas pris en considération dans les évaluations qui suivent.

L'exposition interne par ingestion d'aliments contaminés a été modélisée de la manière suivante :

$$\text{Dose}_{\text{ingestion}} = \sum_i \sum_{\text{RN}} (A_{\text{aliment-RN}} \times Q_i \times \text{CD}_{\text{RN}})$$

avec

$\text{Dose}_{\text{ingestion}}$: dose efficace due à l'ingestion d'aliments ou de sable ou d'eau de mer contaminés (Sv)

"i" : aliment (poissons, mollusques, crustacés) ou sable ou eau de mer consommés

RN : radionucléide autres que le ^{40}K

$A_{\text{aliment-RN}}$: activité massique de l'aliment i ou de sable ou d'eau de mer pour le radionucléide RN (Bq.kg^{-1} ou Bq.L^{-1})

Q_i : quantité d'aliment ou de sable ou d'eau de mer consommée selon la classe d'âge (L ou kg)

CD_{RN} : coefficient de dose efficace interne par ingestion (Sv.Bq^{-1}) [13]

Les consommations de produits de la mer ainsi que les consommations d'eau et de sédiments ingérés par inadvertance considérées pour chaque classe d'âge lors des 6 mois d'opérations de clapage correspondent aux valeurs retenues par le Groupe Radioécologique Nord-Cotentin [19] ; elles sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11. Consommation d'eau, de sédiments et de produits de la mer lors des opérations de clapage

| Classe d'âge | Consommation (kg.an^{-1} ou L.an^{-1}) | | | | |
|------------------|--|---------|----------|------------|-----------|
| | Eau | Sable | Poissons | Mollusques | Crustacés |
| Enfant de 1 an | 0,025 | 0,0025 | 1 | 0 | 0 |
| Enfant de 5 ans | 0,05 | 0,001 | 3 | 0,25 | 0,5 |
| Enfant de 10 ans | 0,05 | 0,0005 | 5 | 0,5 | 1 |
| Adolescent | 0,05 | 0,00025 | 5 | 0,5 | 1 |
| Adulte | 0,05 | 0,00025 | 11,5 | 3,5 | 6,5 |
| Adulte pêcheur | 0,05 | 0,00025 | 33,5 | 15,5 | 30,5 |

Pour une estimation dosimétrique enveloppe, on retient l'hypothèse d'une autarcie totale, c'est-à-dire que la totalité des produits de la mer ingérés par les personnes exposées proviennent de la zone susceptible d'être impactée par les travaux de dragage.

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 12 :

Tableau 12. Doses efficaces dues à l'ingestion.

| | Dose efficace (mSv) |
|------------------|---------------------|
| Enfant de 1 an | 0,001 |
| Enfant de 5 ans | 0,002 |
| Enfant de 10 ans | 0,004 |
| Adolescent | 0,004 |
| Adulte | 0,007 |
| Adulte pêcheur | 0,034 |

Quel que soit le groupe de population, les doses efficaces calculées sont faibles.

5.3 RESULTATS

Les doses efficaces calculées, pour les promeneurs sur les sédiments avant les opérations de dragage, pour la population générale et pour les pêcheurs professionnels, résultant des opérations de clapage sont présentées dans le tableau 13.

Tableau 13. Doses efficaces (mSv).

| Scénario | Classe d'âge | Dose efficace (mSv) |
|------------|------------------|---------------------|
| Promeneurs | Tous | 0,001 |
| | Enfant de 1 an | 0,002 |
| | Enfant de 5 ans | 0,003 |
| Population | Enfant de 10 ans | 0,005 |
| | Adolescent | 0,005 |
| | Adulte | 0,009 |
| Pêcheur | Adulte | 0,035 |

Tous les résultats montrent que la dose efficace susceptible d'être reçue est faible et représente au maximum environ un trentième de la limite de dose pour les personnes du public (1 mSv.an^{-1}) fixée par le décret n°2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants [20]. Le groupe de population identifié comme le plus exposé est celui des pêcheurs professionnels adultes « gros consommateurs » de produits de la mer. Pour ce groupe de référence, la voie d'exposition prépondérante est l'ingestion ; le ^{137}Cs représente moins de 0,1% de la dose efficace reçue. Le ^{40}K représente environ 1% de la dose efficace reçue; cette dose est reçue par exposition externe aux sédiments et lors de la baignade, à l'exclusion de l'exposition interne qu'il n'est pas pertinent de retenir comme cela a été expliqué au paragraphe 5.2.2.

6 CONCLUSIONS

Des calculs ont été réalisés pour apprécier les doses susceptibles, d'une part d'être reçues par les travailleurs qui vont réaliser les opérations de dragage dans le port des Minimes de La Rochelle, d'autre part pour différents populations.

Concernant l'exposition des travailleurs chargés des opérations de dragage des sédiments, la dose efficace maximale calculée est de 0,012 mSv. Les doses calculées sont largement inférieures à la limite de dose de 1 mSv.an⁻¹ pour les travailleurs dits non exposés [15], bien qu'elles aient été calculées sur la base d'hypothèses conservatives, à savoir :

- la prise en compte de la radioactivité naturellement présente dans l'environnement,
- la non prise en compte de l'effet d'atténuation des contenants dans la modélisation de l'exposition externe,
- une exposition continue à une barge ou un puits totalement rempli de sédiments, y compris lors des étapes de remplissage de ces derniers,
- la prise en compte des distances d'exposition minimales,
- la prise en compte des durées d'exposition maximales.

Concernant l'exposition des populations, la dose efficace maximale calculée est inférieure à 0,04 mSv, ceci pour les pêcheurs professionnels adultes « gros consommateurs » de produits de la mer. Les doses calculées sont largement inférieures à la limite de dose de 1 mSv.an⁻¹ pour les personnes du public [20], bien qu'elles aient été calculées sur la base de l'hypothèse conservatrice d'une totale autarcie (la totalité des produits de la mer consommés provenant de la zone impactée par les sédiments).

7 REFERENCES

- [1] Département de Charente-Maritime - Commune de La Rochelle, Extension du port de plaisance des Minimes - Loi sur l'eau - Volet immersion, Site d'Antioche, mars 2007.
- [2] Ville de La Rochelle, Lettre PhM/MLN du 8 juillet 2009, Extension Port des Minimes.
- [3] D. Boust et P. Doremus, Evaluation du protocole d'échantillonnage et d'analyses radiologiques des sédiments des zones d'extension du port des minimes à la Rochelle, *Rapport DEI/SECRE/2009-036*, juillet 2009.
- [4] CREOCEAN, Echantillonnage et analyses radiochimiques des sédiments des zones d'extension du port des minimes - *Rapport d'expertise, Dossier 1082111*, septembre 2009.
- [5] IRSN, Compte-rendu de la réunion du 6 novembre 2009 - Réunion d'information sur les techniques de dragage prévues pour l'extension du port de La Rochelle, *CR DRPH/SER/2009-32* du 25 janvier 2010.
- [6] CREOCEAN, Echantillonnage et analyses radiochimiques des sédiments des zones d'extension du port des minimes - *Rapport d'expertise, Dossier 1082111a*, mars 2009.
- [7] SUBATECH, 2009. Rapport d'analyse N° 090902438.
- [8] P. Calmon (2009). Ajout de nouveaux éléments dans Symbiose V1.4 - *Rapport DEI/SECRE 09-034*.
- [9] CREOCEAN, Extension du port de plaisance des minimes - Modélisations hydro-sédimentaires de plusieurs sites d'immersion, *Dossier 1083009*, juillet 2008.
- [10] MicroShield Version 5, Verification & Validation Report, Grove Engineering, Révision 5, Octobre 1996.
- [11] Microshield Version 5, User's Manual, Grove Engineering, octobre 1996.
- [12] E. Navarro, Modélisation de l'ingestion involontaire - Détermination des paramètres nécessaires au calcul, *Rapport DEI/SESUC n°2008-099*, juillet 2008.
- [13] Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
- [14] D. Delacroix, J.P. Guerre, P. Leblanc, Radionucléides et Radioprotection - Guide pratique, *Radioprotection*, vol 39, numéro spécial, 2004.
- [15] Décret n°2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.
- [16] Commission Internationale de Protection Radiologique, ICRP Publication 66 - Human Respiratory Tract - Model for Radiological Protection, *Annals of the ICRP*, Volume 24 N° 1-3, 1994, Pergamon.
- [17] K.F. Eckerman and J.C. Ryman, External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil, *Federal Guidance Report 12* - EPA 402-R-93-081, 1993.
- [18] IRSN, Guide méthodologique, Gestion des sites industriels potentiellement contaminés par des substances radioactives, Version 1, Mai 2008.
- [19] Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, Estimation des doses et du risque de leucémie associée, Rapport détaillé du GT4 - Groupe Radioécologie Nord-Cotentin, Volume 4, Juillet 1999.
- [20] Décret n°2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.