

Rapport environnemental annuel
relatif aux installations nucléaires du
Centre Nucléaire de Production
d'Electricité de

PALUEL

2023

Bilan rédigé au titre de l'article 4.4.4 de l'arrêté du 7
février 2012

SOMMAIRE

Partie I - Le Centre Nucléaire de Production d'Electricité	4
De Paluel en 2023	4
I. Contexte	4
II. Le CNPE de PALUEL	4
III. Modifications apportées au voisinage du CNPE de PALUEL	5
IV. Évolutions scientifiques susceptibles de modifier l'étude d'impact	6
V. Bilan des incidents de fonctionnement et des événements significatifs pour l'environnement	6
Partie II - Prélèvements d'eau	8
I. Prélèvement d'eau destinée au refroidissement	9
II. Prélèvement d'eau destinée à l'usage industriel	10
III. Prélèvement d'eau destinée à l'usage domestique	10
IV. Milieu de prélèvement : comparaison pluriannuelle, prévisionnel, valeurs limites et maintenance	11
Partie III – Restitution et consommation d'eau	13
I. Restitution d'eau	13
II. Consommation d'eau	14
Partie IV - Rejets d'effluents	15
I. Rejets d'effluents à l'atmosphère	15
II. Rejets d'effluents liquides	25
III. Rejets thermiques	40
Partie VI - Surveillance de l'environnement	42
I. Surveillance de la radioactivité dans l'environnement	42
II. Physico-chimie des eaux souterraines	49
III. Chimie et physico-chimie des eaux de surface	49
IV. Surveillance écologique et halieutique	51
V. Acoustique environnementale	55

Partie VII - Évaluation de l'impact environnemental et sanitaire des rejets de l'installation
56

Partie VIII - Gestion des déchets _____ **60**

I. Les déchets radioactifs _____ **60**

II. Les déchets non radioactifs _____ **65**

ABREVIATIONS _____ **67**

ANNEXE 1 : Suivi radioécologique annuel du CNPE de PALUEL Année 2022 _____ **68**

Partie I - Le Centre Nucléaire de Production d'Electricité de Paluel en 2023

I. Contexte

« La conformité à la réglementation en vigueur, la prévention des pollutions ainsi que la recherche d'amélioration continue de la performance environnementale » constituent l'un des engagements de la politique environnementale d'EDF.

Dans ce cadre, tous les Centres Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE) d'EDF disposent d'un système de management de l'environnement certifié « ISO14001 ».

La maîtrise des événements, susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement, repose sur une application stricte des règles de prévention (bonne gestion des eaux usées, des « effluents », de leurs traitements, entreposage, contrôles avant rejet, etc.) et sur un système complet de surveillance de l'environnement sur et autour des CNPE.

En application de l'article 4.4.4 de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base, ce document présente le bilan de l'année 2023 du CNPE de Paluel en matière d'environnement.

II. Le CNPE de PALUEL

Située en bordure du littoral de pays de Caux, dans le département de la Seine-Maritime (76), la centrale nucléaire de Paluel s'étend sur une superficie de 160 hectares, entre Dieppe (35 km à l'Est) et Fécamp (20 km à l'Ouest).

Le premier coup de pioche a été donné en décembre 1975 dans la vailleuse de « Sunset », choisie pour ses caractéristiques géologiques. Le chantier de construction, qui a mobilisé plus de 5000 hommes et a duré près de dix années, était alors le plus grand chantier d'Europe.

La centrale nucléaire de Paluel emploie environ 1500 salariés EDF et 700 salariés permanents d'entreprises industrielles. Lors des périodes d'arrêts pour maintenance, l'effectif global du site est renforcé par des équipes spécialisées d'intervenants.

Le site est organisé autour de quatre unités de production d'électricité d'origine nucléaire de 1300 MW de puissance chacune.

Dates du premier couplage au réseau des unités de production de Paluel :

- Réacteur 1 : 22 juin 1984
- Réacteur 2 : 14 septembre 1984
- Réacteur 3 : 30 septembre 1985
- Réacteur 4 : 11 avril 1986

Mise en service industrielle des réacteurs :

- Réacteur 1 : 1^{er} décembre 1985
- Réacteur 2 : 1^{er} décembre 1985
- Réacteur 3 : 1^{er} février 1986
- Réacteur 4 : 1^{er} juin 1986

Les quatre réacteurs de Paluel correspondent aux installations nucléaires de base :

- N°103 (réacteur Paluel 1)
- N°104 (réacteur Paluel 2)
- N°114 (réacteur Paluel 3)
- N°115 (réacteur Paluel 4)

En 2023, la centrale nucléaire de Paluel a produit 32.5 TWh de la production nucléaire française tout en menant à bien la maintenance annuelle de ses installations.

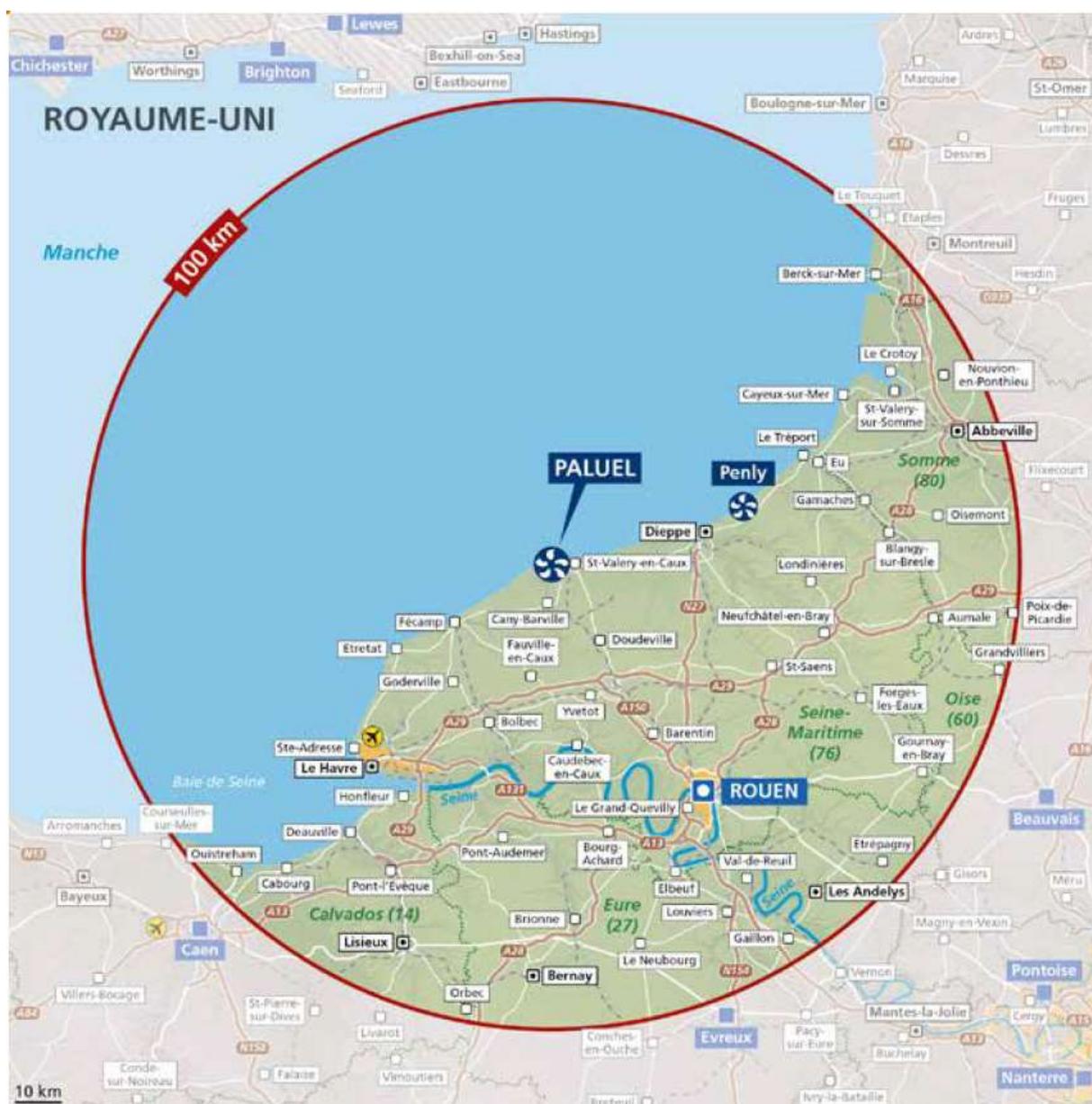


Figure 1 : Implantation du CNPE Paluel

III. Modifications apportées au voisinage du CNPE de PALUEL

La surveillance de l'environnement industriel est réalisée en application d'une prescription externe d'EDF. Lors de l'année 2023, aucune modification notable au voisinage du CNPE de Paluel n'a été identifiée.

IV. Évolutions scientifiques susceptibles de modifier l'étude d'impact

Dans le cadre d'une démarche d'amélioration continue, EDF mène des études afin d'améliorer la connaissance de ses rejets (identification de sous-produits de la morpholine et de l'éthanolamine, de sous-produits issus des traitements biocides, dégradation de la monochloramine et de l'hydrazine dans l'environnement etc.). EDF mène également des études afin d'améliorer la connaissance de l'incidence de ses rejets sur l'homme et l'environnement. Ces évaluations d'impact nécessitent en effet l'utilisation de valeurs de référence qui font l'objet d'une veille scientifique :

- les Valeurs Toxicologiques de Référence pour l'impact sanitaire sur l'Homme, valeurs sélectionnées selon les critères définis dans la note d'information n°DGS/EA/DGPR/2014/307 du 31/10/2014,
- les valeurs seuils ou valeurs guides issues des textes réglementaires ou des grilles de qualité d'eau, les données écotoxicologiques, en particulier les PNEC (Predicted No Effect Concentration), et les études testant la toxicité et l'écotoxicité des effluents CRT, pour l'analyse des incidences sur l'environnement. A noter que les PNEC sont validées par la R&D d'EDF après revue bibliographique exhaustive et, si nécessaire, normes OCDE et les Bonnes Pratiques de Laboratoire.

L'ensemble de ces évolutions scientifiques est intégré dans les études d'impact.

V. Bilan des incidents de fonctionnement et des évènements significatifs pour l'environnement

En 2004, le CNPE de Paluel a été certifié, pour la première fois, ISO 14001. L'obtention de la norme ISO 14001 est une reconnaissance internationale de la prise en compte de l'environnement dans l'ensemble des activités de l'entreprise. Elle est l'assurance d'une démarche d'amélioration continue et de la mise en place d'une organisation spécifique au domaine de l'environnement.

La protection de l'environnement, sur le terrain comme en laboratoire, a toujours été une priorité pour les CNPE d'EDF. Comme pour tous les sites industriels, les exigences environnementales fixées par le CNPE de Paluel et la réglementation se sont sans cesse accrues au fil des années. Cette certification est le fruit de l'implication de l'ensemble des intervenants - personnels EDF et d'entreprises externes - dans une démarche de respect de l'environnement.

La norme ISO 14001 repose sur la mise en œuvre d'un Système de Management Environnemental (SME). Cela signifie que la performance en matière de protection de l'environnement est intégrée dans l'organisation, c'est-à-dire dans toutes les décisions quotidiennes du CNPE de Paluel. L'ensemble des salariés du CNPE, ainsi que le personnel intervenant pour le compte d'entreprises extérieures, sont impliqués dans le respect de l'environnement.

Dans le cadre de l'amélioration continue, le CNPE de Paluel a mis en place un système permettant de détecter, tracer, déclarer, les Événements Significatifs pour l'Environnement (ESE) à l'Autorité de Sûreté Nucléaire, de traiter ces évènements et d'en analyser les causes profondes pour les éradiquer.

La déclaration d'ESE est établie à partir de critères précis et identiques sur tout le parc nucléaire. Ces critères sont définis par l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

1. Bilan des évènements significatifs pour l'environnement déclarés

Le tableau suivant récapitule les évènements significatifs pour l'environnement déclarés par le CNPE de Paluel en 2023.

Typologie	Date	Description de l'évènement	Principales actions correctives
ESE6	21/04/2023	Cumul annuel des émissions de SF6 supérieur à 100 kg	Les différentes fuites ont été traitées par des actions ponctuelles de maintenance corrective : colmatage des organes inétanches, remplacements des pièces défectueuses.
ESE6	09/06/2023	Atteinte du seuil de déclaration pour les cumul annuel des émissions de fluides frigorigènes	Les différentes fuites (<100 kg) ont été traitées par des actions ponctuelles de maintenance corrective : resserrage des organes, remplacement des pièces défectueuses.

2. Bilan des incidents de fonctionnement

Dans le cadre d'une exploitation courante des installations industrielles, le CNPE de Paluel a eu, durant l'année 2023, quelques aléas matériels sur les dispositifs de traitement des effluents radioactifs et de prélèvement, les dispositifs de mesure et de surveillance (KRT). Ces indisponibilités ponctuelles n'ont pas eu d'incidence sur la qualité de la surveillance environnementale compte tenu des remises en état rapides des matériels qui ont permis de limiter au maximum l'indisponibilité du matériel.

Partie II - Prélèvements d'eau

L'eau est une ressource nécessaire au fonctionnement des CNPE et partagée avec de nombreux acteurs : optimiser sa gestion et concilier les usages est donc une préoccupation importante pour EDF.

Que cette eau soit prélevée en mer, dans un cours d'eau, ou dans des nappes d'eaux souterraines, son utilisation est strictement réglementée et contrôlée par les pouvoirs publics.

Dans un CNPE, l'eau est nécessaire pour :

- refroidir les installations,
- constituer des réserves pour réaliser des appoints ou disposer de stockage de sécurité dont l'alimentation des circuits de lutte contre les incendies (usage industriel),
- alimenter les installations sanitaires et les équipements de restauration des salariés (usage domestique).

Un CNPE en fonctionnement utilise trois circuits d'eau indépendants :

- le circuit primaire pour extraire la chaleur : c'est un circuit fermé parcouru par de l'eau sous pression (155 bars) et à une température de 300° C. L'eau passe dans la cuve du réacteur, capte la chaleur produite par la réaction de fission du combustible nucléaire et transporte cette énergie thermique vers le circuit secondaire au travers des générateurs de vapeur.
- le circuit secondaire pour produire la vapeur : au contact des milliers de tubes en « U » des générateurs de vapeur, l'eau du circuit primaire transmet sa chaleur à l'eau circulant dans le circuit secondaire, lui-aussi fermé. L'eau de ce circuit est ainsi transformée en vapeur qui fait tourner la turbine. Celle-ci entraîne l'alternateur qui produit l'électricité. Après son passage dans la turbine, la vapeur repasse à l'état liquide dans le condenseur ; cette eau est ensuite renvoyée vers les générateurs de vapeur pour un nouveau cycle.
- un troisième circuit, appelé « circuit de refroidissement » : pour condenser la vapeur et évacuer la chaleur, le circuit de refroidissement comprend un condenseur, appareil composé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide prélevée dans la rivière ou la mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se condense. Ce circuit de refroidissement est différent selon la situation géographique du CNPE :
 - o en bord de mer ou d'un fleuve à grand débit, les CNPE fonctionnent avec un circuit de refroidissement totalement ouvert.
De l'eau (environ 50 m³ par seconde) est prélevée pour assurer le refroidissement des équipements via le condenseur. Une fois l'opération de refroidissement effectuée, l'eau qui n'est jamais entrée en contact avec la radioactivité, est intégralement restituée dans la mer ou le fleuve, à une température légèrement plus élevée.
 - o sur les fleuves ou les rivières dont le débit est plus faible, les CNPE fonctionnent avec un circuit en partie fermé.
Le refroidissement de l'eau chaude issue du condenseur se fait par échange thermique avec de l'air ambiant dans une grande tour réfrigérante atmosphérique appelée « aéroréfrigérant ». Une partie de l'eau chaude se

vaporise sous forme d'un panache visible, au sommet de la tour. Cette vapeur d'eau n'est pas une fumée, elle ne contient pas de CO₂. Le reste de l'eau refroidie retourne dans le condenseur. Ce système avec aéroréfrigérants permet donc de réduire considérablement les prélèvements d'eau qui sont de l'ordre de 2 m³ par seconde.

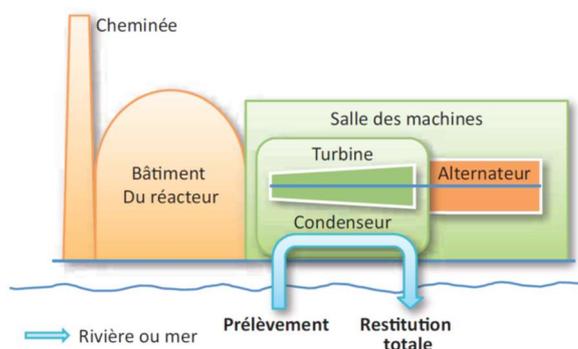


Figure 2 : Schéma d'un CNPE avec un circuit de refroidissement ouvert

Annuellement, en moyenne, le volume d'eau nécessaire au fonctionnement du circuit de refroidissement d'un réacteur est compris entre 50 millions de mètres cubes (si le refroidissement est assuré par un aéroréfrigérant) et 1 milliard de mètres cubes (si l'eau est rejetée directement dans le milieu naturel) soit respectivement un besoin de 6 à 160 litres d'eau prélevés pour produire 1 kWh.

Que les CNPE soient en fonctionnement ou à l'arrêt, la grande majorité de l'eau prélevée est restituée à sa source, c'est-à-dire au milieu naturel à proximité du point de prélèvement.

Les besoins en eau d'un CNPE servent majoritairement à assurer son refroidissement et, donc, à produire de l'électricité. Cependant, comme tous les sites industriels, un CNPE a besoin d'eau pour :

- faire face, si besoin, à un incendie : l'ensemble des CNPE d'EDF est équipé d'un important réseau d'eau sous pression permettant aux équipes des services de conduite et de la protection des CNPE d'EDF d'intervenir dès la détection d'un incendie jusqu'à l'arrivée des secours externes, et ainsi en limiter sa propagation. Ces réseaux sont régulièrement testés afin de s'assurer de leur fonctionnement et de leur efficacité.
- se laver, boire et se restaurer : selon leur importance (de 2 à 6 réacteurs), les CNPE d'EDF accueillent de 600 à 2 000 salariés permanents (EDF et entreprises extérieures) auxquels s'ajoutent, lors d'un arrêt d'un réacteur pour maintenance, près de 1000 personnes supplémentaires. Les besoins en eau potable sont en permanence adaptés aux effectifs de salariés permanents et temporaires, tant pour les sanitaires que pour la restauration. Les CNPE d'EDF peuvent être reliés aux réseaux d'eau potable des communes sur lesquelles ils sont implantées.

I. Prélèvement d'eau destinée au refroidissement

Le tableau ci-dessous détaille le cumul mensuel du prélèvement d'eau destinée au refroidissement de l'année 2023.

	Prélèvement d'eau (en millions de m ³)
Janvier	471
Février	404
Mars	357
Avril	361
Mai	342
Juin	341
Juillet	380
Août	465
Septembre	456
Octobre	447
Novembre	331
Décembre	464
TOTAL	4 817

II. Prélèvement d'eau destinée à l'usage industriel

Le tableau ci-dessous détaille le cumul mensuel du prélèvement d'eau du fleuve Durdent et d'eau de mer destinée à l'usage industriel de l'année 2023.

	Prélèvement d'eau du fleuve Durdent (en milliers de m ³)	Prélèvement d'eau de mer (en milliers de m ³) hors eau de refroidissement
Janvier	31,1	2 331
Février	53,7	2 046
Mars	64,0	2 096
Avril	69,7	1 996
Mai	56,9	1 867
Juin	25,3	1 698
Juillet	58,2	2 036
Août	37,4	2 267
Septembre	54,2	2 301
Octobre	43,3	2 301
Novembre	89,4	1 772
Décembre	58,5	2 384
TOTAL	641,7	25 094

III. Prélèvement d'eau destinée à l'usage domestique

Le tableau ci-dessous détaille le cumul mensuel du prélèvement d'eau destiné à l'usage domestique de l'année 2023.

	Prélèvement d'eau (en m ³)
Janvier	2 823
Février	4 168
Mars	3 875
Avril	2 858
Mai	3 306
Juin	4 225
Juillet	3 952
Août	3 099
Septembre	3 586
Octobre	3 877
Novembre	3 880
Décembre	3 315
TOTAL	42 964

IV. Milieu de prélèvement : comparaison pluriannuelle, prévisionnel, valeurs limites et maintenance

1. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel des prélèvements d'eau pour 2023.

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de prélèvement des années 2021 à 2023 avec la valeur du prévisionnel 2023.

Année	Milieu	Volume (millions de m ³)
2021	Eau de mer (eau de refroidissement + eau à usage industriel CFI)	4 799
2022		4 569
2023		4 842
Prévisionnel 2023		5 100
Année	Milieu	Volume (milliers de m ³)
2021	Durdent	725
2022		561
2023		642
Prévisionnel 2023		630
Année	Milieu	Volume (milliers de m ³)
2021	Eau potable	40,721
2022		29,474
2023		42,964

Commentaires : Le volume annuel d'eau prélevé est cohérent au prévisionnel qui avait été défini pour l'année 2023, compte tenu du temps effectif de fonctionnement des tranches. Le bilan du prélèvement d'eau de la Durdent est au-dessus de 2% de la cible attendue et notamment au prévisionnel de prélèvements et de consommations d'eau et de rejets établi par le CNPE de Paluel à partir de la programmation des activités d'exploitation prévues pour l'année 2023. Il est à noter que le cumul annuel du volume d'eau prélevé dans la Durdent s'élève en 2023 à 641 717 m³ pour un prévisionnel annuel dimensionné à 630 000 m³. En effet, le redémarrage des tranches 2 et 3 à la suite des arrêts automatiques des réacteurs déclenchés au mois de novembre a nécessité un besoin en eau supplémentaire pour alimenter les systèmes de production de vapeur auxiliaire. Les opérations de redémarrage se sont également poursuivies durant le mois de décembre.

2. Comparaison aux valeurs limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des débits instantanés et des volumes d'eau prélevés dans la Durdent cette année avec les valeurs limites de prélèvement fixées par la décision ASN n° 2019-DC-0677.

Milieu	Limites de prélèvement		Prélèvement		Unité
	Prescriptions	Valeur	Valeur maximale	Valeur moyenne	
Eau douce prélevée dans la Durdent	Débit instantané	610	357	267	m ³ / h
	Volume journalier	14500	4180	1950	m ³
	Volume annuel	1500000	641 717*	S.O.	m ³

*Correspond au volume annuel prélevé

Commentaires : Les valeurs maximales observées sont inférieures aux limites autorisées.

3. Principales opérations de maintenance intervenues sur les équipements et ouvrages de prélèvements

L'année 2023 n'a pas été concernée par des actions de maintenance (hors maintenance programmée) et aucune intervention ou opération de maintenance anticipée n'ont été nécessaires.

4. Opérations exceptionnelles de prélèvements

Le CNPE de Paluel n'a pas réalisé d'opération exceptionnelle de prélèvement d'eau dans la Durdent et en mer en 2023.

Partie III – Restitution et consommation d'eau

I. Restitution d'eau

La restitution d'eau du CNPE de Paluel pour l'année 2023 est présentée dans le tableau ci-dessous.

Il comprend le bilan mensuel des volumes d'eau restitués dans le milieu marin :

- Eau de refroidissement : eau de mer
- Rejets radioactifs : Vidange des réservoirs SEK (Ex), KER (T) et TER(S)
- Rejets industriels :
 - Eau rejetée en sortie de la station d'épuration des eaux usées après traitement
 - Eau rejetée en sortie de la station de production d'eau déminéralisée
 - Volume d'eau de mer utilisé pour le maintien de l'étanchéité des pompes de circulation de l'eau de mer.
 - Volume d'eau de mer utilisé pour le lavage des systèmes de filtration des circuits des eaux de refroidissement.

Le pourcentage de restitution correspond à la différence entre la quantité d'eau prélevée (eau de mer, eau de la Durdent et eau potable) avec l'eau restituée dans la Manche (Eau de refroidissement, Rejets radioactifs et Rejets industriels).

		Restitution d'eau			Unités
		Eau de refroidissement	Rejets radioactifs	Rejets industriels	
Restitution mensuelle	Janvier	470 684	12,068	2 331	milliers de m ³
	Février	403 615	19,083	2 046	
	Mars	356 670	26,372	2 096	
	Avril	361 091	18,972	1 996	
	Mai	342 478	20,999	1 867	
	Juin	341 083	8,341	1 698	
	Juillet	379 858	16,327	2 036	
	Août	464 910	14,375	2 267	
	Septembre	455 501	10,963	2 301	
	Octobre	446 560	17,289	2 301	
	Novembre	330 704	42,650	1 772	
Décembre	463 580	21,241	2 384		
TOTAL	Restitution au milieu aquatique	Total volume prélevé : 4 842 395 233 Total volume restitué : 4 841 982 196			milliers de m ³
	Pourcentage de restitution d'eau au milieu aquatique par rapport au prélèvement	99.99			%

II. Consommation d'eau

1. Cumul mensuel

La consommation d'eau correspond à la différence entre la quantité d'eau prélevée et la quantité d'eau restituée au milieu aquatique. Le tableau ci-dessous détaille le cumul mensuel de consommation d'eau de l'année 2023.

	Consommation d'eau (en milliers de m3)
Janvier	12,068
Février	19,083
Mars	26,372
Avril	18,972
Mai	20,999
Juin	8,341
Juillet	17,087
Août	14,375
Septembre	11,743
Octobre	17,289
Novembre	43,436
Décembre	21,241
TOTAL	231,006

Partie IV - Rejets d'effluents

Comme beaucoup d'autres activités industrielles, l'exploitation d'un CNPE entraîne des rejets d'effluents à l'atmosphère et par voie liquide. Une réglementation stricte encadre ces différents rejets, qu'ils soient radioactifs ou non.

Chaque CNPE a mis en place une organisation afin d'assurer une gestion optimisée des effluents visant notamment à :

- réduire à la source la production d'effluents, notamment par le recyclage,
- réduire les rejets de substances radioactives ou chimiques au moyen de traitements appropriés,
- optimiser la production de déchets et valoriser les déchets conventionnels qui peuvent l'être.

Les rejets d'effluents se présentent sous différentes formes :

- les rejets radioactifs liquides et atmosphériques, qui peuvent contenir :
 - o Tritium,
 - o Carbone 14,
 - o Iode,
 - o Autres produits de fission ou d'activation,
 - o Gaz rares.
- les rejets chimiques liquides classés en deux catégories :
 - o les rejets de substances chimiques associées aux effluents radioactifs liquides ou eaux non radioactives issues des salles des machines,
 - o les rejets de produits issus des autres circuits non radioactifs (circuit de refroidissements des condenseurs, station de déminéralisation, station d'épuration).
- les rejets chimiques atmosphériques : un CNPE émet peu de substances chimiques par voie atmosphérique. Les émissions proviennent des groupes électrogènes de secours constitués de moteurs diesels ou de turbines à combustion consommant du gasoil, de pertes de fluides frigorigènes, du renouvellement de calorifuges dans le bâtiment réacteur et d'émanations de certaines substances volatiles utilisées pour la protection et le traitement des circuits.
- les rejets thermiques : quel que soit le mode de refroidissement (ouvert ou fermé) d'un CNPE, l'échauffement du milieu aquatique est limité par la réglementation propre à chaque CNPE.

Optimisés, réduits, traités et surveillés, les rejets d'effluents radioactifs atmosphériques et liquides génèrent une exposition des populations plus de 100 fois inférieure à la limite réglementaire d'exposition reçue par une personne du public fixée à 1mSv/an dans l'article R1333-8 du code de la santé publique.

I. Rejets d'effluents à l'atmosphère

1. Rejets d'effluents à l'atmosphère radioactifs

Pour les tranches en fonctionnement, il existe deux sources de rejets d'effluents radioactifs à l'atmosphère :

- les effluents dits « hydrogénés » proviennent du dégazage des effluents liquides issus du circuit primaire. Afin d'éviter tout mélange avec l'oxygène de l'air, ces effluents hydrogénés sont collectés et stockés, au minimum 30 jours dans des réservoirs où une surveillance régulière est effectuée. Durant ce temps, la radioactivité décroît naturellement, ce qui réduit d'autant l'impact environnemental. Les effluents sont contrôlés avant leur rejet. Pendant leur rejet, ils subissent systématiquement des traitements tels que la filtration à Très Haute Efficacité (filtres THE) qui permet de retenir les poussières radioactives. Ces rejets occasionnels sont dits « concertés ».
- Les effluents dits « aérés » qui proviennent de la collecte des événements des circuits de traitement des effluents liquides radioactifs, de la dépressurisation du bâtiment du réacteur ainsi que de l'air de la ventilation des locaux de l'îlot nucléaire. La ventilation maintient les locaux en légère dépression par rapport à l'extérieur et évite ainsi les pertes de gaz ou de poussières contaminées vers l'environnement. Les opérations de dépressurisation de l'air du bâtiment réacteur conduisent à des rejets dits « concertés ». L'air de ventilation transite par des filtres THE et, dans certains circuits, sur des pièges à iodes à charbon actif avant d'être rejeté en continu à la cheminée. Ces rejets sont dits « permanents ».

Ces deux types d'effluents sont rejetés dans l'atmosphère par une cheminée dédiée à la sortie de laquelle est réalisé, en permanence, un contrôle de l'activité rejetée.

Les cinq catégories de radionucléides réglementés dans les rejets d'effluents à l'atmosphère sont les gaz rares, le tritium, le carbone 14, les iodes et les autres produits de fission (PF) et produits d'activation (PA) :

- Les principaux gaz rares issus de la réaction de fission sont le xénon 133, le xénon 135, le krypton 85 et le xénon 131. Ce sont des gaz inertes, ils ne sont donc pas retenus par les systèmes de filtration (filtres très haute efficacité THE et pièges à iodes).
- Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène. C'est un émetteur bêta (électron) de faible énergie. Il est rejeté par les CNPE et est très majoritairement issu de l'activation neutronique d'éléments tels que le bore 10 et le lithium 6 présents dans le fluide primaire.
- Le carbone 14 présent dans les rejets des CNPE est produit essentiellement par activation de l'oxygène 17 présent dans l'eau du circuit primaire. Une part plus faible est produite par l'activation de l'azote 14 dissous dans l'eau du circuit primaire.
- Les iodes présents dans les rejets d'effluents radioactifs du CNPE (principalement l'iode 131 et l'iode 133) sont des produits de fission, créés dans le combustible par fission des atomes d'uranium ou de plutonium.
- Les autres produits de fission (PF) et produits d'activation (PA) émetteurs β ou γ , correspondent principalement au césium et au cobalt.

a. Règles spécifiques de comptabilisation

Ces règles s'appuient en premier lieu sur la définition de « spectres de référence », en fonction du type de rejet (liquides ou atmosphériques). Ces rejets sont constitués d'une liste de radionucléides à identifier par les moyens de mesure adéquats. Cette liste a été déterminée par une étude réalisée de 1996 à 1999 sur l'ensemble du parc des CNPE d'EDF. Toutes les substances figurant dans plus de 90 % des analyses figurent dans cette liste. Des radionucléides comme l'iode, peu présent dans les rejets, figurent également dans cette liste, mais pour des raisons historiques.

La deuxième règle fondamentale consiste à déclarer obligatoirement une activité rejetée pour les radionucléides appartenant à ces différents « spectres de référence ». Les radionucléides dont l'activité mesurée est inférieure au seuil de décision¹ donnent lieu à une comptabilisation d'activité rejetée égale au SD.

Les cumuls mensuels sont établis par sommation des activités rejetées pour chacun des rejets d'effluents du mois considéré. Les cumuls annuels sont égaux à la somme des cumuls mensuels.

b. Spectre de référence des rejets radioactifs à l'atmosphère

Le bilan des rejets d'effluents réalisés à l'atmosphère est déterminé pour chacune des cinq familles de radionucléides réparties comme suit :

- les gaz rares,
- le Tritium,
- le Carbone 14,
- les Iodes,
- les autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta et/ou gamma (PF-PA).

Le tableau ci-dessous est un rappel du spectre de référence des rejets radioactifs à l'atmosphère.

Paramètres	Radionucléide
Gaz rares	⁴¹ Ar
	⁸⁵ Kr
	^{131m} Xe
	¹³³ Xe
	¹³⁵ Xe
Tritium	³ H
Carbone 14	¹⁴ C
Iodes	¹³¹ I
	¹³³ I
Produits de fission et d'activation	⁵⁸ Co
	⁶⁰ Co
	¹³⁴ Cs
	¹³⁷ Cs

¹ D'après le Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de l'IRSN : « Le seuil de décision est la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologue puisse « décider » que cette activité est présente et donc mesurée. En dessous de cette valeur, l'activité de l'échantillon est donc trop faible pour être estimée. Ce seuil de décision dépend de la performance et du rayonnement ambiant autour des moyens métrologiques utilisés. »

c. Cumul mensuel

Les cumuls mensuels des rejets d'effluents radioactifs pour les tranches en fonctionnement à l'atmosphère sont donnés dans le tableau suivant.

	131I (GBq)	133I (GBq)	131mXe (GBq)	133Xe (GBq)	135Xe (GBq)	41Ar (GBq)	85Kr (GBq)	134Cs (GBq)	137Cs (GBq)	58Co (GBq)	60Co (GBq)	75Se (GBq)
Janvier	6,820E-04	2,952E-03	1,269E-03	4,024E+01	1,498E+01	3,305E+00	7,720E-03	1,116E-04	1,121E-04	1,200E-04	1,695E-04	/
Février	1,545E-03	2,505E-03	1,088E-04	3,714E+01	1,272E+01	2,898E+00	7,882E-04	1,126E-04	1,040E-04	1,337E-04	1,623E-04	/
Mars	1,595E-03	2,824E-03	2,042E-03	7,152E+01	2,834E+01	2,287E+00	6,017E-02	1,186E-04	1,225E-04	7,242E-04	1,939E-04	/
Avril	8,736E-04	2,763E-03	3,334E-03	4,037E+01	1,503E+01	1,307E+00	2,567E-02	1,172E-04	1,139E-04	1,400E-04	2,301E-04	/
Mai	3,497E-04	2,044E-03	1,887E-03	3,442E+01	1,246E+01	2,266E+00	1,217E-02	1,055E-04	9,966E-05	7,996E-04	1,691E-04	1,092E-04
Juin	3,519E-04	2,193E-03	6,209E-04	3,270E+01	1,298E+01	3,383E+00	5,815E-03	9,873E-05	9,663E-05	1,476E-04	1,611E-04	2,185E-05
Juillet	3,832E-04	2,199E-03	1,525E-03	3,834E+01	1,322E+01	2,004E+00	1,927E-02	1,018E-04	1,000E-04	1,452E-04	1,888E-04	5,777E-05
Août	3,810E-04	2,361E-03	1,269E-03	3,562E+01	1,231E+01	4,098E+00	1,248E-02	9,590E-05	1,003E-04	1,870E-04	1,445E-04	/
Septembre	1,931E-03	3,373E-03	3,780E-03	3,889E+01	1,314E+01	5,695E+00	1,745E-02	9,379E-05	9,383E-05	9,496E-05	1,362E-04	/
Octobre	3,436E-03	2,242E-03	1,517E-04	4,312E+01	1,420E+01	4,216E+00	8,720E-04	9,640E-05	9,255E-05	9,712E-05	1,546E-04	/
Novembre	3,587E-04	1,703E-03	1,358E-02	3,921E+01	1,366E+01	2,334E+00	1,694E-02	1,008E-04	9,853E-05	1,570E-04	1,503E-04	/
Décembre	2,266E-03	1,932E-03	1,376E-03	4,306E+01	1,444E+01	5,910E+00	9,566E-03	9,958E-05	9,678E-05	1,012E-04	1,497E-04	/
TOTAL ANNUEL	1,42E-02	2,91E-02	3,09E-02	4,95E+02	1,77E+02	3,97E+01	1,89E-01	1,25E-03	1,23E-03	2,85E-03	2,01E-03	1,89E-04

	Volumes rejetés (m3)	Iodes (GBq)	Gaz rares (GBq)	Autres PF et PA (GBq)	Tritium (GBq)	Carbone 14 (GBq)
Janvier	8,44E+08	3,634E-03	5,853E+01	5,131E-04	1,265E+02	2,860E+02
Février	7,72E+08	4,050E-03	5,276E+01	5,126E-04	1,312E+02	/
Mars	8,39E+08	4,418E-03	1,022E+02	1,159E-03	1,241E+02	/
Avril	8,85E+08	3,637E-03	5,674E+01	6,013E-04	1,348E+02	3,277E+02
Mai	8,47E+08	2,394E-03	4,915E+01	1,283E-03	1,713E+02	/
Juin	7,97E+08	2,545E-03	4,907E+01	5,259E-04	1,791E+02	/
Juillet	8,63E+08	2,582E-03	5,358E+01	5,936E-04	2,318E+02	2,991E+02
Août	8,36E+08	2,742E-03	5,204E+01	5,277E-04	2,110E+02	/
Septembre	8,24E+08	5,304E-03	5,774E+01	4,188E-04	2,172E+02	/
Octobre	8,59E+08	5,678E-03	6,153E+01	4,407E-04	2,111E+02	2,298E+02
Novembre	8,17E+08	2,062E-03	5,524E+01	5,066E-04	1,493E+02	/
Décembre	8,60E+08	4,197E-03	6,343E+01	4,472E-04	1,375E+02	/
TOTAL ANNUEL	1,00E+10	4,32E-02	7,12E+02	7,53E-03	2,02E+03	1,14E+03

Il a été vérifié que les rejets ne présentent pas d'activité volumique alpha globale d'origine artificielle supérieure aux seuils de décision.

Il a été vérifié que les rejets au niveau des cheminées annexes (ventilation de la laverie et du laboratoire de chimie de tranche) ne présentent pas d'activité volumique bêta globale d'origine artificielle supérieure à 1,00E-03 Bq/m3.

d. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2023 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2023 pour les tranches en fonctionnement.

Année	Rejets par catégorie de radionucléides (GBq)				
	Gaz rares	Tritium	Carbone 14	Iodes	Autres produits de fission et d'activation
2021	5,64E+02	2,08E+03	9,35E+02	2,87E-02	5,00E-03
2022	5,50E+02	2,13E+03	9,94E+02	3,30E-02	5,19E-03
2023	7,12E+02	2,02E+03	1,14E+03	4,32E-02	7,53E-03
Prévisionnel 2023	6,00E+02	2,00E+03	1,00E+03	4,00E-02	6,00E-03

Commentaires : Les rejets radioactifs à l'atmosphère sont cohérents avec les valeurs du prévisionnel 2023.

Les rejets de C14 gazeux sont supérieurs au prévisionnel annuel de rejet. En 2023, la valeur de rejet du carbone 14 gazeux s'élève à 1 140 GBq pour une valeur attendue de 1000 GBq.

Les rejets d'iodes gazeux sont supérieurs au prévisionnel rejet à la suite d'une présence d'iode 131 et 133 sur deux périodes de prélèvement du 22 août au 8 septembre 2023 sur la cheminée de la tranche 1. En effet, la campagne d'essai des pièges à iode combinée à un rejet lié à l'exploitation de la tranche a généré un cumul mensuel équivalent à deux mois de rejet. Ces rejets sont à l'origine du dépassement du prévisionnel annuel des rejets d'iodes gazeux du CNPE.

Concernant les rejets de gaz rares, le dépassement du prévisionnel annuel a pour origine une surestimation des rejets de gaz rares consécutive à une erreur analytique survenue en mars qui a impacté le bilan global.

Pour ce qui concerne les rejets de produits de fission et d'activation, la détection de Cobalt 58 sur le prélèvement filtre permanent aérosol de la cheminée de la tranche 4 durant la période du 8 au 15 mars impacte le dépassement du prévisionnel rejets.

e. Comparaison aux valeurs limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2023 avec les valeurs limites de rejets fixées par la décision ASN n° 2019-DC-0676.

Paramètres	Localisation prélèvement	Limites annuelles de rejet		Rejet	
		Prescriptions	Valeur	Valeur maximale	Valeur moyenne
Gaz rares	Installation	Activité annuelle rejetée (GBq)	4,80E+04	7,53E+02	S.O
	Cheminée n°1	Débit instantané (Bq/s)	4,50E+06 ⁽²⁾	2,31E+05	1,81E+05
	Cheminée n°2	Débit instantané (Bq/s)	4,50E+06 ⁽²⁾	1,69E+05	1,07E+05
	Cheminée n°3	Débit instantané (Bq/s)	4,50E+06 ⁽²⁾	2,41E+05	1,34E+05
	Cheminée n°4	Débit instantané (Bq/s)	4,50E+06 ⁽²⁾	2,27E+05	1,54E+05
Carbone 14	Installation	Activité annuelle rejetée (GBq)	2,80E+03	1,14E+03	S.O
Tritium	Installation	Activité annuelle rejetée (GBq)	8,00E+03	2,02E+03	S.O
	Cheminée n°1	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+05 ⁽¹⁾	3,44E+04	1,57E+04
	Cheminée n°2	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+05 ⁽¹⁾	2,09E+04	1,35E+04
	Cheminée n°3	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+05 ⁽¹⁾	2,84E+04	1,51E+04
	Cheminée n°4	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+05 ⁽¹⁾	3,36E+04	1,99E+04
Iodes	Installation	Activité annuelle rejetée (GBq)	1,20E+00	4,32E-02	S.O
	Cheminée n°1	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+01 ⁽³⁾	2,14E+00	3,35E-01
	Cheminée n°2	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+01 ⁽³⁾	1,33E+00	3,42E-01
	Cheminée n°3	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+01 ⁽³⁾	2,50E+00	4,08E-01
	Cheminée n°4	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+01 ⁽³⁾	1,70E+00	2,84E-01
Autres produits de fission et produits d'activation	Installation	Activité annuelle rejetée (GBq)	2,00E-01	7,53E-03	S.O
	Cheminée n°1	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+01 ⁽³⁾	6,35E-01	7,95E-02
	Cheminée n°2	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+01 ⁽³⁾	8,26E-02	4,49E-02
	Cheminée n°3	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+01 ⁽³⁾	1,22E-01	5,14E-02
	Cheminée n°4	Débit instantané (Bq/s)	5,00E+01 ⁽³⁾	1,05E+00	7,13E-02

⁽¹⁾ Ce débit d'activité peut être dépassé sans toutefois que le débit d'activité pour l'ensemble du site de Paluel ne dépasse 2.10^6 Bq/s.

⁽²⁾ Ce débit d'activité peut être dépassé sans toutefois que le débit d'activité pour l'ensemble du site de Paluel ne dépasse $1,8.10^7$ Bq/s.

⁽³⁾ Ce débit d'activité peut être dépassé sans toutefois que le débit d'activité pour l'ensemble du site de Paluel ne dépasse 2.10^2 Bq/s.

*Correspond à l'activité annuelle rejetée

Commentaires : Les rejets radioactifs à l'atmosphère respectent les valeurs limites de rejets de la décision ASN n°2019-DC-0676. Les débits instantanés ont respecté les valeurs de la décision ASN tout au long de l'année 2023.

2. Evaluation des rejets diffus d'effluents radioactifs à l'atmosphère

Les rejets radioactifs diffus ont notamment pour origine :

- les événements de réservoirs d'entreposage des effluents radioactifs (T, S), le réservoir de stockage de l'eau borée pour le remplissage des piscines,
- les rejets de vapeur du circuit secondaire par le système de décharge à l'atmosphère, susceptibles de renfermer de la radioactivité en cas d'inétanchéité des tubes de générateurs de vapeur.

Ces rejets, ne transitant pas par la cheminée instrumentée, sont dits « diffus », et font l'objet d'une estimation mensuelle par calcul visant notamment à s'assurer de leur caractère négligeable.

Les cumuls mensuels des rejets diffus d'effluents radioactifs à l'atmosphère sont donnés dans le tableau suivant.

	Volume des rejets diffus (m ³)	Rejets de vapeur du circuit secondaire		Rejets au niveau des événements des réservoirs d'eau de refroidissement des piscines et d'entreposage des effluents liquides	
		Tritium (Bq)	Iodes (Bq)	Tritium (Bq)	Iodes (Bq)
Janvier	1,21E+04	/	/	1,755E+08	/
Février	3,41E+04	3,165E+09	/	8,740E+07	/
Mars	3,14E+04	2,415E+09	/	9,880E+07	/
Avril	3,90E+04	2,260E+09	/	7,646E+07	/
Mai	2,10E+04	/	/	5,651E+07	/
Juin	1,83E+04	1,150E+09	/	1,766E+07	/
Juillet	2,06E+04	6,500E+08	/	8,115E+07	/
Août	1,44E+04	/	/	1,360E+08	/
Septembre	1,60E+04	1,505E+09	/	7,801E+07	/
Octobre	2,23E+04	1,405E+09	/	1,595E+08	/
Novembre	6,77E+04	7,600E+09	/	1,566E+08	/
Décembre	2,12E+04	/	/	9,435E+07	/
TOTAL ANNUEL	3,18E+05	2,02E+10	/	1,22E+09	/

3. Evaluation des rejets diffus d'effluents à l'atmosphère non radioactifs

Les CNPE engendrent également des rejets d'effluents à l'atmosphère non radioactifs dont les origines sont :

- Le lessivage chimique des générateurs de vapeur : l'encrassement des générateurs de vapeur peut nécessiter un lessivage chimique à l'origine de rejets chimiques à l'atmosphère (ammoniac...) qui nécessitent une autorisation administrative ; ces rejets

sont, soit mesurés, soit estimés par calcul en fonction des quantités de produits chimiques utilisés.

- Les émissions des groupes électrogènes de secours : les groupes électrogènes de secours composés de moteurs diesel, les Turbines à Combustion (TAC) et les Diesels d'Ultime Secours (DUS) fonctionnant au gasoil sont destinés uniquement à alimenter des systèmes de sécurité et/ou à prendre le relais de l'alimentation électrique principale en cas de défaillance de celle-ci. Ils ont donc un rôle majeur en termes de sûreté nucléaire. Les émissions des gaz de combustion (SO₂, NO_x) de ces matériels de petites puissances sont faibles sachant qu'ils ne fonctionnent que peu de temps (moins de 50 h/an par diesel) lors des essais périodiques ou d'incidents.
- Les émissions de fluides frigorigènes. En effet, un CNPE est équipée de groupes frigorifiques pour assurer la production d'eau glacée et pour la réfrigération des locaux techniques et administratifs. Ces matériels utilisent des produits pouvant accroître l'effet de serre. Le fonctionnement des matériels et les opérations de maintenance conduisent à des émissions de fluides frigorigène. Ces émissions sont réglementairement déclarées et comptabilisées et des actions sont prises pour remédier à la situation.
- Les opérations de maintenance effectuées dans les bâtiments réacteur des CNPE : Lors de ces opérations, une quantité plus ou moins importante de calorifuges est changée par des produits neufs. Pendant les phases de montée en température correspondant à la remise en service des installations, certains types de calorifuges émettent, par dégradation thermique, des vapeurs formolées dans l'enceinte, qui peuvent être à l'origine de rejets de monoxyde de carbone.
- Le conditionnement de circuit à l'arrêt : à l'occasion des arrêts de tranche pour une durée supérieure à une semaine, la conservation humide des générateurs de vapeur permet de s'affranchir du risque de corrosion des matériaux constitutifs et de disposer d'une barrière biologique (écran d'eau) pour réaliser des travaux environnants. Les générateurs de vapeur sont alors remplis avec de l'eau déminéralisée conditionnée à l'hydrazine et additionnée avec de l'ammoniaque dans des proportions définies dans les spécifications chimiques de conservation à l'arrêt.

a. Rejets d'oxyde de soufre et d'azote

La quantité annuelle évaluée d'oxyde de soufre (SO_x) et d'azote (NO_x) rejetée dans l'atmosphère lors du fonctionnement périodique des groupes électrogènes de secours (moteurs Diesels) ayant fonctionné pendant 521 heures, des turbines à combustion (TAC) ayant fonctionné pendant 51,5 heures et diesels d'ultime secours (DUS) ayant fonctionné pendant 155,5 heures, au total sur les 4 tranches pour 2023 est de :

Paramètre	Unité	Groupes électrogènes	TAC DUS	TOTAL
SO _x	kg	5	2	7
NO _x	kg	105784	53319	159103

b. Rejets de formaldéhyde et de monoxyde de carbone

En 2023, 209,4 m³ de calorifuges, dont 13,4 m³ dans les enceintes des bâtiments réacteurs 1, 3 et 4, ont été renouvelés. Ce volume donne une estimation des concentrations maximales ajoutées dans l'atmosphère.

Concentration calculée	Unité	Paramètres	EBA	ETY
Concentration maximale ajoutée dans l'atmosphère	mg/m ³	Formaldéhyde	2,22E-03	5,01E-05
		Monoxyde de carbone	2,07E-03	4,67E-05

c. Rejets de substances volatiles en lien avec le conditionnement de circuits à l'arrêt

Les tranches n°3 et 4 ont fait l'objet en octobre 2023 d'une modification du mode de conditionnement du circuit secondaire. Ces tranches utilisent dorénavant de l'éthanolamine pour le conditionnement chimique des installations.

L'estimation du rejet des espèces volatiles est la suivante :

Paramètre	Unité	TOTAL
Ammoniac	kg	146.22
Ethanolamine		20.025

d. Bilan des émissions gaz à effet de serre et de fluides frigorigènes

Un bilan des émissions de gaz à effet de serre et de fluides frigorigènes est réalisé annuellement par le CNPE de Paluel. L'estimation des émissions de gaz à effet de serre et de fluides frigorigènes est la suivante :

Paramètre	Masse en kg	Tonne équivalent CO ₂
Chloro-fluoro-carbone (CFC)	0	0
Hydrogéo-chloro-fluor-carbone (HCFC)	0	0
Hydrogéo-fluoro-carbone (HFC)	140	201,232
Hexafluorure de soufre (SF ₆)	209,7	5284,44
Total des émissions de GES en tonne équivalent CO₂		5485,672

Dans le respect de la réglementation relative aux systèmes d'échanges de quota d'émissions de gaz à effet de serre, le CNPE déclare chaque année les émissions de CO₂ provenant de l'activité de combustion de combustibles dans les installations dont la puissance thermique totale de combustion est supérieure à 20 MW. Pour l'année 2023, les émissions liées à cette activité représentent 1058,28 tonnes équivalent CO₂.

L'équivalent CO₂ total des émissions de GES du CNPE constituées des pertes de fluides frigorigène et SF₆ et de la combustion des diesels de secours, représente 0,169 gCO₂ / kWh électrique produit, la production annuelle nette d'électricité ayant été de 32,5 TWh sur l'année 2023.

Commentaire : Le CNPE de Paluel enregistre pour 2023 une émission de SF₆ plus importante que les années précédentes. Cette émission résulte d'un évènement décrit dans le paragraphe V.1 de la Partie I.

4. Principales opérations de maintenance intervenues sur les équipements et ouvrages de rejets d'effluents à l'atmosphère

L'année 2023 n'a pas été concernée par des actions de maintenance (hors maintenance programmée) et aucune intervention ou opération de maintenance anticipée n'ont été nécessaires.

5. Opérations exceptionnelles de rejets d'effluents à l'atmosphère

Le CNPE de Paluel n'a pas réalisé d'opération exceptionnelle de rejets d'effluents à l'atmosphère en 2023.

II. Rejets d'effluents liquides

1. Rejets d'effluents liquides radioactifs

Lorsque l'on exploite un CNPE, des effluents liquides radioactifs sont produits :

- Les effluents provenant du circuit primaire dits « effluents primaires hydrogénés » contiennent des gaz de fission (xénon, iodes, césiums, ...) et des produits d'activation (cobalts, manganèse, tritium, carbone 14...) et de fission. Ces effluents sont essentiellement produits en phase d'exploitation du fait des mouvements d'eau primaire effectués lors des variations de puissance ou de l'ajustement des paramètres chimiques de l'eau du réacteur.
- Les effluents issus des circuits auxiliaires dits « effluents usés » constituent le reste des effluents. Ils résultent principalement des opérations de maintenance nécessitant des vidanges de circuit (filtres, déminéraliseurs, échangeurs...), des opérations d'évacuation du combustible usé et de conditionnement des résines usées, des actions de maintien de la propreté des installations (lavage du sol et du linge).

La totalité de ces effluents est collectée, puis traitée, pour retenir l'essentiel de la radioactivité.

Les effluents issus du circuit primaire sont dirigés vers le circuit de Traitement des Effluents Primaires (TEP). Celui-ci comprend une chaîne de filtration et de déminéralisation, un dégazeur permettant d'envoyer les gaz dissous vers le système de Traitement des Effluents Gazeux (TEG), et une chaîne d'évaporation permettant de séparer l'effluent traité en un distillat (eau) d'activité volumique faible pouvant être recyclé ou rejeté le cas échéant, et en un concentrat renfermant le bore, qui est généralement recyclé vers le circuit primaire.

Les effluents liquides oxygénés recueillis dans les puisards des différents locaux sont dirigés vers le circuit de Traitement des Effluents Usés (TEU) où ils sont traités. Collectés sélectivement suivant plusieurs catégories (résiduaire, chimiques, planchers, servitudes), le traitement de ces effluents, approprié à leurs caractéristiques physico-chimiques, peut se faire :

- par filtration et déminéralisation (résines échangeuses d'ions) permettant de retenir l'essentiel de la radioactivité,
- sur chaîne d'évaporation, permettant d'obtenir d'une part un distillat épuré chimiquement et d'activité faible, et d'autre part un concentrat composé principalement d'acide borique,
- par filtration pour les drains de planchers et servitudes (laverie, douches...) peu radioactifs.

Les effluents sont ensuite acheminés vers des réservoirs d'entreposage dénommés réglementairement T ou S, où ils sont analysés, sur le plan radioactif et sur le plan chimique, avant d'être rejetés, en respectant la réglementation.

Les eaux issues des salles des machines (groupe turbo-alternateur) ne sont pas considérées comme des effluents radioactifs au sens de la réglementation (article 2.3.3 de la décision

n°2017-DC-0588). Ces eaux sont collectées sans traitement préalable vers des réservoirs dénommés réglementairement Ex où elles sont contrôlées avant d'être rejetées.

a. Règles spécifiques de comptabilisation

Ces règles s'appuient en premier lieu sur la définition de « spectres de référence », en fonction du type de rejet (liquides ou atmosphériques). Ces rejets sont constitués d'une liste de radionucléides à identifier par les moyens de mesure adéquats. Cette liste a été déterminée par une étude réalisée de 1996 à 1999 sur l'ensemble du parc des CNPE d'EDF. Toutes les substances figurant dans plus de 90 % des analyses figurent dans cette liste. Des radionucléides comme l'iode, peu présent dans les rejets, figurent également dans cette liste, mais pour des raisons historiques.

La deuxième règle fondamentale consiste à déclarer obligatoirement une activité rejetée pour les radionucléides appartenant à ces différents « spectres de référence ». Les radionucléides dont l'activité mesurée est inférieure au seuil de décision¹ donnent lieu à une comptabilisation d'activité rejetée égale au SD.

Les cumuls mensuels sont établis par sommation des activités rejetées pour chacune des catégories d'effluents du mois considéré (T, S, Ex). Les cumuls annuels sont égaux à la somme des cumuls mensuels.

b. Spectre de référence des rejets d'effluents radioactifs liquides

Le bilan des rejets d'effluents radioactifs liquides est déterminé pour chacune des quatre familles de radionucléides réparties comme suit :

- le Tritium,
- le Carbone 14,
- les Iodes,
- les autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta et/ou gamma (PF-PA).

Le tableau ci-dessous est un rappel du spectre de référence des rejets radioactifs liquides.

Paramètres	Radionucléide
Tritium	³ H
Carbone 14	¹⁴ C
Iodes	¹³¹ I
Produits de fission et d'activation	⁵⁴ Mn
	⁶³ Ni
	⁵⁸ Co
	⁶⁰ Co
	^{110m} Ag
	^{123m} Te
	¹²⁴ Sb
	¹²⁵ Sb
	¹³⁴ Cs
¹³⁷ Cs	

¹ D'après le Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de l'IRSN : « Le seuil de décision est la valeur minimale que doit avoir la mesure d'un échantillon pour que le métrologue puisse « décider » que cette activité est présente et donc mesurée. En dessous de cette valeur, l'activité de l'échantillon est donc trop faible pour être estimée. Ce seuil de décision dépend de la performance et du rayonnement ambiant autour des moyens métrologiques utilisés. »

c. Cumul mensuel

Le cumul mensuel des rejets d'effluents radioactifs liquides est donné dans le tableau suivant :

	131I (GBq)	110mAg (GBq)	123mTe (GBq)	124Sb (GBq)	125Sb (GBq)	134Cs (GBq)	137Cs (GBq)	51Cr (GBq)	54Mn (GBq)	58Co (GBq)	60Co (GBq)	95Nb (GBq)	95Zr (GBq)	63Ni (GBq)
Janvier	9,941E-04	1,118E-03	6,624E-04	1,871E-03	2,943E-03	1,066E-03	1,324E-03	/	1,450E-03	1,648E-02	3,177E-02	/	/	1,358E-02
Février	9,490E-04	1,112E-03	6,896E-04	1,547E-03	2,907E-03	1,110E-03	1,216E-03	/	1,462E-03	5,557E-02	4,525E-02	/	/	1,631E-02
Mars	1,043E-03	1,407E-03	7,450E-04	1,097E-03	3,049E-03	1,163E-03	1,320E-03	/	1,325E-03	1,612E-02	2,148E-02	/	/	8,961E-03
Avril	6,307E-04	7,442E-04	4,712E-04	1,057E-03	1,853E-03	7,394E-04	1,007E-03	/	1,200E-03	1,579E-02	2,796E-02	/	/	1,041E-02
Mai	7,347E-04	8,524E-04	5,431E-04	3,527E-03	2,214E-03	1,483E-03	2,883E-03	9,581E-03	1,651E-03	5,381E-02	4,424E-02	/	/	1,139E-02
Juin	2,959E-04	1,016E-03	2,088E-04	1,250E-03	8,819E-04	3,624E-04	3,655E-04	3,217E-03	4,167E-04	3,431E-02	1,021E-02	/	/	5,402E-03
Juillet	1,013E-03	2,526E-03	2,287E-03	4,564E-03	2,925E-03	1,080E-03	1,904E-03	/	1,335E-03	6,447E-02	2,240E-02	/	/	1,033E-02
Août	1,145E-03	2,451E-03	1,393E-03	4,791E-03	3,237E-03	1,217E-03	1,492E-03	/	1,719E-03	5,962E-02	3,380E-02	/	/	2,594E-02
Septembre	7,482E-04	7,942E-04	1,280E-03	8,175E-04	2,147E-03	8,143E-04	8,864E-04	/	1,115E-03	3,568E-02	2,017E-02	/	/	1,020E-02
Octobre	1,158E-03	2,060E-03	1,468E-03	1,254E-03	3,360E-03	1,267E-03	1,726E-03	/	1,688E-03	4,214E-02	2,973E-02	/	/	2,348E-02
Novembre	1,398E-03	1,831E-03	1,008E-03	2,005E-03	4,062E-03	1,446E-03	1,727E-03	2,408E-03	1,610E-03	2,731E-02	2,952E-02	/	/	2,850E-02
Décembre	1,093E-03	3,036E-03	8,129E-04	1,240E-03	3,234E-03	1,259E-03	1,387E-03	/	1,830E-03	3,374E-02	3,357E-02	4,320E-03	1,920E-03	3,461E-02
TOTAL ANNUEL	1,12E-02	1,89E-02	1,16E-02	2,50E-02	3,28E-02	1,30E-02	1,72E-02	1,52E-02	1,68E-02	4,55E-01	3,50E-01	4,32E-03	1,92E-03	1,99E-01

	Volumes rejetés (m3)	Iodes (GBq)	Autres PF et PA (GBq)*	Tritium (GBq)	Carbone 14 (GBq)
Janvier	4,21E+03	9,941E-04	7,227E-02	1,615E+04	4,483E+00
Février	4,06E+03	9,490E-04	1,272E-01	7,884E+03	2,980E+00
Mars	4,82E+03	1,043E-03	5,667E-02	8,897E+03	3,225E+00
Avril	2,99E+03	6,307E-04	6,123E-02	6,330E+03	1,021E+00
Mai	3,43E+03	7,347E-04	1,322E-01	4,874E+03	1,708E+00
Juin	1,31E+03	2,959E-04	5,765E-02	9,684E+02	2,522E-01
Juillet	4,47E+03	1,013E-03	1,138E-01	7,099E+03	1,349E+00
Août	5,04E+03	1,145E-03	1,357E-01	1,247E+04	4,524E+00
Septembre	3,30E+03	7,482E-04	7,390E-02	7,108E+03	1,823E+00
Octobre	5,23E+03	1,158E-03	1,082E-01	1,404E+04	4,720E+00
Novembre	6,79E+03	1,398E-03	1,014E-01	1,373E+04	3,843E+00
Décembre	5,45E+03	1,093E-03	1,210E-01	8,275E+03	3,336E+00
TOTAL ANNUEL	5,11E+04	1,12E-02	1,16E+00	1,08E+05	3,33E+01

Il a été vérifié que les rejets ne présentent pas d'activité volumique alpha globale d'origine artificielle supérieure aux seuils de décision.

Commentaires :

Un réservoir EX vidangé le lundi 2 janvier 2023 a révélé une activité en tritium supérieure au seuil de 400 Bq/l. Le dépassement observé a pour principale origine une recrudescence des mouvements d'eau réalisés sur les tranches 2 et 4 consécutivement à des variations de l'énergie brute produite par les deux installations. Il est à noter que pendant la période de remplissage du réservoir, l'apport principal des effluents provenait des tranches 2 et 4 avec un complément en provenance des tranches 1 et 3 alors en fonctionnement à pleine puissance.

Les deux réservoirs Ex identifiés PAL-2023-R-SEK-0125 (0SEK103BA) et PAL-2023-R-SEK-0126 (0SEK101BA) vidangés lors du mois de juin ont révélé une activité en tritium supérieure à 400 Bq/l. L'origine de cette activité est la vidange de tuyauteries via le puisard Ex de la salle des machines tranche 1 dans le cadre d'une activité de maintenance réalisée sur plusieurs vannes du circuit de rejet des effluents liquides. En effet, les réservoirs concernés étaient lignés en remplissage lors de la collecte de ces effluents de purge.

Pour ce qui concerne le mois de juillet, les réservoirs EX identifiés PAL-2023-R-SEK-0127 Ex4 (0SEK104BA), PAL-2023-R-SEK-0128 Ex3 (0SEK103BA) et PAL-2023-R-SEK-0129 Ex1 (0SEK101BA) ont révélé une activité en tritium supérieure à 400 Bq/l. L'origine de cette activité est la vidange de tuyauteries via le puisard EX de la salle des machines tranche 1 dans le cadre d'une activité de maintenance réalisée sur plusieurs vannes du circuit de rejet des effluents liquides. En effet, les réservoirs concernés étaient lignés en remplissage lors de la collecte de ces effluents de purge.

De plus, pour le mois de septembre les réservoirs EX identifiés PAL-2023-R-SEK-0168, PAL-2023-R-SEK-0171 Ex1 (0SEK10BA), PAL-2023-R-SEK-0169, PAL-2023-R-SEK-0173, PAL-2023-R-SEK-0174 Ex4 (0SEK104BA) et PAL-2023-R-SEK-0169, PAL-2023-R-SEK-0169 Ex3 (0SEK103BA) ont révélé une activité en tritium supérieure à 400 Bq/l. L'activité contenue dans le circuit secondaire de la tranche 3 est à l'origine de ces valeurs. En effet, les réservoirs concernés étaient lignés en remplissage lors de la collecte de ces effluents de purge issus de la salle des machines de la tranche 3.

Enfin, les réservoirs EX identifiés PAL-2023-R-SEK-0176 EX1 (0SEK101BA), PAL-2023-R-SEK-0177 Ex3 (0SEK103BA), PAL-2023-R-SEK-0178, PAL-2023-R-SEK-0196 Ex4 (0SEK104BA) et PAL-2023-R-SEK-0185 Ex2 (0SEK102BA) vidangés lors du mois d'octobre ont révélé une activité en tritium supérieure à 400 Bq/l. L'activité contenue dans le circuit secondaire de la tranche 3 est à l'origine de ces valeurs. En effet, les réservoirs concernés étaient lignés en remplissage lors de la collecte de ces effluents de purge issus de la salle des machines de la tranche 3.

d. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejet de l'année 2023 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2023 pour les tranches en fonctionnement.

	Rejets par catégorie de radionucléides (GBq)			
	Tritium	Carbone 14	Iodes (MBq)	Autres PA et PF (MBq)*
2021	9,36E+04	3,13E+01	1,02E-02	1,14E+00
2022	1,02E+05	3,65E+01	1,04E-02	1,19E+00
2023	1,08E+02	3,33E+01	1,12E-02	9,62E-01
Prévisionnel 2023	1,30E+02	4,00E+01	1,00E-02	1,30E+00

Commentaires : Les rejets radioactifs liquides sont cohérents avec les valeurs du prévisionnel 2023. Il est toutefois à noter que la prolongation des arrêts de tranches en lien avec des fortuits en 2023 a induit une diminution de l'activité en tritium rejetée sous forme liquide. En effet, le cumul annuel atteint à fin 2023 s'élève à 108 TBq pour un prévisionnel de 130 TBq.

e. Comparaison aux limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2023 avec les valeurs limites de rejets fixées par la décision ASN n° 2019-DC-676 pour les tranches en fonctionnement.

Paramètres	Limites annuelles de rejet		Rejet
	Prescriptions	Valeur	Valeur (GBq)
Tritium	Activité annuelle rejetée (GBq)	1.60E+05	1.08E+02
	Débit instantané (Bq/s)	800 x D	2,14E+07
Carbone 14	Activité annuelle rejetée (GBq)	3.80E+02	3.33E+01
Iodes	Activité annuelle rejetée (GBq)	2.00E-01	1.12E-02
	Débit instantané (Bq/s)	1 x D	2,07E+00
Autres PA et PF	Activité annuelle rejetée (GBq)	2.00E+01	9.62E-01
	Débit instantané (Bq/s)	7 x D	4,98E+02

Commentaires : Les limites réglementaires de rejets ont été respectées. Le débit d'activité exprimé pour un débit D_1 (exprimé en L/s) dans l'ouvrage de rejet n°1 ou n°2, n'excède pas, en valeur moyenne sur 24 heures, les limites prescrites par la Décision ASN.

Le débit D est généralement de 43 000 L/s, ce dernier peut baisser à la valeur de 21 500 L/s lorsqu'une pompe de circulation d'eau de mer est stoppée sur l'installation vers laquelle les rejets sont orientés.

f. Surveillance des eaux réceptrices

Des prélèvements d'eau de mer sont réalisés lors de chaque rejet d'effluents liquides radioactifs (à mi-rejet). Des prélèvements journaliers sont également réalisés en dehors des périodes de rejet. Plusieurs analyses sont réalisées sur ces échantillons d'eau filtrée (mesure de bêta globale, du tritium et de la teneur en potassium sur l'eau et mesures de l'activité bêta globale sur les matières en suspension). Ces analyses permettent de s'assurer du respect des valeurs d'activité volumique limites fixées par la réglementation.

Les résultats des mesures réalisées sur les eaux de surface pour l'année 2023 sont donnés dans le tableau suivant (valeurs moyennes et maximales).

Paramètre analysé	Activité volumique horaire à mi-rejet			Activité volumique : moyenne journalière			
	Valeur moyenne mesurée en 2023	Valeur maximale mesurée en 2023	Limite réglementaire	Valeur moyenne mesurée en 2023	Valeur maximale mesurée en 2023	Limite réglementaire	
Eau filtrée	Activité bêta globale	1,15E+01 Bq/L	1,25E+01 Bq/L	1,80E+01 Bq/L	-	-	-
	Tritium	3,13E+02 Bq/L	6,33E+02 Bq/L	1,80E+03 Bq/L	7,65E+01 Bq/L	4,87E+02 ⁽¹⁾ / 9,6E+01 ⁽²⁾ Bq/L	9,00E+02 ⁽¹⁾ / 1,00E+02 ⁽²⁾ Bq/L
	Potassium	4,06E+02 mg/L	4,45E+02 mg/L	-	-	-	-
Matières en suspension	Activité bêta globale	2,00E-02 Bq/L	4,45E-01 Bq/L	-	-	-	-

(1) en présence de rejets radioactifs / (2) en l'absence de rejets radioactifs

Commentaires : Les mesures de surveillance dans les eaux de surface pour l'année 2023 sont cohérentes avec les valeurs attendues du fait des rejets d'effluents autorisés du CNPE. Les mesures d'activité bêta globale et de l'activité en tritium dans l'eau sont très inférieures aux limites réglementaires.

2. Rejets d'effluents liquides chimiques

Le fonctionnement d'un CNPE nécessite l'utilisation de substances chimiques et donne lieu à des rejets chimiques par voie liquide dans l'environnement.

Ces rejets d'effluents chimiques sont issus :

- des produits de conditionnement des circuits primaire, secondaire et auxiliaires utilisés pour garantir l'intégrité des matériels contre la corrosion (rejets chimiques associés aux effluents radioactifs ou non)
- de la production d'eau déminéralisée,
- du traitement des eaux vannes (eaux rejetées par les installations domestiques),
- des traitements des circuits du refroidissement à l'eau brute contre les dépôts de tartre et le développement des micro-organismes.

Les eaux vannes issues du CNPE de Paluel sont traitées par la station d'épuration propre au CNPE de Paluel.

Les principales substances utilisées sont :

- l'acide borique (H_3BO_3) : le bore contenu dans cet acide est « avide » des neutrons produits lors de la réaction nucléaire. C'est une substance neutrophage, qui permet donc le contrôle de la réaction de fission et donc le pilotage du réacteur. Ce bore est dissous dans l'eau du circuit primaire.
- la lithine ($LiOH$) : ce produit est utilisé pour maintenir le pH du circuit primaire. En effet, le bore est sous forme acide. Pour éviter les effets de corrosion liés à cet acide, de la lithine est ajoutée à l'eau du circuit primaire afin d'ajuster le pH à celui de moindre corrosion. La concentration en lithine est donc directement liée à celle du bore.
- l'hydrazine (N_2H_4) : ce produit est utilisé principalement dans le circuit secondaire comme un agent anti-oxydant. Il permet d'éliminer l'oxygène dissous dans le mélange eau-vapeur, et ainsi maintenir là aussi un pH de moindre corrosion du circuit secondaire.
- La morpholine (C_4H_9NO), l'éthanolamine (C_2H_7NO) et l'ammoniaque (NH_4OH) sont des amines volatiles qui peuvent être employées, seules ou en combinaison, pour maintenir le bon pH dans le circuit secondaire. Elles complètent l'action de l'hydrazine. Le mode de conditionnement du circuit secondaire a évolué avec les années pour tenir compte du retour d'expérience interne et étranger. L'éthanolamine (C_2H_7NO), utilisée sur quelques CNPE, constitue une alternative intéressante à la morpholine, en particulier pour la protection des pièces internes des générateurs de vapeur et des purges des sécheurs-surchauffeurs de la turbine.
- le phosphate trisodique (Na_3PO_4) : comme l'hydrazine, le phosphate est utilisé pour le conditionnement des circuits de refroidissement intermédiaires.
- les détergents : ces produits sont régulièrement utilisés pour le nettoyage des locaux industriels ; qu'ils soient en ou hors zone contrôlée. Ils sont également utilisés à la laverie du CNPE pour le nettoyage des tenues d'intervention.

Par ailleurs, l'abrasion et la corrosion naturelles des tubes en laiton des condenseurs peut entraîner des rejets de cuivre et de zinc.

Les autres rejets chimiques réglementés ont pour origine l'installation de production d'eau déminéralisée, le traitement des eaux vannes et usées, dans la station d'épuration, ainsi que le traitement des eaux potentiellement huileuses issues de la salle des machines, des transformateurs principaux. Les rejets des eaux pluviales sont également réglementés au niveau des émissaires de rejet.

Pour lutter contre les salissures biologiques, l'eau de mer alimentant les circuits de refroidissement des sites marins est traitée, du printemps à l'automne, à l'eau de Javel

(hypochlorite de sodium) produite in situ par électrolyse de l'eau de mer. Le traitement biocide des circuits ouverts de refroidissement des sites marins conduit à des rejets de composés organohalogénés dont le principal est le bromoforme.

a. Etat des connaissances sur la toxicité de l'éthanolamine et de ses produits dérivés

Les tranches n°3 et 4 ont fait l'objet en octobre 2023 d'une modification du mode de conditionnement du circuit secondaire. En effet, ces tranches font dorénavant usage d'éthanolamine en complément des autres substances déjà en utilisation pour le conditionnement chimique des installations.

Il n'y a pas d'évolution récente des connaissances sur la toxicité de l'éthanolamine et des sous-produits associés. En revanche, une évolution des connaissances sur la toxicité de la morpholine a été identifiée en 2019. De même, une substance formée à partir de la réaction de nitrosation d'un sous-produit de la morpholine a été identifiée récemment. Ces évolutions sont présentées ci-après.

Les principaux effets connus sont rappelés ci-après.

- L'éthanolamine a des propriétés irritantes (oculaire, cutané, brûlure d'œsophage dans le cas de l'ingestion) et corrosives. Aucune VTR issue des bases de données de référence n'est associée à cette substance.
- Les produits de dégradation de l'éthanolamine sont constitués des ions acétates, formiates, glycolates et oxalates, ainsi que de méthylamine et éthylamine. Il s'agit de substances qui sont faiblement toxiques dans les conditions de rejet. Aucune VTR issue des bases de données de référence n'est associée à ces substances.

L'étude d'impact n'a pas mis en évidence de risque sanitaire attribuable aux rejets liquides de morpholine, d'éthanolamine et de leurs produits dérivés.

b. Règles spécifiques de comptabilisation

En application de l'article 3.2.7. -I. de la décision ASN n° 2013-DC-0360 modifiée, une nouvelle règle est appliquée à compter du 1er janvier 2015 pour la comptabilisation des quantités de substances chimiques rejetées. Cette nouvelle règle consiste à retenir par convention une valeur de concentration égale à la limite de quantification divisée par deux lorsque le résultat de la mesure est en dessous de la limite de quantification des moyens métrologiques employés pour effectuer l'analyse.

c. Rejets d'effluents liquides chimiques via « l'ouvrage de rejet principal »

i. Cumul mensuel

Le cumul mensuel des rejets chimiques transitant par l'ouvrage de rejet principal est donné dans le tableau suivant :

	Acide borique (kg)	Azote total (kg)	Détergents (kg)	Hydrazine (kg)	MES (kg) (Ex, T et S)	Métaux totaux (kg)	Phosphates (kg)	Sulfates (kg) (1)	DCO (kg)	Fer total (kg) (1)	MES (kg) (1)	Ethanolamine (kg)	Cuivre (1)(2) (kg)
Janvier	9,850E+02	3,231E+02	4,205E+00	3,017E-02	4,659E+01	1,515E+00	8,553E+01	8,205E+03	6,774E+01	1,436E+02	8,785E+03	/	/
Février	8,296E+02	3,220E+02	4,058E+00	5,307E-02	7,471E+01	2,251E+00	7,418E+01	1,376E+04	1,502E+02	1,219E+02	8,705E+03	/	/
Mars	4,249E+02	2,252E+02	4,818E+00	7,054E-02	1,036E+02	1,723E+00	8,006E+01	2,114E+04	2,535E+02	2,763E+02	9,958E+03	/	5,950E-01
Avril	1,125E+03	2,546E+02	2,991E+00	5,567E-02	9,846E+01	1,698E+00	1,040E+02	1,835E+04	2,205E+02	1,670E+02	9,944E+03	/	7,930E+00
Mai	6,775E+02	2,195E+02	3,431E+00	7,954E-02	1,089E+02	3,534E+00	1,119E+02	2,325E+04	2,908E+02	2,718E+02	1,166E+04	/	6,120E+00
Juin	1,370E+02	3,796E+02	1,308E+00	3,597E-02	4,329E+01	1,960E+00	6,527E+01	1,285E+04	2,526E+02	2,019E+02	5,582E+03	/	3,530E+00
Juillet	8,222E+02	6,257E+02	4,470E+00	3,892E-02	2,713E+02	2,750E+00	1,094E+02	1,507E+04	6,591E+02	1,301E+02	5,179E+03	/	4,051E+00
Août	9,482E+02	6,231E+02	5,040E+00	3,594E-02	2,487E+02	3,876E+00	9,847E+01	1,773E+04	3,080E+02	1,209E+02	6,121E+03	/	7,598E+00
Septembre	8,092E+02	7,155E+02	4,082E+00	2,541E-02	1,796E+02	2,566E+00	3,463E+01	1,498E+04	4,947E+01	1,118E+02	4,583E+03	/	4,362E+00
Octobre	1,273E+03	5,785E+02	5,230E+00	4,322E-02	1,363E+02	2,201E+00	4,398E+01	1,730E+04	1,910E+02	1,212E+02	6,230E+03	2,929E-01	4,251E+00
Novembre	9,809E+02	3,801E+02	7,572E+00	1,418E-01	3,487E+02	5,735E+00	1,361E+02	3,179E+04	3,112E+02	3,735E+02	1,189E+04	3,056E+00	5,310E+00
Décembre	1,021E+03	4,240E+02	5,556E+00	5,038E-02	1,693E+02	1,760E+00	3,300E+01	1,163E+04	1,967E+02	1,733E+02	8,362E+03	5,284E-01	2,570E+00
TOTAL ANNUEL	1,00E+04	5,07E+03	5,28E+01	6,73E-01	1,83E+03	3,16E+01	9,76E+02	2,06E+05	2,95E+03	2,21E+03	9,70E+04	3,880E+00	4,63E+01

(1) Station de déminéralisation

(2) Substance Cuivre : détermination par calcul des bilans rejet à partir des quantités de réactifs employées lors de la mise en œuvre du traitement des bassins de stockage d'eau brute prélevée dans la Durdent.

Le détail du cumul mensuel de la famille des métaux totaux exprimé métal par métal est présenté dans le tableau ci-dessous.

	Chrome (kg)	Cuivre (kg)	Nickel (kg)	Plomb (kg)	Zinc (kg)	Manganèse (kg)	Aluminium (kg)	Fer (kg)	Métaux totaux (kg)
Janvier	3,017E-02	2,554E-01	3,017E-02	1,207E-02	2,368E-01	6,713E-02	2,229E-01	1,442E+02	1,515E+00
Février	2,329E-02	1,024E-01	2,329E-02	1,954E-02	1,815E-01	4,117E-02	9,314E-02	6,844E+01	1,122E+00
Mars	6,593E-02	1,953E-01	6,593E-02	3,167E-02	2,564E-01	1,069E-01	2,637E-01	7,368E-01	1,723E+00
Avril	4,743E-02	2,724E-01	4,743E-02	2,795E-02	2,166E-01	6,538E-02	2,735E-01	7,471E-01	1,698E+00
Mai	2,447E-02	1,781E-01	2,447E-02	8,101E-02	1,305E-01	8,657E-02	1,143E-01	2,077E+02	1,420E+00
Juin	2,085E-02	3,018E-01	2,085E-02	5,894E-02	2,563E-01	8,547E-02	2,820E-01	2,028E+02	1,960E+00
Juillet	3,892E-02	2,553E-01	3,892E-02	3,032E-02	4,092E-01	1,221E-01	4,202E-01	1,315E+02	2,750E+00
Août	3,594E-02	2,712E-01	3,594E-02	7,280E-02	5,835E-01	8,545E-02	7,523E-01	1,230E+02	3,876E+00
Septembre	2,741E-02	3,823E-01	4,623E-02	1,097E-02	1,038E+00	9,763E-02	2,093E-01	1,126E+02	2,566E+00
Octobre	4,322E-02	2,663E-01	4,322E-02	1,729E-02	3,278E-01	6,310E-02	3,055E-01	1,223E+02	2,201E+00
Novembre	1,066E-01	2,931E-01	1,066E-01	4,265E-02	4,094E-01	2,393E-01	1,682E+00	3,764E+02	5,735E+00
Décembre	5,310E-02	2,821E-01	5,310E-02	2,124E-02	3,154E-01	5,310E-02	2,124E-01	1,741E+02	1,760E+00
TOTAL ANNUUEL	4,04E-01	2,59E+00	4,23E-01	3,67E-01	3,89E+00	9,41E-01	4,29E+00	1,66E+03	2,49E+01

ii. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets d'effluents non radioactifs liquides de l'année 2023 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2023.

Substances	Unité	2021	2022	2023	Prévisionnel 2023
Acide borique	kg	1,46e+04	1,19E+04	1,00E+04	1,20e+04
Ethanolamine	kg	/	/	3,88E+00	S.O
Hydrazine	kg	8,97E-01	5,42E-01	6,73E-1	8,00E-1
Détergents	kg	5,13E+01	5,86E+01	5,28E+01	5,00E+01
Azote total	kg	3,96E+03	4,72E+03	5,07E+03	5,00E+03
Phosphates	kg	1,74E+03	1,24E+03	9,76E+02	1,50E+03
Fer (Station de déminéralisation)	kg	2,50E+03	2,03E+03	2,21E+03	2,80E+03
Métaux totaux	kg	4,18E+01	3,64E+01	3,16E+01	5,00E+01
Sulfates (Station de déminéralisation)	kg	1,62E+05	1,31E+05	2,06E+05	1,40e+05

Substances	Unité	2021	2022	2023	Prévisionnel 2023
Cuivre (Station de déminéralisation)	kg	1,47E+01	6,00E+00	4,63E+01	S.O
MES (station de déminéralisation)	kg	1,48E+05	1,38E+05	9,70E+04	S.O
MES (T, S et Ex)	kg	2,99E+03	1,46E+03	1,83E+03	S.O
DCO	kg	1,38E+03	1,47E+03	2,95E+03	S.O

Commentaires : Les quantités de substances chimiques rejetées sont globalement conformes à l'attendu et notamment au prévisionnel de prélèvements et de consommations d'eau et de rejets établi par le CNPE de Paluel à partir de la programmation des activités d'exploitation prévues pour l'année 2023.

Il est toutefois à noter que la quantité d'hydrazine rejetée sur l'année 2023 s'élève à 673 g, soit un bilan inférieur au prévisionnel annuel dimensionné à 800 g. En effet, l'optimisation des mouvements d'eau réalisés sur les installations a permis le maintien d'une capacité d'accueil suffisante dans les réservoirs de stockage pour permettre au laboratoire de totalement finaliser les phases de destruction avant rejet.

Pour ce qui concerne les phosphates, l'optimisation du conditionnement des échangeurs de réfrigération du CNPE a permis de diminuer la quantité annuelle rejetée qui s'élève pour 2023 à 976 kg pour un prévisionnel annoncé de 1 500 kg.

Pour ce qui concerne l'acide borique, les différents arrêts de tranche fortuits sur l'année 2023 ont conduit à une diminution des rejets. La quantité d'acide borique rejetée est de 10 033 kg pour une valeur prévisionnelle de 12 000 kg.

Enfin, la quantité d'acide sulfurique rejetée à la station de déminéralisation est de 206 509 kg pour une cible prévisionnelle de 140 000 kg. La mise en place d'une nouvelle pratique pour effectuer la régénération des résines de traitement de l'eau est à l'origine de cette augmentation de rejet. Cette nouvelle méthode permet de garantir une production d'eau déminéralisée plus importante entre les cycles de régénération.

iii. Comparaison aux limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2023 avec les valeurs limites de rejets fixées par la décision ASN n°2019-DC-676 pour les tranches en fonctionnement.

Substances	Limite Concentration maximale ajoutée dans l'ouvrage de rejet (mg/L)	Rejet Valeur maximale calculée dans l'ouvrage de rejet (mg/L)	Limite Flux 24h (kg)	Rejet Valeur maximal calculée	Limite Flux 2h (kg)	Rejet Valeur maximale calculée	Limite Flux annuel ajouté (kg)	Rejet Flux annuel calculé
Acide borique	3,10E+00	1,29E-01	2,50E+03	3,96E+02	5,00E+02	4,01E+01	2,00E+04	1,00E+04
Ethanolamine	9,00E-02	1,30E-05	9,80E+00	1,48E+00	/	/	S.O	3,88E+00
Hydrazine	6,00E-03	5,83E-06	1,50E+00	1,56E-02	/	/	1,80E+01	6,73E-01
Détergents	9,90E-01	5,22E-04	2,00E+02	8,06E-01	1,60E+02	1,15E-01	3,15E+03	5,28E+01
Azote total	4,00E-01	1,07E-03	1,00E+02	9,39E+01	/	/	6,30E+03	5,07E+03
Phosphates	7,40E-01	2,23E-03	2,00E+02	8,27E+00	1,20E+02	6,89E-01	3,20E+03	9,76E+02
Métaux totaux	1,00E-02	3,65E-04	/	/	/	/	3,80E+01	3,16E+01
Sulfates (station de déminéralisation)	9,64E+00	2,79E+00	2,40E+03	2,31E+03	/	/	2,50E+05	2,06E+05
Fer (station de déminéralisation)	1,90E-01	4,07E-02	3,00E+02	3,37E+01	/	/	6,80E+03	2,21E+03
Cuivre (station de déminéralisation)	2,00E-03	1,11E-03	3,00E+00	9,37E-01	/	/	1,00E+02	4,63E+01
MES (T, S et Ex)	8,65E+00	4,82E+00	7,82E+00	2,27E+00	/	/	7,00E+03	1,83E+03
MES (Station de déminéralisation)			1,56E+03	5,29E+02	/	/	3,30E+05	9,70E+04
DCO	3,00E+02	1,28E+02	2,83E+01	1,10E+01	/	/	/	2,95E+03

L'article 5.3.1 de la décision ASN n°2017-DC-0588 demande une évaluation de la quantité annuelle de lithine rejetée. En 2023, la quantité de lithine rejetée par le CNPE de Paluel est évaluée à 165 kg. Cette évaluation réalisée sur la base de la quantité de lithine consommée sur l'année correspond à la donnée brute d'entrée, sans prise en compte de la quantité dégradée par réaction chimique sur l'installation avant rejet.

Commentaires : Les rejets liquides chimiques respectent les valeurs limites annuelles de rejet de la décision ASN n°2019-DC-676.

Il est à noter que 30 réservoirs Ex et 5 réservoirs T ont fait l'objet en 2023 d'un traitement de destruction d'hydrazine avant rejet. Ces traitements réalisés à l'aide d'injection d'air et de sulfate de cuivre ont permis d'éviter le rejet de 5,215 kg d'hydrazine. Une injection de 2,30 kg de catalyseur (sulfate de cuivre) a été nécessaire sur l'année pour procéder à ces traitements. La détermination par bilan matière des rejets s'élève à 1,85 kg pour les sulfates et à 0,920 kg pour le cuivre.

d. Rejets d'effluents liquides chimiques via « eau de refroidissement rejetées via les puits de rejet tranches 1 à 4 »

Ce paragraphe présente les rejets de substances chimiques liées au traitement biocide du CNPE de Paluel pour l'année 2023.

i. Cumul mensuel

Le tableau ci-dessous présente les rejets mensuels pour chaque type de substances chimiques par voie liquide.

	Bromoformes (kg)	AOX (kg)
Janvier	/	/
Février	/	/
Mars	/	/
Avril	/	/
Mai	1,324E+03	4,480E+03
Juin	1,056E+03	3,970E+03
Juillet	1,851E+03	6,019E+03
Août	2,307E+03	6,587E+03
Septembre	4,217E+02	1,143E+03
Octobre	7,271E+00	3,367E+01
Novembre	/	/
Décembre	/	/
TOTAL ANNUUEL	6,97E+03	2,22E+04

ii. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel

Les limites réglementaires relatives aux rejets des substances chimiques liées au traitement biocide sont réglementées par la décision n°2019-DC-0676. Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets d'effluents liquides chimiques de l'année 2023 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2023.

Paramètres	Unité	2021	2022	2023	Prévisionnel 2023
AOX	kg	4,16E+04	3,63E+04	2,22E+04	8,00E+04
Bromoformes	kg	1,25E+04	1,37E+04	6,97E+03	3,00E+04

Commentaires : Les bromoformes ainsi que les oxydants résiduels sont bien inférieurs au prévisionnel rejet et consommation d'eau. En effet, la durée de fonctionnement des stations d'électrochloration a été pour l'année 2023 plus courte que celle initialement prévue. La quantité d'oxydants résiduels comptabilisée en 2023 a ainsi atteint la valeur de 22 200 kg pour un prévisionnel annoncé de 80 000 kg. La quantité de bromoformes comptabilisée a quant à elle atteint la valeur de 6 970 kg pour un prévisionnel annoncé de 30 000 kg.

iii. Comparaison aux limites et au prévisionnel

Le tableau ci-dessous présente les rejets annuels relatifs au traitement biocide de l'année 2023 avec les valeurs limites de rejet fixées par la décision ASN N°2019-DC-0676 pour chaque type de substance chimique.

Paramètres	Limite concentration maximale ajoutée (mg/L)	Rejet Valeur maximale calculée (mg/L)	Limite Flux 24h (kg)	Rejet Valeur maximale calculé Flux 24h (kg)
Oxydants résiduels	3.22E+00	7.00E-02	5.70E+03	5.18E+02
Bromoformes	4.00E-01	1.57E-02	7.15E+02	1.64E+02

Commentaires : Les valeurs respectent les valeurs limites de rejet.

e. Rejets d'effluents liquides chimiques - – Rejet des effluents issus de la station d'épuration dans l'émissaire des eaux usées et pluviales

Ce paragraphe présente les rejets de substances chimiques liées au traitement des eaux usées du CNPE de Paluel pour l'année 2023.

i. Cumul mensuel

Le tableau ci-dessous présente les rejets mensuels pour chaque type de substances chimiques par voie liquide.

	Azote global (kg)	DB05 (kg)	DCO (kg)	MES (kg)	Phosphore total (kg)
Janvier	7,284E+01	3,844E+00	6,343E+01	4,701E+01	2,249E+00
Février	4,501E+01	5,316E+00	6,379E+01	3,721E+01	2,056E+00
Mars	3,557E+01	9,240E+00	8,778E+01	4,851E+01	3,026E+00
Avril	2,471E+01	5,490E+00	6,405E+01	3,294E+01	2,196E+00
Mai	1,289E+01	1,091E+01	8,545E+01	3,636E+01	1,800E+00
Juin	6,766E+01	1,796E+01	1,098E+02	4,790E+01	4,790E-01
Juillet	1,951E+01	5,613E+00	5,426E+01	2,058E+01	2,825E+00
Août	2,071E+01	5,325E+00	5,503E+01	3,018E+01	2,041E+00
Septembre	2,162E+01	7,508E+00	5,068E+01	2,065E+01	2,665E+00
Octobre	4,808E+01	6,177E+00	5,827E+01	2,471E+01	9,677E-01
Novembre	1,350E+02	1,630E+02	3,490E+02	1,280E+02	1,360E-01
Décembre	7,685E+01	1,039E+01	9,180E+01	7,101E+01	8,487E-01
TOTAL ANNUEL	5,80E+02	2,51E+02	1,13E+03	5,45E+02	2,13E+01

ii. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets d'effluents liquides chimiques de l'année 2023 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2023.

Paramètres	Unité	2021	2022	2023	Prévisionnel 2023
Azote global	kg	1,11E+03	8,03E+02	5,80E+02	1,00E+03
DB05	kg	9,44E+01	7,84E+01	2,51E+02	/
DCO	kg	8,08E+02	8,28E+02	1,13E+03	/
MES	kg	4,16E+02	5,37E+02	5,45E+02	/
Phosphore total	kg	4,11E+01	3,47E+01	2,13E+01	4,50E+01

Commentaires : Les quantités de substances chimiques rejetées sont globalement conformes à l'attendu et notamment au prévisionnel de prélèvements et de consommations d'eau et de rejets établi par le CNPE de Paluel à partir de la programmation des activités d'exploitation prévues pour l'année 2023.

iii. Comparaison aux limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2023 avec les valeurs limites de rejets fixées par la décision ASN n° 2019-DC-0677.

Paramètres	Limites de rejet Concentration maximale avant rejet (mg/L)	Rejet Valeur maximale calculée (mg/L)	Limites de rejet Flux 24h (kg)	Rejet Valeur maximal calculée Flux 24h (kg)	Limite de rejet Flux annuel ajouté (kg)	Rejet Flux annuel ajouté (kg)
Azote global	/	/	4,00E+01	4,25E+00	/	5,80E+02
DB05	1,00E+02	9,00E+00	9,40E+00	8,01E-01	/	2,51E+02
DCO	3,00E+02	1,28E+02	2,83E+01	1,10E+01	/	1,13E+03
MES	1,00E+02	4,70E+01	9,40E+00	4,04E+00	/	5,45E+02
Phosphore total	/	/	1,26E+00	1,41E-01	/	2,13E+01

Commentaires : Les valeurs respectent les valeurs limites de rejet.

3. Principales opérations de maintenance intervenues sur les équipements et ouvrages de rejets liquides

Commentaires : L'année 2023 n'a pas été concernée par des actions de maintenance (hors maintenance programmée) et aucune intervention ou opération de maintenance anticipée n'ont été nécessaires.

4. Opérations exceptionnelles de rejets d'effluents liquides

Le CNPE de Paluel n'a pas réalisé d'opération exceptionnelle de rejet d'effluents liquides chimiques en 2023.

III. Rejets thermiques

Dans un CNPE, le fluide « eau-vapeur » du circuit secondaire suit un cycle thermodynamique au cours duquel il échange de l'énergie thermique avec deux sources de chaleur, l'une chaude, l'autre froide.

Le circuit assurant le refroidissement du condenseur (circuit tertiaire) constitue la source froide dont la température varie entre 0 °C et 30 °C environ. La source froide, nécessaire au fonctionnement, peut être apportée :

- soit directement par l'eau prélevée en rivière ou en mer dans un circuit dit ouvert,
- soit indirectement par l'air ambiant au moyen d'un aéroréfrigérant dans un circuit dit fermé.

Lorsque le CNPE est situé sur un cours d'eau à grand débit, en bord de mer ou sur un estuaire, l'eau prélevée à l'aide de pompes de circulation passe dans les nombreux tubes du condenseur où elle s'échauffe avant d'être restituée intégralement au milieu aquatique.

L'échauffement de l'eau (écart de température entre la sortie et l'entrée : $\Delta T^{\circ}\text{C}$) est lié à la puissance thermique (P_{th}) à évacuer au condenseur et au débit d'eau brute au condenseur (Q).

Afin de réduire le volume d'eau prélevée et limiter l'échauffement du milieu aquatique, le refroidissement des CNPE implantés sur des cours d'eau à faible ou moyen débit est assuré en circuit fermé au moyen d'aéroréfrigérants. Dans un aéroréfrigérant, une grande part de la chaleur extraite du condenseur est transférée directement à l'atmosphère sous forme de chaleur latente de vaporisation (75 %) et sous forme de chaleur sensible (25 %). Le reste de la chaleur est rejeté au cours d'eau par la purge. La purge de l'aéroréfrigérant constitue donc le rejet thermique de l'installation.

Les contrôles destinés à s'assurer du respect des limites réglementaires s'appuient sur des mesures de températures réalisées dans le rejet et dans l'environnement ou sur des calculs effectués à partir de paramètres physiques tels que le rendement thermodynamique, l'énergie électrique produite, les débits de rejet et du cours d'eau.

1. En conditions climatiques normales

Les rejets thermiques issus du circuit de refroidissement du CNPE de PALUEL et des différents circuits secondaires nécessaires à son fonctionnement doivent respecter les limites fixées dans la décision ASN n°2019-DC-676 et n°2019-DC-677.

Le CNPE de Paluel réalise en continu des mesures de températures dans les puits de rejet. Ces mesures représentatives des températures des eaux de refroidissement en sortie des galeries de rejet sont complétées d'une mesure de température réalisée quotidiennement en entrée des condenseurs.

Un suivi des rejets thermiques est réalisé conformément aux autorisations de rejet en vigueur dans lesquelles les limites suivantes sont prescrites.

- Le respect d'un écart maximum de 15°C entre la température du rejet et de la température du milieu
- Le respect d'une température maximale de 30°C en sortie des galeries de rejet de novembre à mai, et de 35°C de juin à octobre,

- Le respect d'une température maximale de 30 °C au-delà d'un rayon de 50 m autour des points de rejet,
- Dans le cas de situations exceptionnelles (exploitation ou colmatage), l'échauffement entre la prise et le rejet peut aller jusqu'à 21 °C dans la limite de 20 jours autorisés par an.

Le bilan des valeurs mensuelles de ces différents paramètres pour l'année 2023 est présenté dans le tableau suivant :

	Température moyenne à la prise d'eau (entrée condenseur) (°C)	Echauffement moyen dans les puits de rejet (°C)	Echauffement maximum dans les puits de rejet (°C)	Température moyenne dans les puits de rejet (°C)	Température maximum dans les puits de rejet (°C)
Janvier	9,6	10,6	11,7	18,3	22,6
Février	8,8	11,1	11,7	16,2	21,3
Mars	9,0	11,2	12,2	15,1	22,3
Avril	10,9	11,3	12,8	17,2	24,1
Mai	14,1	12,0	13,0	20,9	27,6
Juin	17,7	12,4	13,5	27,6	33,0
Juillet	19,9	12,6	13,8	28,4	34,2
Août	20,7	12,1	12,9	30,0	34,4
Septembre	21,1	12,0	13,0	31,0	34,7
Octobre	18,5	11,4	12,9	27,3	32,7
Novembre	13,4	10,3	13,6	19,0	27,2
Décembre	11,2	10,8	11,6	19,8	22,9

2. Comparaison aux limites

Les rejets thermiques doivent respecter les limites fixées à l'article EDF-PAL-99 de la décision ASN n°2019-DC-0676. Les limites définies sont accompagnées des modalités de l'article EDF-PAL-77 de la décision ASN n° 2019-DC-0677

Paramètres	Unité	Limite en vigueur	Valeurs maximales
Température de rejet ¹	°C	35	34,7
Echauffement ²	°C	15	13,8

¹ La température de l'eau de mer, à la sortie des galeries de rejets, peut dépasser 30°C, durant les mois de juin à octobre, sans jamais dépasser 35°C, hors situations exceptionnelles.

² L'échauffement entre la température de l'eau au niveau de la prise d'eau et celle au niveau du rejet ne doit pas dépasser 15°C. Dans le cas de situations exceptionnelles, l'échauffement peut aller jusqu'à 21°C. Ces situations ne doivent pas se produire plus de 20 jours par an.

Commentaires : les limites réglementaires associées aux rejets thermiques ont toujours été respectées.

3. En conditions climatiques exceptionnelles

Le CNPE n'est pas soumis à l'utilisation des limites en conditions climatiques exceptionnelles

4. Principales opérations de maintenance intervenues sur les équipements et ouvrages de rejets thermiques

L'année 2023 n'a pas été concernée par des actions de maintenance (hors maintenance programmée) et aucune intervention ou opération de maintenance anticipée n'ont été nécessaires.

Partie VI - Surveillance de l'environnement

I. Surveillance de la radioactivité dans l'environnement

EDF met en place depuis la mise en service de chaque CNPE un programme de surveillance de la radioactivité dans l'environnement du CNPE. Cette surveillance consiste à prélever des échantillons, à des fins d'analyse, dans les écosystèmes proches du CNPE, sous et hors des vents dominants, en amont et en aval des rejets liquides et dans les eaux souterraines. Ces mesures, associées à un contrôle strict des rejets d'effluents radiologiques, permettent de s'assurer de l'absence d'impact sur l'homme et l'environnement comme démontré dans l'étude d'impact.

La surveillance radiologique de l'environnement remplit trois fonctions principales.

Une fonction d'alerte assurée au moyen de mesures en continu. Elle permet la détection précoce de toute évolution atypique d'un ou plusieurs paramètres environnementaux en lien avec l'exploitation des installations afin de déclencher les investigations et, si nécessaire, des actions de prévention (arrêt du rejet...);

Une fonction de contrôle du bon fonctionnement global des installations au travers des paramètres que la réglementation demande de suivre à différentes fréquences. Les résultats des analyses sont comparés, soit aux limites autorisées, soit à des valeurs repères (seuil de détection des appareils de mesure, bruit de fond naturel...);

Une fonction de suivi et d'étude visant à s'assurer de l'absence d'impact à long terme des prélèvements et des rejets sur les écosystèmes terrestre et aquatique. C'est l'objet des campagnes de mesures saisonnières de radioécologie.

Les prélèvements et analyses sont réalisés à des fréquences variables en cohérence avec les objectifs assignés à la mesure (alerte, contrôle, ...). Des contrôles quotidiens, hebdomadaires et mensuels sont ainsi réalisés dans l'écosystème terrestre, l'air ambiant, les eaux de surface recevant les rejets liquides et les eaux souterraines. Les prélèvements et les analyses sont réalisés par le CNPE selon les modalités fixées par les autorisations délivrées par l'administration. La stricte application du programme de surveillance fait l'objet d'inspections programmées ou inopinées de la part de l'ASN, qui réalise des expertises indépendantes.

Le CNPE dispose pour la réalisation de ce programme de surveillance d'un laboratoire dédié aux mesures environnementales dit laboratoire « Environnement », ainsi que du personnel compétent et qualifié en analyses chimiques et radiochimiques. Ces laboratoires sont équipés d'appareillages spécifiques permettant l'analyse des échantillons prélevés dans le milieu naturel. Ils sont soumis à des exigences relatives aux équipements, aux techniques de prélèvement et de mesure, de maintenance et d'étalonnage. Certaines analyses peuvent être sous-traitées à des laboratoires agréés.

Ainsi, le CNPE réalise annuellement, sous le contrôle de l'ASN, plusieurs milliers d'analyses dont les résultats sont transmis à l'administration et publiés par EDF sur le site internet du

CNPE : (<https://www.edf.fr/la-centrale-nucleaire-de-paluel/l-exploitation-de-la-centrale-nucleaire-de-paluel>) . Les résultats des mesures de radioactivité réalisées dans le cadre de la surveillance réglementaire de l'environnement sont également accessibles en ligne gratuitement sur le site internet du Réseau National de Mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM - <http://www.mesure-radioactivite.fr>).

Ces mesures réalisées en routine sont complétées depuis 1992 par un suivi radioécologique annuel des écosystèmes terrestre et aquatique auquel est venu s'ajouter des mesures réglementaires réalisées à maille trimestrielle et annuelle et nécessitant le recours à des techniques analytiques d'expertise non compatibles avec les activités d'un laboratoire environnement d'un industriel. Tous les 10 ans, un bilan radioécologique décennal plus poussé est également réalisé. L'ensemble de ces prélèvements et analyses permettent de suivre à travers une grande variété d'analyses des paramètres environnementaux pertinents (i.e. : bio indicateurs) afin d'évaluer finement et dans la durée l'impact du fonctionnement du CNPE sur l'environnement et répondre ainsi à la fonction de suivi et d'étude. Ces études nécessitent des connaissances scientifiques approfondies de la biologie et des comportements des écosystèmes vis-à-vis des substances radioactives. Elles font aussi appel à des techniques de prélèvement d'échantillons et d'analyse complexes différentes de celles utilisées pour la surveillance de routine. Ces études sont donc confiées à des laboratoires externes qualifiés, agréés et reconnus pour leurs compétences spécifiques.

Ces études radioécologiques assurent un suivi long terme essentiel à la compréhension des mécanismes de transfert des radionucléides dans l'environnement et pour déterminer l'influence potentielle des rejets de l'installation au regard des autres sources de radioactivité naturelle et/ou artificielle.

La nature des échantillons et les lieux de prélèvement sont sélectionnés afin de mettre en évidence une éventuelle contribution des rejets d'effluents liquides et/ou atmosphériques des installations à l'ajout de radioactivité dans l'environnement.

En règle générale, le plan d'échantillonnage contient des échantillons biologiques, qui constituent des voies de transfert possibles, directes ou indirectes, de la radioactivité vers l'homme (prélèvements de légumes, fruits, poissons, lait, eaux, herbes...) et des échantillons, appelés bioindicateurs, qui sont connus pour leur aptitude à fixer spécifiquement certains polluants (lichens, mousses, bryophytes...). Le plan d'échantillonnage prévoit également des prélèvements dans des matrices dites « d'accumulation » (sols, sédiments), dans lesquels certains composants radiologiques peuvent rester piégés.

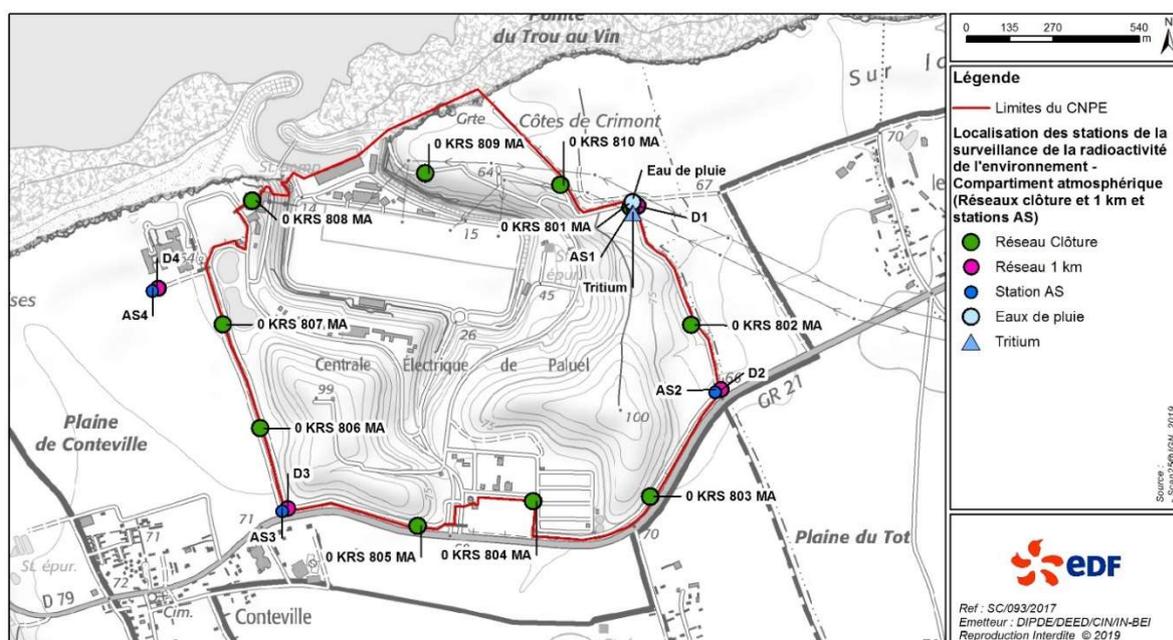
Les stations de prélèvements sont choisies en fonction de la rose des vents locale, des conditions hydrologiques, de la répartition de la population et de la disponibilité des échantillons dans l'environnement du CNPE. Les prélèvements collectés dans l'environnement terrestre sont répartis en distinguant les zones potentiellement influencées des zones non influencées par les rejets atmosphériques du CNPE. Dans l'environnement aquatique, les prélèvements sont effectués en amont et en aval des points de rejets des effluents liquides en tenant compte de la présence éventuelle d'une autre installation nucléaire en amont.

Ces études radioécologiques ont permis de caractériser finement les niveaux de radioactivité d'origine naturelle et artificielle dans les différents compartiments de l'environnement autour du CNPE, et de préciser l'influence des rejets d'effluents liquides et à l'atmosphère. Les

données collectées depuis plusieurs décennies ont montré que la radioactivité naturelle constitue la principale composante de la radioactivité dans l'environnement, et que la radioactivité artificielle provient majoritairement d'une rémanence des retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. Du fait de l'éloignement de ces événements anciens et des efforts réalisés par EDF pour diminuer les rejets de ses installations nucléaires, le niveau de radioactivité dans l'environnement à proximité du CNPE a considérablement diminué depuis une vingtaine d'année.

1. Surveillance de la radioactivité ambiante

Le système de surveillance de la radioactivité ambiante s'articule autour de 4 réseaux de balises radiométriques (clôture, à 1 km, à 5 km et à 10 km) via la mesure en continu du débit de dose gamma ambiant. Les balises de chaque réseau sont implantées à intervalle régulier de façon à réaliser des mesures dans toutes les directions. Elles permettent l'enregistrement et la retransmission en continu du débit de dose gamma ambiant et de donner l'alerte en cas de dépassement du bruit de fond ambiant augmenté de 114 nSv/h. Les balises sont également équipées d'un système d'alarme signalant toute interruption de leur fonctionnement.



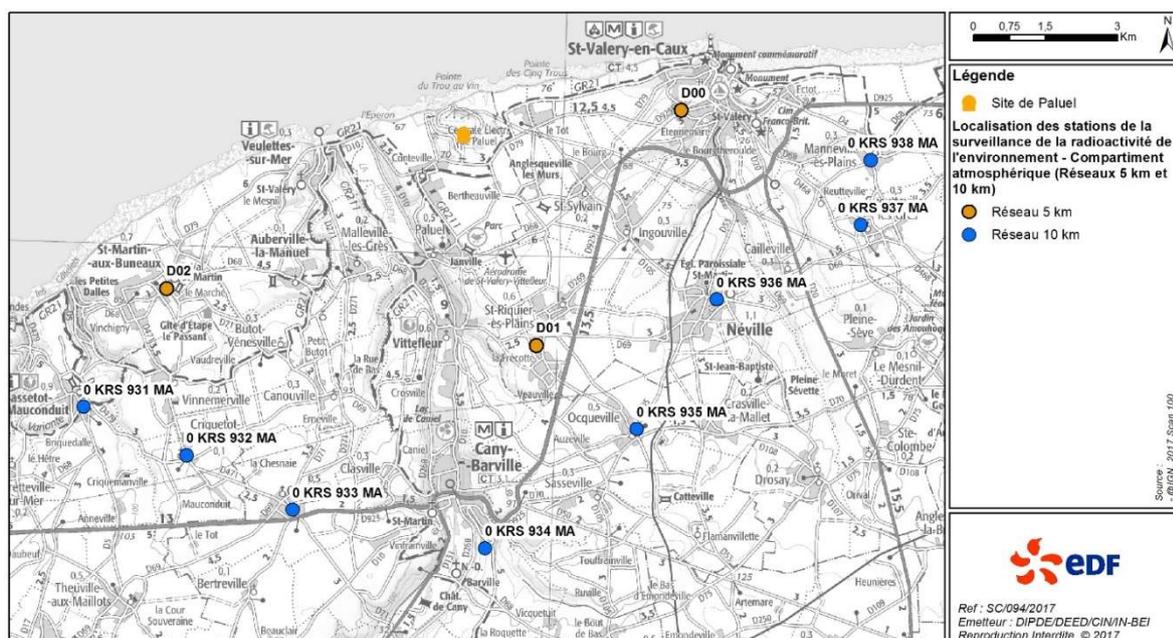


Figure 2 : Cartes de répartition des balises radiométriques du CNPE de Paluel

Les informations (débits de dose et états de fonctionnement) issues des balises sont envoyées en continu vers un centralisateur qui permet la visualisation et l'enregistrement des données. Les débits de dose moyens enregistrés par les différents réseaux de mesure pour l'année 2023 sont présentés dans le tableau suivant. Les débits de dose maximaux et les données relatives aux années antérieures sont également présentés à titre de comparaison.

Réseau de mesure	Débit de dose moyen année 2023 (nSv/h)	Débit de dose max année 2023 (nSv/h)	Débit de dose moyen année 2022 (nSv/h)	Débit de dose moyen année 2021 (nSv/h)
Clôture	8,18E+01	2,28E+02	8,28E+01	8,36E+01
1 km	7,96E+01	4,67E+02	8,02E+01	8,19E+01
5 km	9,03E+01	1,74E+02	9,06E+01	8,98E+01
10 km	9,68E+01	1,72E+02	9,79E+01	9,75E+01

Commentaires : Pour les quatre réseaux, les débits de dose moyens enregistrés pour l'année 2023 sont de l'ordre de grandeur du bruit de fond et cohérents avec les résultats des années antérieures. Les valeurs maximales observées coïncident avec de fortes variations climatiques ou avec le passage de transports de matières radioactives à proximité des dispositifs de mesure.

2. Surveillance du compartiment atmosphérique

Quatre stations d'aspiration en continu des poussières atmosphériques (aérosols) sont implantées dans un rayon de 1 km autour du CNPE. Des analyses journalières de l'activité bêta globale à J+6 sont réalisées quotidiennement sur les filtres, ainsi qu'une analyse isotopique mensuelle par spectrométrie gamma sur regroupement des filtres quotidiens par station.

Un dispositif de prélèvement du tritium atmosphérique par barbotage est également implanté sous les vents dominants à la station dite AS1. L'analyse du tritium atmosphérique piégé est réalisée pour chacune des périodes définies réglementairement (du 1er au 7, du 8 au 14, du 15 au 21 et du 22 à la fin du mois).

Un dispositif de prélèvement des eaux de pluie par un collecteur de précipitations est implanté sous les vents dominants à la station AS1. Des analyses bimensuelles des activités bêta globale et tritium sont réalisées.

Les résultats des mesures réalisées sur le compartiment atmosphérique pour l'année 2023 sont donnés dans le tableau suivant.

Compartiment	Paramètres	Moyenne annuelle	Valeur maximale mesurée	Limite réglementaire (pour chaque analyse)	
Poussière atmosphérique	Bêta globale	4,13E-04 Bq/Nm ³	2,46E-03 Bq/Nm ³	-	
	Spectrométrie gamma	⁵⁸ Co	<7,0E-06 Bq/Nm ³	<8,2E-06 Bq/Nm ³	-
		⁶⁰ Co	<5,0E-06 Bq/Nm ³	<5,9E-06 Bq/Nm ³	-
		¹³⁴ Cs	<4,9E-06 Bq/Nm ³	<5,9E-06 Bq/Nm ³	-
		¹³⁷ Cs	<4,2E-06 Bq/Nm ³	<5,0E-06 Bq/Nm ³	-
		⁴⁰ K	<1,6E-04 Bq/Nm ³	4,7E-04 Bq/Nm ³	-
Tritium atmosphérique		<1,70E-01 Bq/m ³	5,10E-01 Bq/Nm ³	50 Bq/Nm ³	
Eau de pluie	Bêta globale	< 1,51E-01 Bq/L	3,00E-1 Bq/L	-	
	Tritium	<5,10E+00 Bq/L	6,36E+00 Bq/L	-	
	Potassium	1,02E+00 mg/L	4,20E+00 mg/L	-	

Commentaires : Les mesures de surveillance du compartiment atmosphérique pour l'année 2023 sont cohérentes en moyenne avec les valeurs du bruit de fond. Les mesures de l'activité bêta globale et de l'activité en tritium atmosphérique sont très inférieures aux limites réglementaires.

Dans le cadre de circonstances exceptionnelles (conditions météorologiques défavorables : tempête Ciaran), le laboratoire n'a pas procédé au remplacement des filtres de prélèvements des poussières atmosphériques sur les quatre stations air au sol le 02 novembre 2023. Les activités du 1er et 2 novembre ont été calculées dans l'hypothèse d'une stabilité de la quantité de particules collectées sur les deux journées de prélèvements cumulées. La détermination

des activités volumiques a été réalisée à partir du volume d'air prélevé sur chacune des deux journées. Conformément à l'article 3.1.4 – II de la décision environnement, un commentaire a été intégré dans le registre mensuel des mesures de la radioactivité dans l'environnement du mois de novembre 2023, ainsi que dans la synthèse trimestrielle des registres d'octobre, novembre et décembre 2023.

3. Surveillance du milieu terrestre

Les résultats des mesures réalisées sur le compartiment terrestre pour l'année 2023 sont donnés dans le tableau suivant. Concernant les résultats des analyses par spectrométrie gamma, seules les activités relatives aux radionucléides d'origine artificielle en lien avec le spectre de référence des effluents et au potassium 40 ainsi que les autres radionucléides d'origine artificielle supérieures aux seuils de décision sont présentés.

Nature du prélèvement	Radionucléide	Périodicité	Moyenne annuelle	Valeur maximale mesurée
Végétaux terrestres (Bq/kg sec)	Spectrométrie gamma sous influence	⁵⁸ Co	<4.90E-01	<6.30E-01
		⁶⁰ Co	<5.18E-01	<5.65E-01
		¹³⁴ Cs	<4.11E-01	<4.35E-01
		¹³⁷ Cs	<4.26E-01	<4.58E-01
		⁴⁰ K	1.13E+03	1.48E+03
	Spectrométrie gamma hors influence	⁵⁸ Co	<5.04E-01	<6.39E-01
		⁶⁰ Co	<4.97E-01	<5.50E-01
		¹³⁴ Cs	<4.03E-01	<4.27E-01
		¹³⁷ Cs	<4.24E-01	<4.52E-01
		⁴⁰ K	1.05E+03	1.44E+03
Lait (Bq/L)	Spectrométrie gamma sous influence	⁵⁸ Co	<1.63E-01	<4.00E-01
		⁶⁰ Co	<1.75E-01	<4.00E-01
		¹³⁴ Cs	<1.77E-01	<5.00E-01
		¹³⁷ Cs	<1.85E-01	<5.00E-01
		⁴⁰ K	4.86E+01	5.74E+01

Commentaires :

Les résultats des mesures annuelles réalisées sur le compartiment terrestre ainsi que leur interprétation pour l'année 2022 sont présentés dans le rapport du suivi radioécologique annuel, présenté en **annexe 1**.

4. Surveillance des eaux de surface

Les résultats des mesures réalisées sur les eaux de surface pour l'année 2023 sont donnés dans le tableau suivant.

	Paramètre analysé	Périodicité	Unités	Moyenne annuelle	Valeur maximale mesurée
Eau filtrée	Activité bêta globale	Bi-mensuelle Sous influence	Bq/L	1,15E+01	1,27E+01
		Mensuelle Hors influence	Bq/L	1,15E+01	1,25E+01
	Tritium	Bi-mensuelle Sous influence	Bq/L	7,78E+00	1,90E+01
		Mensuelle Hors influence	Bq/L	<6,68E+00	1,17E+01
	Potassium	Bi-mensuelle Sous influence	mg/L	4,13E+02	4,40E+02
Mensuelle Hors influence		mg/L	4,10E+02	4,40E+02	
Matières en suspension	Activité bêta globale	Bi-mensuelle Sous influence	Bq/L	8,87E-02	3,50E-01
		Mensuelle Hors influence	Bq/L	2,25E-02	6,40E-02

Commentaires : L'activité Tritium maximale mesurée dans certains prélèvements d'eau de mer réalisés au niveau du point de rejet est en corrélation avec l'activité tritium des réservoirs de type T vidangés durant la même période de prélèvement.

Il est à noter que les activités tritium significatives mesurées sur les prélèvements d'eaux de mer collectés en dehors des périodes de vidange des réservoirs T sont cohérentes avec les valeurs attendues du fait des niveaux d'activités mesurables dans l'eau de mer en Manche.

5. Surveillance du milieu aquatique

Les résultats des mesures annuelles réalisées sur le compartiment aquatique ainsi que leur interprétation pour l'année 2022 sont présentés dans le rapport du suivi radioécologique annuel, présenté en **annexe 1**.

6. Surveillance des eaux souterraines

Les eaux souterraines situées au droit du CNPE font l'objet d'une surveillance radiologique dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Paramètres	Unité	Valeur maximale mesurée
Tritium	Bq/L	6,20E+00
Bêta global	Bq/L	1,03E+00
Bêta global MES	Bq/L	3,3E-02
Potassium	Bq/L	2,8E+01

Commentaires : Les mesures de surveillance des eaux souterraines pour l'année 2023 sont cohérentes avec les valeurs habituelles.

II. Physico-chimie des eaux souterraines

Une surveillance physico-chimique des eaux souterraines est effectuée sur les paramètres physicochimiques par le biais de prélèvements sur 5 piézomètres du CNPE.

Paramètres	Unité	Valeur maximale mesurée
pH	U pH	9,20
Conductivité	μS / cm	3,39E+03
Hydrocarbures C10-C40	mg / L	2,10E-01
DCO		1,10E+01
COT		2,20E+00
Azote global		8,62E+00
Métaux totaux dissous		4,56E-02
Aluminium dissous		1,00E-02
Chrome dissous		<3,00E-02
Cuivre dissous		<1,00E+00
Fer dissous		1,30E-02
Manganèse dissous		2,00E-02
Nickel dissous		1,60E-02
Plomb dissous		<5,00E-03
Zinc dissous		<2,50E+00
Sulfate		1,94E+02

Commentaires : Certains piézomètres sont influencés par l'eau de mer. La charge saline importante contenue dans ces eaux souterraines est à l'origine du caractère plus élevé des concentrations en Conductivité et Sulfates mesurées.

III. Chimie et physico-chimie des eaux de surface

1. Physico-chimie des eaux de surface

Le CNPE fait réaliser par le laboratoire IFREMER, dans le canal d'aménée, le canal de rejet et le point de référence hors influence des rejets du CNPE, 3 campagnes annuelles (printemps, été et automne) de mesures de certains paramètres physico-chimiques naturellement présents en milieu marin. Les résultats présentés dans le rapport annuel de l'IFREMER, aboutissent aux conclusions suivantes :

*En 2023, les **paramètres suivis** dans le cadre de la surveillance du compartiment pélagique ne présentent pas de profils atypiques. Les différences spatiales entre les points de suivis (et le point Référence en particulier) mettent le plus souvent en évidence un gradient côte-large caractéristique de la variabilité naturelle du milieu à Paluel. Les faits marquants de l'année 2023 sont résumés ci-après.*

*Sur le plan climatique, pour Dieppe, cette année 2023 est la plus chaude depuis 1951, elle se classe donc au **premier rang des années les plus chaudes** avec une température moyenne annuelle de 12,5 °C et un écart à la normale 1981-2010 de +1,6 degrés, très peu devant 2022 avec 12,4 °C. En raison de cette situation atypique, les **températures de l'eau de mer**, relevées à proximité du CNPE, sont supérieures aux médianes historiques sur l'ensemble de la zone et des saisons sans toutefois atteindre des valeurs records. Le cumul des précipitations*

est de 954 mm, ce qui représente un excédent de 20 % par rapport au cumul attendu sur cette même période (798 mm).

Les valeurs de **salinités** observées cette année s'inscrivent dans la gamme des salinités reportées dans ce secteur de la Manche par Brylinski et al. (1991).

Pour la 8e année, des mesures d'**oxygène dissous** sont réalisées. Les concentrations relevées sont proches de la valeur de référence attendue en Manche Atlantique et aucun dysfonctionnement (état d'hypoxie ou d'anoxie) n'a été observé sur l'ensemble de la zone d'étude au cours de cette année.

Le suivi 2023 des **sels nutritifs** montre des concentrations relativement proches de la médiane historique, pour tous les éléments azotés, tout au long de l'année. Le cycle saisonnier attendu (Figure B-1) des sels nutritifs est conforme. Il est principalement lié au cycle biologique du phytoplancton qui se développe au printemps, qui consomme les sels nutritifs au cours l'été et se dégrade par la suite pour que le stock en nutriment puisse se recharger à partir de l'automne avec l'apport de cours d'eau.

Les concentrations en **MES** mesurées au point Rejet au printemps et en été, apparaissent une nouvelle fois (après 2022) comme exceptionnelles avec respectivement, 107,29mg/L et 140,88mg/L. Hors point Rejet, sur les trois saisons, les valeurs de MES diminuent de la côte vers le large. Ces campagnes se caractérisent par des gammes de valeurs de MES relativement élevées du point de vue historique pour les points Canal et Référence. À noter, les valeurs exceptionnelles mesurées au point Référence en été et en automne. Ces valeurs de MES sont cohérentes avec les précipitations mesurées par Météo France les jours précédents chaque campagne.

Depuis 2016, la **turbidité** est mesurée en complément de MES. Le gradient côte large est également observable. La valeur la plus forte de l'année a été mesurée, au printemps, comme pour les MES sur le point Rejet (90,8 FNU, la 2ème plus élevée depuis 2016 pour ce point). La relation entre la turbidité et la concentration en MES n'est pas toujours évidente à établir, car elle dépend de plusieurs paramètres²⁰. En effet, les caractéristiques géométriques et optiques des particules en suspensions sont variables et hétérogènes dans les eaux résiduaires ou pluviales urbaines. Ces paramètres peuvent varier en temps sec selon les heures et les jours et en temps de pluie lors d'évènements pluvieux. Sur les stations plus côtières et donc moins profondes, la remise en suspension de particules du fond, les apports continentaux par les bassins versants ainsi que des biomasses phytoplanctoniques généralement plus élevées, peuvent expliquer ces variations observées le long d'un gradient côte/large.

2. Chimie des eaux de surface

Certaines substances chimiques issues du fonctionnement du CNPE sont recherchées (Ethanolamine, morpholine, hydrazine, agents de surface, haloformes) au niveau des stations nommées Canal d'amenée, Rejet et Référence.

Concernant les éléments chimiques, les concentrations des formes de **trihalométhanes**, sont restées inférieures à la LQ (< 0,5 µg/L) sur l'ensemble de la zone et ceci au cours des trois périodes d'échantillonnage. Historiquement, seules les valeurs en **tribromométhane (bromoforme)** ont été supérieures aux limites de détection. En 2023, toutes les concentrations

de tribromométhane (bromoforme) obtenues sont inférieures à la LQ (< 0,5 µg/L), pour tous les points et pour chaque saison.

En conclusion, les données relatives au compartiment hydrologique acquises en 2023 dans le cadre du programme de surveillance écologique du CNPE de Paluel mettent en évidence un échauffement de l'eau aux abords des bouches de Rejet. Cette perturbation thermique reste cependant géographiquement très limitée. Les autres paramètres suivis présentent des valeurs et des variations expliquées par la saisonnalité, l'environnement climatique et géomorphologique.

Ainsi, les rejets du CNPE n'affectent pas de façon générale la distribution et les variations saisonnières des paramètres étudiés autres que la température. Les résultats de la surveillance des paramètres physico-chimiques et chimiques pour l'année 2023 mettent en évidence une variabilité spatio-temporelle cohérente avec celle du milieu naturel. Elle ne peut donc être imputable à l'influence du fonctionnement du CNPE.

IV. Surveillance écologique et halieutique

Chaque année, le CNPE confie la réalisation de la surveillance écologique et halieutique à IFREMER.

L'objectif de la surveillance pérenne est de suivre l'évolution naturelle du milieu récepteur et de déceler une évolution anormale de l'écosystème, sur le long terme, qui pourrait être attribuable au fonctionnement du CNPE.

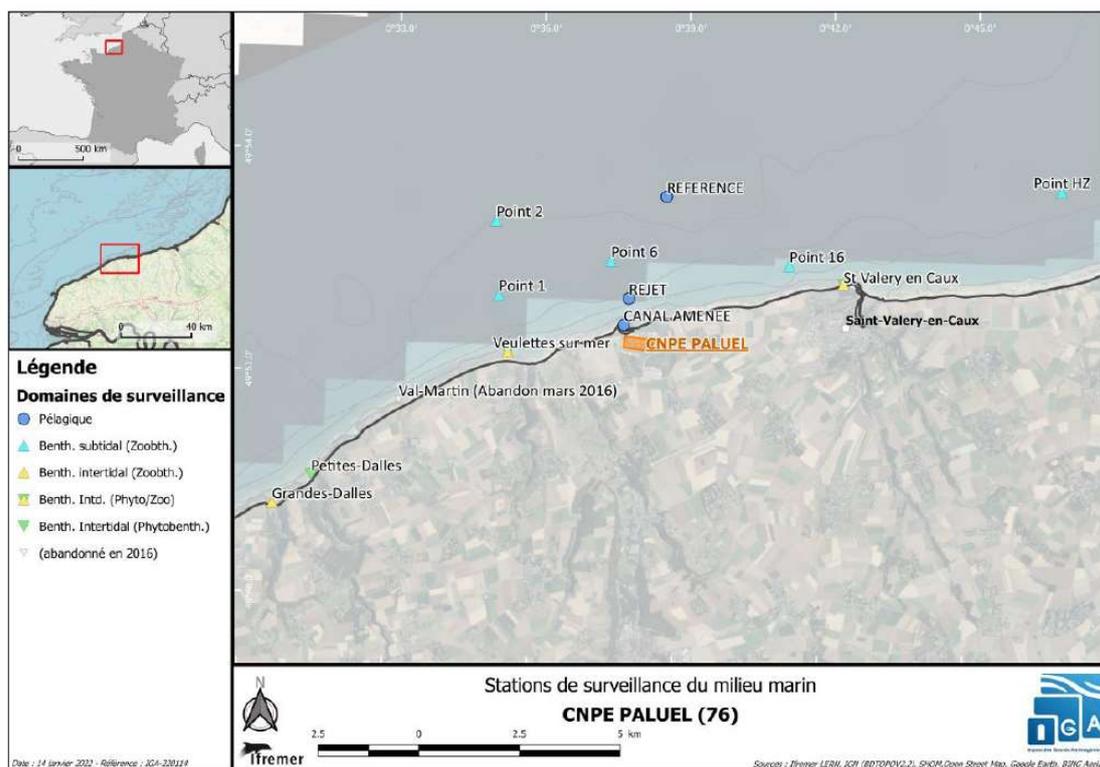
1. Surveillance pérenne

La synthèse du rapport de surveillance, réalisée par IFREMER, est présentée ci-dessous.

La "surveillance écologique et halieutique des CNPE de bord de mer", vise à étudier l'évolution temporelle à moyen et long terme des différents domaines marins (pelagos, benthos et halieutique) et de leurs paramètres associés à une échelle spatiale locale (proche de la centrale et de sa zone d'influence).

Le CNPE de Paluel, à 40 km au sud-ouest de Dieppe (Département Seine Maritime), puise dans le milieu marin les eaux de refroidissement de ses 4 réacteurs à eau sous pression. Pour satisfaire aux exigences de la Décision ASN n° 2019-DC-0677 du 09 juillet 2019 "fixant les prescriptions relatives aux modalités de prélèvement et de consommation d'eau, de rejet d'effluents et de surveillance de l'environnement des installations nucléaires de base" du CNPE^{D8}, une surveillance écologique du milieu récepteur du CNPE de Paluel est mise en oeuvre par l'exploitant. Cette surveillance a été initiée il y a 46 ans (en 1978).

La stratégie mise en oeuvre repose sur un suivi saisonnier (printemps, été automne) des différents compartiments du milieu marin. Cette surveillance porte sur le domaine pélagique (paramètres physico-chimiques et chimiques, phytoplanctoniques, microbiologiques (vibrions), zooplanctoniques), le domaine benthique (peuplements de macrofaune intertidale, subtidale et populations algales) et le domaine halieutique (analyse des activités de pêche).



La liste synthétique de tous les paramètres surveillés (échantillons, stations, fréquences) est détaillée ci-dessous.

Domaine	Compartiment	Paramètre	Lieux de surveillance (Dates campagnes)
Pélagique	Hydrologie	Température	3 stations / 3 points : Canal d'aménée (en surface) Rejet , (en surface) Référence (en surface) Date des campagnes 2023 : 27 mars 2023 (PRINTEMPS) 19 juin 2023 (ETE) 21 septembre 2023 (AUTOMNE)
		Salinité	
	Physico-chimie / Chimie ²	Sels azotés (Ammonium, Nitrates, Nitrites)	
		Turbidité	
		Oxygène dissous	
		Phosphates	
		Silicates	
		Trihalométhanes ou Haloformes (Bromoforme, Chloroforme, Dibromochlorométhane, Dichloromonobromométhane)	
	Phytoplancton	Matières en suspension	
		détermination et dénombrement des espèces (Flore Totale),	
Chlorophyllie <i>a</i> (indicateur de Biomasse Chlorophyllienne)			
Phéopigments (indicateur de Biomasse Chlorophyllienne)			
Zooplancton	Production primaire		
	Identification et abondance		
	Biomasse sestonique		
Micro-organismes ⁸	Dosage Carbone		
	Dosage Azote		
Benthique	Zoobenthos intertidal ²	Identification et dénombrement des Vibrions halophiles	
		Population d'Idotées (abondance, biométrie)	
	Zoobenthos subtidal	Biomasse algale (<i>Fucus vesiculosus</i>)	
		Macrofaune (abondance)	
		Granulométrie	
Phytobenthos intertidal ¹⁰	Populations de <i>Fucus serratus</i> (biomasse, longueur des thalles, fertilité)		
	Suivi des peuplements de substrats durs selon protocole DCE (recouvrement global, nombre d'espèces caractéristiques, recouvrement des espèces opportunistes)		
Halieutique	Pêches	Suivis des pêches artisanales : production annuelle et mensuelle, nb de navire, CPUE ¹¹ , espèces, type d'engins, principaux ports d'exploitation	

Dans le domaine du **phytoplancton**, l'année se caractérise par une biomasse moyenne à faible et une production primaire potentielle faible. Les concentrations de phytoplancton mesurées sont également faibles en été, en particulier sur les points Canal et Référence. Au printemps, le manque d'ensoleillement explique probablement le faible développement du phytoplancton. La variabilité spatio-temporelle est principalement liée aux conditions environnementales le long du gradient côte large, en accord avec les connaissances de la Manche.

Dans le domaine de la **Microbiologie**, l'année 2023 se caractérise par une augmentation progressive des vibrions halophiles au cours de l'année. Les abondances les plus fortes ont été relevées sur le point Référence en été (15 000 UFC/L, dépassant les plus fortes valeurs de la série observées en 2008) et en automne (> 2 000 UFC/L sur les points côtiers Canal et Rejet). Le gradient décroissant de la côte vers le large est caractérisé aux trois campagnes. Les niveaux relativement élevés, observés au point Référence en été et en automne, témoignent d'une présence des vibrions halophiles au large (hors influence du CNPE) et excluent une origine strictement liée aux activités du CNPE.

En 2023 les **abondances zooplanctoniques** étaient conformes aux valeurs historiques saisonnières observées sur le site de surveillance depuis 1988. Si au printemps, les abondances ne présentent pas de variation significative entre les points, les abondances estivales et automnales sont significativement plus importantes au large (Référence) qu'à la côte (Canal). Les abondances au point Rejet reflètent plutôt une position intermédiaire, plus proche du point Canal à l'automne et du point Référence en été. Chacune des espèces zooplanctoniques observées cette année respecte, pour ce que peut montrer cette analyse de trois campagnes annuelles, leur répartition saisonnière habituelle et sont caractéristiques des milieux tempérés de la Manche et de la baie sud de la Mer du Nord. Ainsi, la surveillance 2023 n'a pas permis de déceler de changement notable dans la distribution et la composition zooplanctonique qui puisse être imputable au fonctionnement du CNPE.

Dans le **domaine benthique subtidal**, l'analyse des sédiments révèle deux zones principales relativement stables depuis les années 90. À l'ouest, des cailloutis prédominent, marqués par la disparition d'une moulière à la fin des années 80, maintenant une stabilité sédimentaire jusqu'en 2023.

À l'est, des sables hétérogènes évoluent vers des fonds plus grossiers depuis quelques années, avec l'apparition sporadique de faciès de sables vaseux.

Les communautés benthiques sont influencées par la nature des fonds. Les cailloutis dominent à l'ouest, passant d'une communauté d'Ascidies à une dominée par les Balanes et les Vers tubicoles Spirobranchus, en régression depuis 2020. À l'est, les communautés alternent entre sables mobiles et sables hétérogènes, puis deviennent largement dominées par les cailloutis à partir de 2015.

La présence de l'espèce invasive *Crepidula fornicata* dans les années 90 est suivie d'une chute des populations dès 2001. Une nouvelle population apparaît en 2004 mais décline également. Ces tendances se poursuivent en 2023 L'abondance d'*Ophiothrix fragilis* varie d'une année à l'autre, avec une prolifération observée en 2023 durant l'été.

Les résultats de l'étude démontrent que l'hydrodynamisme, via son influence sur la nature sédimentaire des fonds, est l'élément dominant expliquant l'évolution de la macrofaune

benthique sur le site. Au vu des données disponibles, il n'apparaît pas d'effet détectable du fonctionnement du CNPE de Paluel sur la nature des fonds ou la faune associée.

En zone intertidale, la biomasse de *Fucus* spp. est importante sur tous les sites, dépassant les moyennes historiques, bien que la biomasse algale totale reste stable ou en légère régression par rapport à l'année précédente. Les populations du petit crustacé isopode *Idotea granulosa* diminuent par rapport à 2022, restant bien en-dessous des moyennes historiques et s'inscrivant dans une régression continue depuis 2007. Malgré une stabilisation apparente en 2014, elles demeurent à des niveaux bas et semblent à nouveau régresser ces dernières années. Les densités d'idotées rapportées à la biomasse suivent une dynamique similaire, indiquant une régression indépendante de l'évolution des algues. Sur la radiale des Grandes-Dalles, les densités d'idotées sont extrêmement faibles, confirmant une diminution globale indépendante du développement local des habitats et de la ceinture algale étudiée.

Comme nous le constatons depuis de nombreuses années, la population de *Fucus serratus* observée en 2023 près du CNPE de Paluel se situe encore dans les niveaux les plus bas observés depuis 1994 quelle que soit la saison. Cette tendance est constatée de façon globale tant sur le site de Paluel qu'à Flamanville et Guissény (Site de référence, situé dans le Finistère, hors de proximité d'un CNPE).

Plusieurs hypothèses sont proposées afin d'expliquer cette réduction des populations algales, qui ne se limitent pas aux côtes normandes : réchauffement climatique (hausse des températures de l'air et de l'eau de mer, insolation plus importante lors des marées basses), fréquence des tempêtes, modification de la direction de la houle, multiplication des patelles qui se nourrissent de ces végétaux. Comme les années précédentes, la population de *Fucus serratus* de Paluel se distingue en fin d'hiver par des niveaux de fertilité plus faibles comparés aux autres sites suivis. Les valeurs 2023 restent conformes au cycle de maturation de *Fucus serratus* avec des pourcentages en fin d'été supérieurs à ceux observés en fin d'hiver.

Du point de vue de l'état écologique au sens de la DCE, au printemps 2023, les sites de Saint-Valéry-en-Caux et Diélette affichent respectivement des statuts écologiques "Bon" et "Très bon". La ceinture algale ajoutée à Diélette en 2020 persiste. Les ratios de qualité écologique (EQR) des deux sites varient au fil des années mais restent stables depuis 2020. Aucune différence significative n'est observée entre les sites. Les activités des CNPE n'ont pas provoqué d'évolution majeure dans les populations algales.

La production halieutique (zone 28F0 définie par le CIEM-Conseil International pour l'Exploration de la Mer) en 2021 (année N-1) a été d'environ 2 215 tonnes soit l'une de plus faibles quantités débarquées depuis le début du suivi. L'année 2021 est aussi caractérisée par un niveau de capture par unité d'efforts (CPUE) parmi les plus faibles depuis le début de la série. Cette diminution peut être attribuée en partie aux changements d'activités des professionnels qui pratiquent aujourd'hui le métier des engins dormants. L'activité ces petits bateaux a été particulièrement impactée par des conditions hivernales souvent incompatibles avec une activité en mer. Enfin, les quantités annuelles ainsi que le nombre de navires fréquentant le 28F0 ont légèrement augmenté cette année sans que cela ait eu un effet positif sur les CPUE. Les variations temporelles des données de débarquements mettent en évidence l'apparition d'une nouvelle pêcherie liée à un changement de stratégie d'une partie des professionnels des ports de Dieppe et Fécamp qui ciblent principalement le buccin à partir

de 2008. La stratégie de suivi n'a pas mis en évidence de modification significative des débarquements pouvant être en lien avec l'activité du CNPE de Paluel.

En conclusion, la variabilité spatiale et temporelle des paramètres pélagiques, benthiques et halieutiques, suivis dans le cadre de la surveillance réglementaire du CNPE de Paluel en 2022, ne montrent pas d'évolution ou de comportement atypique pouvant être mis en relation directe soit avec le fonctionnement du CNPE, soit avec le contexte hydroclimatique exceptionnellement chaud et sec qui a caractérisé cette année.

Le rapport complet est disponible sur demande auprès du CNPE de Paluel.

2. Surveillance en conditions climatiques exceptionnelles

Les décisions modalités n° 2019-DC-676 et 2019-DC-677 ne prévoient pas de surveillance chimique, physico-chimique, microbiologique et hydrobiologique spécifiques liées à des conditions climatiques exceptionnelles, ni en situations exceptionnelles.

V. Acoustique environnementale

L'arrêté du 7 février 2012 fixe les règles générales applicables à toutes les phases du cycle de vie des installations nucléaires de base visant à garantir la protection des intérêts contre l'ensemble des inconvénients ou des risques que peuvent présenter les INB. Le titre IV sur la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement fixe deux critères visant à limiter l'impact du bruit des installations nucléaires de base.

Le premier critère, appelé « émergence sonore » et s'exprimant en Décibel A - dB (A) est la différence de niveau sonore entre le niveau de bruit ambiant et le bruit résiduel. L'émergence sonore se calcule à partir de mesures réalisées aux premières habitations, en Zone à Émergence Réglementée (ZER).

Le deuxième critère, en vigueur depuis le 1^{er} juillet 2013, concerne le niveau sonore mesuré en dB (A) en limite d'établissement de l'installation.

Pour répondre à ces exigences réglementaires et dans l'optique de réduire l'impact de ses installations, EDF mène depuis 1999 des études d'impact acoustique basées sur des mesures de longue durée dans l'environnement et sur les matériels. En parallèle, des modélisations 3D sont réalisées pour hiérarchiser les sources sonores les plus prépondérantes, et si nécessaire, définir des objectifs d'insonorisation.

Les principales sources de bruit des installations nucléaires sont généralement les réfrigérants atmosphériques pour les CNPE équipés, les stations de pompage, les salles des machines, les cheminées du bâtiment des auxiliaires nucléaires, et les transformateurs.

La Mission Communication du CNPE de Paluel réalise des informations, met en ligne une information sur son site internet et réalise une communication par messagerie électronique auprès des services de l'Etat, de la CLIN et des mairies de proximités dans un rayon de 10 km (Mairie de Paluel, Saint Sylvain, Ingouville, Saint Valéry en Caux, Cany-Barville), lors de la réalisation d'opérations pouvant générer du bruit, comme par exemple lors de la réalisation de certains essais périodiques sur l'installation.

Partie VII - Évaluation de l'impact environnemental et sanitaire des rejets de l'installation

Une surveillance des niveaux de radioactivité est effectuée dans l'environnement du CNPE de Paluel dans le cadre du programme de surveillance réglementaire et du suivi radioécologique du CNPE (cf. Partie VI Surveillance de l'environnement, I- Surveillance de la radioactivité dans l'environnement).

Les résultats de cette surveillance et des mesures associées montrent que la radioactivité mesurée dans l'environnement du CNPE est principalement d'origine naturelle. Les niveaux de radioactivité artificielle mesurés dans l'environnement du CNPE sont faibles et trouvent pour partie leur origine dans d'autres sources (rejets de l'usine ORANO La Hague, retombées atmosphériques des essais nucléaires, ...). L'analyse détaillée des résultats est présentée dans le rapport du suivi radioécologique annuel réalisé par l'IRSN, présenté en annexe 1.

L'IRSN produit également un bilan radiologique de l'environnement français disponible au lien suivant :

https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/environnement/IRSN-ENV_Bilan-Radiologique-France-2018-2020.pdf

À partir des activités annuelles rejetées par radionucléide, une dose efficace³ est calculée en tenant compte des mécanismes de transfert de l'environnement jusqu'à l'homme. Cette dose permet de « mesurer » le niveau d'exposition attribuable aux rejets d'effluents radioactifs liquides et atmosphériques d'une installation et de le positionner par rapport à la limite réglementaire pour l'exposition de la population aux rayonnements ionisants conformément à l'article R1333-11 du Code de la Santé Publique.

Le calcul de dose efficace annuelle tient compte de données spécifiques à chaque CNPE telles que les conditions météorologiques, les habitudes alimentaires des riverains, les conditions de dispersion des effluents rejetés dans le milieu récepteur, etc. Les données alimentaires et les temps consacrés aux activités intérieures ou extérieures dans les environnements terrestre et aquatique ont été actualisés en 2013-2014 avec les dernières bases de données et enquêtes disponibles.

Les principales hypothèses retenues sont les suivantes :

- les habitants consomment pour partie des aliments produits dans l'environnement proche du CNPE ;
- ils vivent toute l'année à proximité de leur lieu d'habitation (non prise en compte de leurs périodes d'absence pour le travail, les vacances...).

Les principaux facteurs d'incertitudes dans le calcul de dose sont associés essentiellement à quelques données et paramètres difficiles à acquérir sur le terrain, tels que certaines

³ 1 La **dose efficace** est la somme des doses absorbées par tous les tissus, pondérée d'un facteur radiologique WR (WR = Radiation Weighting factor, facteur de pondération du rayonnement) pour tenir compte de la qualité du rayonnement (α , β , γ ...) et d'un facteur de pondération tissulaire WT (WT = Tissu Weighting factor) correspondant à la radiosensibilité relative du tissu exposé. La dose efficace a pour objectif d'apprécier le risque total et s'exprime en sievert (Sv). Elle est appelée communément « dose ».

caractéristiques de l'environnement et comportements précis des populations riveraines (les rations alimentaires par exemple).

L'échelle suivante présente des ordres de grandeur de doses résultant de situations courantes :

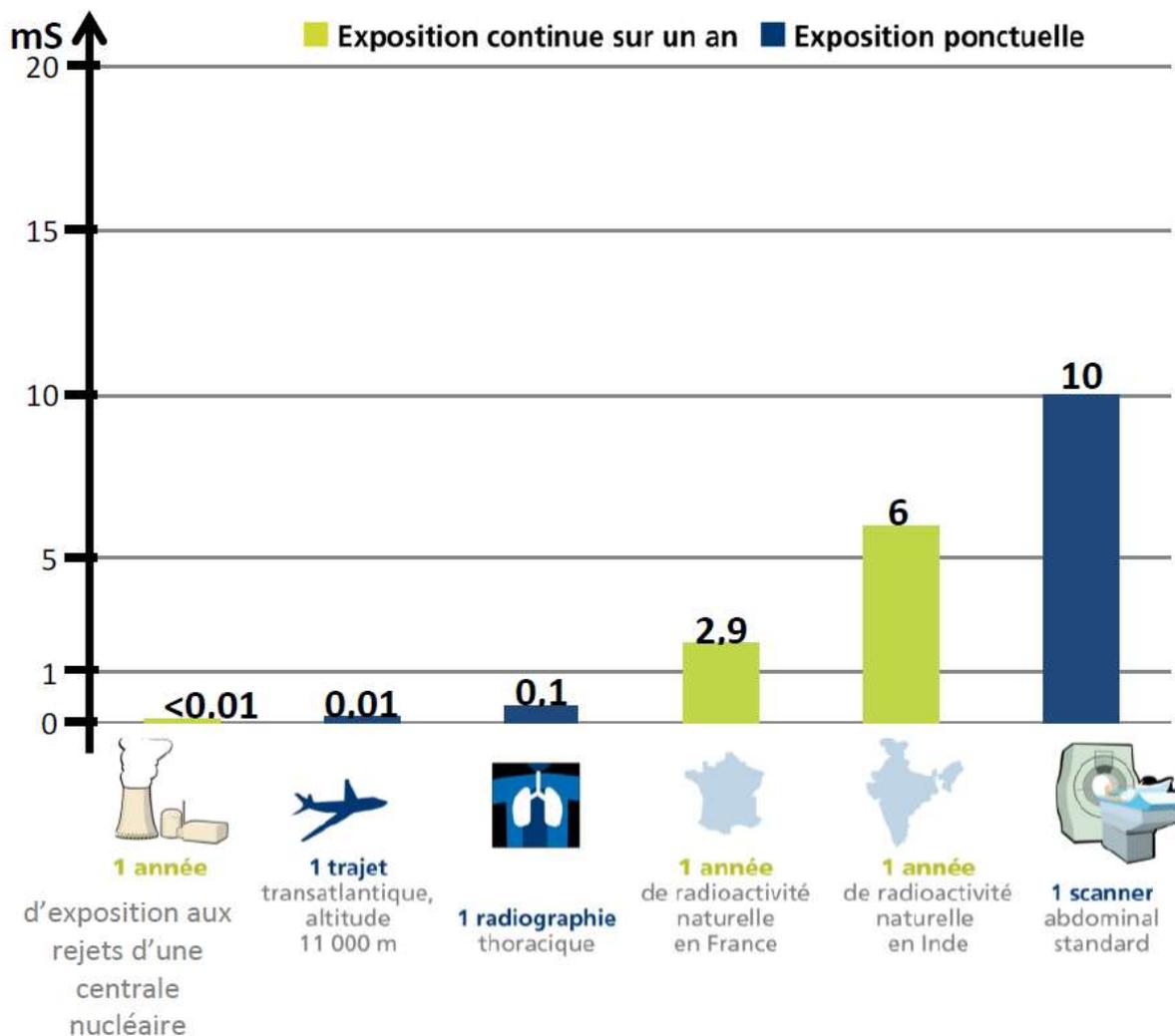


Figure 3 : Echelle des ordres de grandeur de doses résultant de situations courantes et comparaison aux seuils réglementaires (Source : EDF)

L'exposition moyenne de la population française aux rayonnements ionisants (d'origine naturelle et artificielle) est de 4,5 mSv/an. Les contributions des différentes sources d'exposition sont présentées sur la figure 4 ci-après.

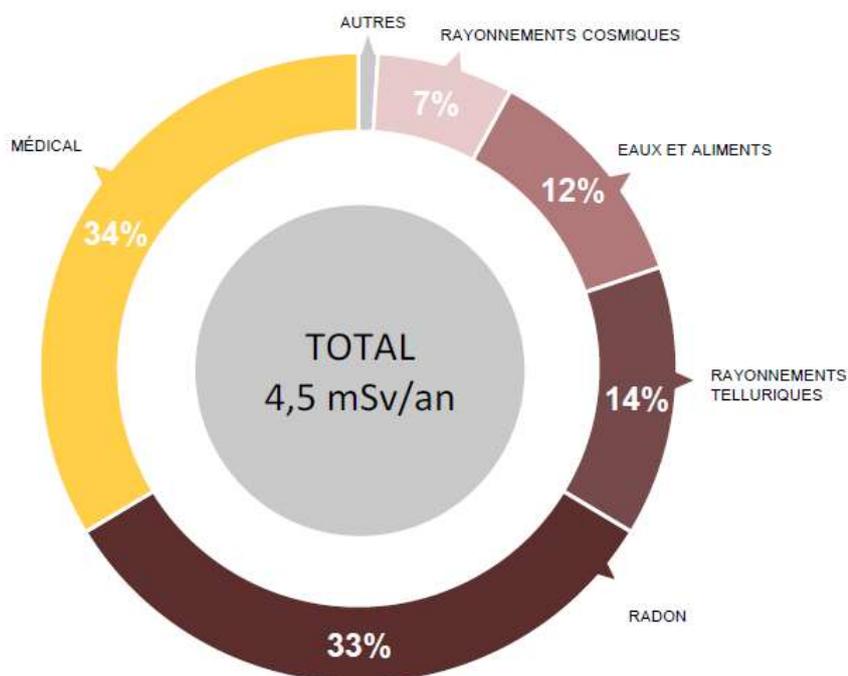


Figure 4 : Part relative des différentes sources d'expositions de la population française aux rayonnements ionisants (Source : Bilan IRSN 2021)

Les tableaux suivants fournissent les valeurs de dose efficace totale calculées à partir des rejets radioactifs réels de l'année 2023 effectués par le CNPE de Paluel, pour la personne représentative. Cette personne représente les individus pouvant recevoir la dose efficace annuelle maximale induite par les rejets d'effluents radioactifs autorisés du CNPE.

ADULTE	Exposition externe (mSv)	Exposition interne (mSv)	Total (mSv)
Rejets d'effluents à l'atmosphère	1,6E-06	8,0E-05	8,1E-05
Rejets d'effluents liquides	1,8E-04	2,3E-04	4,0E-04
Total	1,8E-04	3,1E-04	4,8E-04

ENFANT DE 10 ANS	Exposition externe (mSv)	Exposition interne (mSv)	Total (mSv)
Rejets d'effluents à l'atmosphère	1,4E-06	8,8E-05	8,9E-05
Rejets d'effluents liquides	5,9E-04	1,1E-04	7,1E-04
Total	5,9E-04	2,0E-04	8,0E-04

ENFANT DE 1 AN	Exposition externe (mSv)	Exposition interne (mSv)	Total (mSv)
Rejets d'effluents à l'atmosphère	1,4E-06	1,1E-04	1,1E-04
Rejets liquides	2,2E-04	3,1E-05	2,5E-04
Total	2,2E-04	1,4E-04	3,6E-04

Les valeurs de doses calculées sont inférieures à 1.10^{-3} mSv/an pour l'adulte, pour l'enfant de 10 ans et pour l'enfant de 1 an.

Les valeurs de doses calculées pour l'adulte, l'enfant de 10 ans et l'enfant de 1 an, attribuables aux rejets d'effluents radioactifs de l'année 2023 sont plus de 1 000 fois inférieures à la limite d'exposition fixée à 1 mSv par an pour la population, par l'article R1333-11 du Code de la Santé Publique. L'ensemble des populations résidant de manière permanente ou temporaire autour du CNPE est exposé à une dose efficace inférieure ou égale à la dose calculée pour la personne représentative, présentée ci-dessus.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude d'impact de l'installation, dont les hypothèses et modalités de calcul restent pertinentes au regard des évolutions scientifiques.

Partie VIII - Gestion des déchets

Comme toute activité industrielle, la production d'électricité d'origine nucléaire génère des déchets, dont des déchets conventionnels et radioactifs à gérer avec la plus grande rigueur.

Responsable légalement, industriellement et financièrement des déchets qu'il produit, EDF a, depuis l'entrée en service de ses premières centrales nucléaires, mis en œuvre des procédés adaptés qui permettent de protéger efficacement l'environnement, les populations, les travailleurs et les générations futures contre les risques associés à ses déchets.

La démarche industrielle repose sur 4 principes :

- limiter les quantités produites et la nocivité des déchets ;
- trier par nature et niveau de radioactivité ;
- conditionner et préparer la gestion à long terme ;
- isoler les déchets de l'homme et de l'environnement.

Pour les installations nucléaires de base du CNPE de Paluel, la limitation de la production des déchets se traduit par la réduction, pour atteindre des valeurs aussi basses que possible, du volume et de l'activité des déchets dès la phase d'achat de matériel ou de la prestation, durant la phase de préparation des chantiers et lors de leur réalisation.

I. Les déchets radioactifs

Les modalités de gestion mises en œuvre visent notamment à ce que les déchets radioactifs n'aient aucune interaction avec les eaux (nappe et cours d'eau) et les sols. Les opérations de tri, de conditionnement, de préparation à l'expédition s'effectuent dans des locaux dédiés et équipés de systèmes de collecte d'effluents éventuels.

Avant de sortir des bâtiments, les déchets radioactifs bénéficient tous d'un conditionnement étanche qui constitue une barrière à la radioactivité et prévient tout transfert dans l'environnement.

Les contrôles réalisés par les experts internes et les pouvoirs publics sont nombreux et menés en continu pour vérifier l'absence de contamination.

Les déchets conditionnés et contrôlés sont ensuite expédiés vers les filières de traitement ou de stockage définitif.

Les mesures prises pour limiter les effets de ces déchets sur la santé comptent parmi les objectifs visés par les dispositions mises en œuvre pour protéger la population et les intervenants des risques de la radioactivité. L'ensemble de ces dispositions constitue la radioprotection. Ainsi, pour protéger les personnes travaillant dans les centrales, et plus particulièrement les équipes chargées de la gestion des déchets radioactifs, des mesures simples sont prises, comme la mise en place d'un ou plusieurs écrans (murs et dalles de béton, parois en plomb, verres spéciaux chargés en plomb, eau des piscines, etc.), dont l'épaisseur est adaptée à la nature du rayonnement du déchet.

1. Les catégories de déchets radioactifs

Selon la durée de vie des éléments radioactifs contenus et le niveau d'activité radiologique qu'ils présentent, les déchets sont classés en plusieurs catégories. On distingue les déchets « à vie courte » des déchets « à vie longue » en fonction de leur période (une période s'exprime

en années, jours, minutes ou secondes. Elle quantifie le temps au bout duquel l'activité radioactive initiale du déchet est divisée par deux).

Tous les déchets dits « à vie courte » ont une période inférieure ou égale à 31 ans. Ils bénéficient de solutions de gestion industrielles définitives dans les centres spécialisés de l'Andra situés dans l'Aube à Morvilliers (déchets de très faible activité, TFA) ou Soulaines (déchets de faible à moyenne activité à vie courte, FMAVC).

Ces déchets proviennent essentiellement :

- des systèmes de filtration (épuration du circuit primaire : filtres, résines, concentrats, boues...);
- des opérations de maintenance sur matériels : pompes, vannes...
- des opérations d'entretien divers : vinyles, tissus, gants...
- de certains travaux de déconstruction des centrales mises à l'arrêt définitif (gravats, pièces métalliques...).

Le conditionnement des déchets triés consiste à les enfermer dans des emballages ou contenants adaptés pour éviter toute dissémination de la radioactivité. On obtient alors des déchets conditionnés, appelés aussi « colis de déchets ». Sur les sites nucléaires, le choix du conditionnement dépend de plusieurs paramètres, notamment du niveau d'activité, des dimensions du déchet, de l'aptitude au compactage, à l'incinération et de la destination du colis. Ainsi, le conditionnement de ces déchets est effectué dans différents types d'emballages : coque ; fût ou caisson métallique ; fût plastique (PEHD : polyéthylène haute densité) pour les déchets destinés à l'incinération dans l'installation Centraco ; big-bag ou casier.

Les progrès constants accomplis, tant au niveau de la conception des centrales que de la gestion du combustible et de l'exploitation des installations, ont déjà permis de réduire les volumes de déchets à vie courte de façon significative. Ainsi, les volumes des déchets d'exploitation ont été divisés par trois depuis 1985, à production électrique équivalente.

Les déchets dits « à vie longue » ont une période supérieure à 31 ans. Ils sont générés :

- par le traitement du combustible nucléaire usé effectué dans l'usine ORANO de la Hague, dans la Manche ;
- par la mise au rebut de certaines pièces métalliques issues des réacteurs ;
- par la déconstruction des centrales d'ancienne génération.

Le remplacement de certains équipements du cœur des réacteurs actuellement en exploitation (« grappes » utilisées pour le réglage de la puissance, fourreaux d'instrumentation, etc.) produit des déchets métalliques assez proches en typologie et en activité des structures d'assemblages de combustible : il s'agit aussi de déchets « de moyenne activité à vie longue » (MAVL) qui sont entreposés dans les piscines de désactivation.

Le traitement des combustibles usés consiste à séparer les matières qui peuvent être valorisées et les déchets. Cette opération est réalisée dans les ateliers spécialisés situés dans l'usine ORANO.

Après une utilisation en réacteur pendant quatre à cinq années, le combustible nucléaire contient encore 96 % d'uranium qui peut être recyclé pour produire de nouveaux assemblages de combustible. Les 4 % restants (les « cendres » de la combustion nucléaire) constituent les déchets ultimes qui sont vitrifiés et coulés dans des conteneurs en acier inoxydable : ce sont des déchets « de haute activité à vie longue (HAVL) ». Les parties métalliques des

assemblages sont compactées et conditionnées dans des conteneurs en acier inoxydable qui sont entreposés dans l'usine précitée : ce sont des déchets « de moyenne activité à vie longue (MAVL) ».

Depuis la mise en service du parc nucléaire d'EDF, et à production énergétique équivalente, l'amélioration continue de l'efficacité énergétique du combustible a permis de réduire de 25 % la quantité de combustible consommée chaque année. Ce gain a permis de réduire dans les mêmes proportions la production de déchets issus des structures métalliques des assemblages de combustible.

La déconstruction produit également des déchets de catégorie similaire. Enfin, les empilements de graphite des anciens réacteurs dont la déconstruction est programmée généreront des déchets « de faible activité à vie longue (FAVL) ».

En ce qui concerne les déchets de haute et moyenne activité « à vie longue », la solution industrielle de gestion à long terme retenue par la loi du 28 juin 2006 est celle du stockage géologique (projet Cigéo, en cours de conception). Les déchets déjà existants sont pour le moment entreposés en toute sûreté sur leur lieu de production dans l'attente de la mise en service de l'installation ICEDA (Installation de Conditionnement et d'Entreposage des Déchets Activés).

Le tableau ci-dessous présente les différentes catégories de déchets, les niveaux d'activité et les conditionnements utilisés.

Types déchet	Niveau d'activité	Durée de vie	Classification	Conditionnement
Filtres d'eau et résines primaires	Faible et Moyenne	Courte	FMA-VC (faible et moyenne activité à vie courte)	Fûts, coques
Filtres d'air	Très faible, Faible et Moyenne		TFA (très faible activité), FMA-VC	Casiers, big-bags, futs, coques, caissons
Résines secondaires				
Concentrats, boues				
Pièces métalliques				
Matières plastiques, cellulosiques				
Déchets non métalliques (gravats...)				
Déchets graphite	Faible	Longue	FA-VL (faible activité à vie longue)	Entreposage sur site
Pièces métalliques et autres déchets actives	Moyenne		MA-VL (moyenne activité à vie longue)	Entreposage sur site (en piscine de refroidissement pour les grappes et autres déchets actives REP)

2. Le transport des déchets

Après conditionnement, les colis de déchets peuvent être orientés vers :

- le centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage des déchets de très faible activité (CIREs) exploité par l'Andra et situé à Morvilliers (Aube) ;
- le centre de stockage de l'Aube (CSA) pour les déchets à faible ou moyenne activité exploité par l'Andra et situé à Soulaines (Aube) ;
- l'installation Centraco exploitée par Cyclife France et située à Marcoule (Gard) qui reçoit les déchets destinés à l'incinération et à la fusion. Après traitement, ces déchets sont évacués vers l'un des deux centres exploités par l'Andra.

DE LA CENTRALE AUX CENTRES DE TRAITEMENT ET DE STOCKAGE

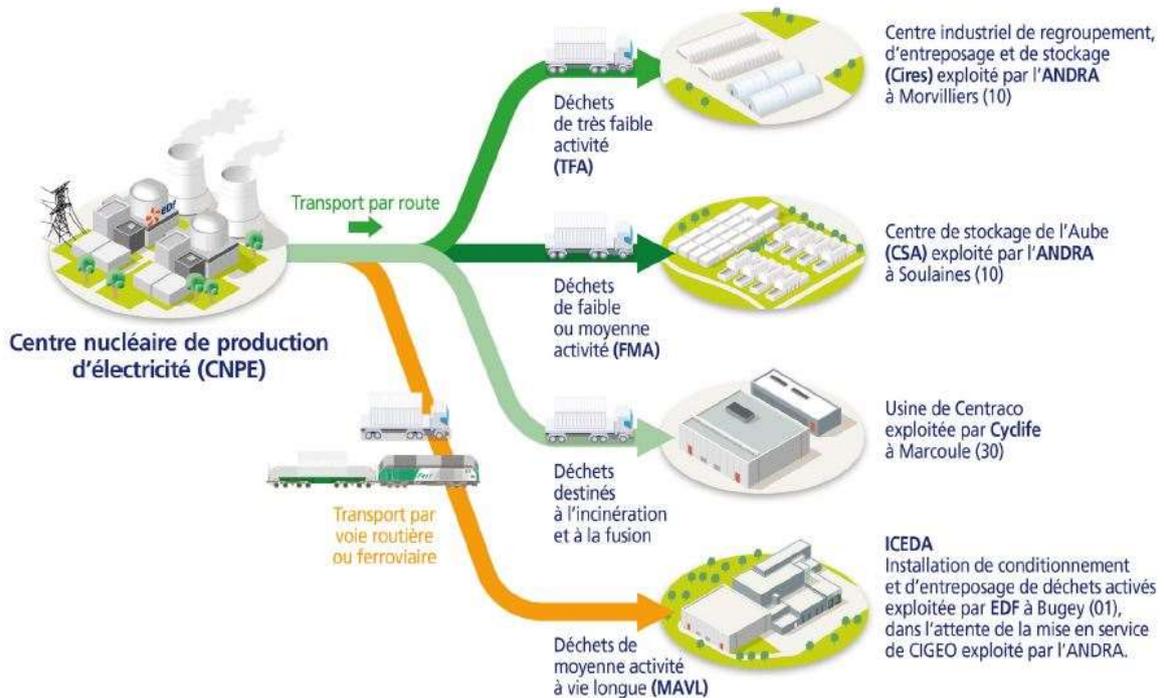


Figure 5 : Transport des déchets radioactifs (Source : EDF)

3. Les quantités de déchets entreposées au 31/12/2023

Le tableau suivant présente les quantités de déchets en attente de conditionnement au 31 décembre 2023 pour les 4 réacteurs en fonctionnement du CNPE de Paluel.

Catégorie déchet	Quantité entreposée au 31/12/2023	Commentaires
TFA	539.8	Solvants, Résines échangeuse d'ions, boues Ferraille, amiante, plomb, charbon actif, produits de grenailage
FMAVC (Liquides)/ FMAVC (Solides)	331.8	Effluents du lessivage chimique, huiles, solvants... Effluents du lessivage chimique, huiles, solvants...
FAVL	/	/
MAVL	356 objets	Présents dans les piscines de désactivation BK sur les 4 tranches

Le tableau suivant présente les quantités de déchets conditionnés en attente d'expédition au 31 décembre 2023 pour les 4 réacteurs en fonctionnement du CNPE de Paluel.

Catégorie déchet	Quantité entreposée au 31/12/2023	Type d'emballage
TFA	162 colis	Tous types d'emballages confondus
FMAVC (Liquides)	70 colis	Coques béton
FMAVC (Solides)	403 colis + 1 colis	Fûts (métalliques, PEHD) Autres (caissons, pièces massives...)
FAVL	/	/
MAVL	/	/

Le tableau suivant présente le nombre de colis évacués et les sites d'entreposage en 2023 pour les 4 réacteurs en fonctionnement du CNPE de Paluel.

Site destinataire	Nombre de colis évacués
Cires à Morvilliers	133 colis
CSA à Soulaines	532 colis
Centraco à Marcoule	1391 colis

En 2023, 2056 colis ont été évacués vers les différents sites de traitement ou de stockage appropriés (Centraco et Andra).

II. Les déchets non radioactifs

Conformément à l'arrêté INB et à la décision ASN 2015-DC-0508, les INB établissent et gèrent un plan de zonage déchets, qui vise à distinguer :

- les zones à déchets conventionnels (ZDC) d'une part, à l'intérieur desquelles les déchets produits ne sont ni contaminés ou activés ni susceptibles de l'être ;
- les zones à production possible de déchets nucléaires (ZPPDN) d'autre part, à l'intérieur desquelles les déchets produits sont contaminés, activés ou susceptibles de l'être.

Les déchets conventionnels produits par les INB sont ceux issus de ZDC et sont classés en 3 catégories :

- les déchets inertes (DI), qui ne contiennent aucune trace de substances toxiques ou dangereuses, et ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante pour l'environnement (déchets minéraux, verre, déblais, terres et gravats, ...)
- les déchets non dangereux non inertes, qui ne présentent aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux (gants, plastiques, déchets métalliques, papier/carton, caoutchouc, bois, câbles électriques, ...)
- les déchets dangereux (DD) qui contiennent des substances dangereuses ou toxiques, ou sont souillés par de telles substances (accumulateurs au plomb, boues/terres marquées aux hydrocarbures, résines, peintures, piles, néons, déchets inertes et industriels banals souillés, déchets amiantifères, bombes aérosols, ...).

.Le tableau ci-dessous présente les quantités de déchets conventionnels produites en 2023 par le CNPE.

Quantités 2023 en tonnes	Déchets dangereux		Déchets non dangereux non inertes		Déchets inertes		Total	
	Produits	Valorisés	Produits	Valorisés	Produits	Valorisés	Produits	Valorisés
Exploitation	356T	88,79%	2379T	98,25%	7656T	100%	10391T	99,22%
Déconstruction	/	/	/	/	/	/	/	/

Les déchets conventionnels sont gérés conformément aux principes définis dans la directive cadre sur les déchets :

- réduire leur production et leur dangerosité par une gestion optimisée,
- favoriser le recyclage et la valorisation.

La production de déchets inertes a été conséquente en 2023 du fait d'importants chantiers, (chantiers Centre de Crise Local, clôture Zone Protection Renforcée, projet PARTNER : pour l'aménagement de bâtiments tertiaires). Les productions de déchets dangereux et de déchets non dangereux non inertes restent relativement stables.

De nombreuses actions sont mises en œuvre par EDF pour en optimiser la gestion, afin notamment d'en limiter les volumes et les effets sur la santé et l'environnement. Parmi celles-ci, peuvent être citées :

- la création en 2006 du Groupe Déchets Economie Circulaire, chargé d'animer la gestion des déchets conventionnels pour l'ensemble des entités d'EDF. Ce groupe, qui

s'inscrit dans le cadre du Système de Management Environnemental certifié ISO 14001 d'EDF, est composé de représentants des Divisions/Métiers des différentes Directions productrices de déchets. Ses principales missions consistent à apporter de la cohérence en proposant des règles et outils de référence aux entités productrices de déchets,

- les entités productrices de déchets conventionnels disposent d'un outil informatique qui permet en particulier de maîtriser les inventaires de déchets et leurs voies de gestion,
- la définition depuis 2008 d'un objectif de valorisation pour l'ensemble des déchets valorisables. Cet objectif est actuellement fixé à 90%,
- la prise en compte de la gestion des déchets dans les contrats de gestion des sites,
- la mise en place de structures opérationnelles assurant la coordination et la sensibilisation à la gestion des déchets de l'ensemble des métiers,
- la création de stages de formation spécifiques « gestion des déchets conventionnels »,
- le recensement annuel des actions de prévention de production des déchets.

En 2023, les 4 unités de production du CNPE de Paluel ont produit 10391 tonnes de déchets conventionnels : 99,22 % de ces déchets ont été valorisés ou recyclés.

ABREVIATIONS

ANDRA - Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs

ASN - Autorité Sûreté Nucléaire

CNPE - Centre Nucléaire de Production d'Électricité

COT - Carbone Organique Total

DBO5 - Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours

DCO - Demande Chimique en Oxygène

DUS – Diesel d'Ultime Secours

EBA - Ventilation de balayage en circuit ouvert tranche à l'arrêt

ESE - Évènement Significatif Environnement

FMA - Faible Moyenne Activité

ICPE - Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

INB - Installation Nucléaire de Base

IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

ISO - International Standard Organization

KRT – Chaîne de mesure de radioactivité

MES - Matières En Suspension

PA – Produit d'Activation

PF – Produit de Fission

REX - Retour d'Expérience

SME - Système de Management de l'Environnement

SMP - Station Multi Paramètres

TAC – Turbine à Combustion

TEU - Traitement des Effluents Usés

TFA - Très Faible Activité

THE – Très Haute Efficacité

UFC - Unité Formant Colonie

ANNEXE 1 : Suivi radioécologique annuel du CNPE de PALUEL Année 2022

Le rapport Suivi radioécologique annuel du CNPE de Paluel pour l'année 2021 rédigé par l'IRSN est fourni en pièce jointe à la suite du présent rapport.



N'imprimez ce document que si vous en avez l'utilité.

EDF SA
22-30, avenue de Wagram
75382 Paris cedex 08
Capital de 1 525 484 813 euros
552 081 317 R.C.S. Paris
www.edf.fr

EDF
CNPE de Paluel
BP48 – 76450 CANY BARVILLE
Numéro de téléphone 02.35.57.66.66

Pièces jointes au Rapport
environnemental annuel relatif aux
installations nucléaires du Centre
Nucléaire de Production d'Electricité de

PALUEL

2023

Bilan rédigé au titre de l'article 4.4.4 de l'arrêté
du 7 février 2012

LISTE DES PIÈCES JOINTES

Annexe 1 - Suivi radioécologique annuel des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord pour l'année 2022 (IRSN). Parties du rapport relatives au CNPE de Paluel.

RAPPORT

SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE ANNUEL DES CNPE DE LA MANCHE ET DE LA MER DU NORD

ANNÉE 2022

Pôle Santé et Environnement

Rapport IRSN N° 2024-00233

TABLE DES MATIÈRES

0. OBJECTIFS	17
1. MÉTHODOLOGIE DU SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT PROCHE DES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ FRANÇAIS.....	17
2. ORIGINE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT DES CNPE FRANÇAIS DE LA MANCHE ET DE LA MER DU NORD	17
2.1. Radionucléides d'origine naturelle.....	18
2.1.1. Origine tellurique.....	18
2.1.2. Rayonnement cosmique et comportement du tritium et du ¹⁴ C	18
2.2. Radionucléides d'origine artificielle	19
2.2.1. Retombées des essais aériens d'armes nucléaires et des chutes de satellites	19
2.2.2. Retombées de l'accident de Tchernobyl	21
2.2.3. Retombées de l'accident de Fukushima-Daiichi	22
2.2.4. Installations nucléaires exploitées par EDF	23
2.2.5. Autres activités	24
3. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET GÉOGRAPHIQUE	25
3.1. Climatologie.....	25
3.2. Géologie et hydrogéologie.....	25
3.3. Hydrographie et hydrologie	26
4. ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE FLAMANVILLE	28
4.1. Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures	28
4.2. État radiologique de l'environnement terrestre	30
4.2.1. Stratégie d'échantillonnage.....	30
4.2.2. Résultats et interprétation	34
4.3. État radiologique de l'environnement aquatique	36
4.3.1. Stratégie d'échantillonnage.....	36
4.3.2. Résultats et interprétation	42
4.4. Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Flamanville	48
4.5. Tableaux de résultats	49
5. ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE PALUEL	73
5.1. Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures	73
5.2. État radiologique de l'environnement terrestre	75
5.2.1. Stratégie d'échantillonnage.....	75
5.2.2. Résultats et interprétation	79
5.3. État radiologique de l'environnement aquatique	81

5.3.1.	Stratégie d'échantillonnage.....	81
5.3.2.	Résultats et interprétation	86
5.4.	Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Paluel	89
5.5.	Tableaux de résultats	91
6.	ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE PENLY.....	117
6.1.	Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures	117
6.2.	État radiologique de l'environnement terrestre	119
6.2.1.	Stratégie d'échantillonnage.....	119
6.2.2.	Résultats et interprétation	123
6.3.	État radiologique de l'environnement aquatique	125
6.3.1.	Stratégie d'échantillonnage.....	125
6.3.2.	Résultats et interprétation	130
6.4.	Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Penly	134
6.5.	Tableaux de résultats	135
7.	ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE GRAVELINES	158
7.1.	Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures	158
7.2.	État radiologique de l'environnement terrestre	160
7.2.1.	Stratégie d'échantillonnage.....	160
7.2.2.	Résultats et interprétation	164
7.3.	État radiologique de l'environnement aquatique	166
7.3.1.	Stratégie d'échantillonnage.....	166
7.3.2.	Résultats et interprétation	171
7.4.	Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Gravelines.....	174
7.5.	Tableaux de résultats	175
8.	SYNTHÈSE DE L'ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DE LA MANCHE ET DE LA MER DU NORD.....	201
8.1.	Radioécologie du milieu terrestre	201
8.2.	Radioécologie du milieu marin.....	202
9.	BIBLIOGRAPHIE	205
10.	ANNEXES.....	207

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figures

Figure 1 – Localisation des installations nucléaires de la façade Manche/Mer du Nord et circulation générale des masses d’eaux (carte : [1, 2]).....	18
Figure 2 – Activités de ^3H dans l’eau de pluie d’après [3].	20
Figure 3 – Évolution de l’activité spécifique du ^{14}C dans l’hémisphère nord depuis 1950 (tirée de [3]).	21
Figure 4 - Activités surfaciques de ^{137}Cs , calculées pour l’année 2010, issues des retombées atmosphériques des essais aériens et de l’accident de Tchernobyl à partir de [18].	22
Figure 5 – Évolution des activités des principaux radionucléides artificiels mesurés dans l’air en France et en Allemagne au cours des 60 dernières années (tirée de [3]).	23
Figure 6 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l’environnement du CNPE de Flamanville.	29
Figure 7 - Localisation du CNPE de Flamanville et des stations terrestres échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.	33
Figure 8 – Variation temporelle des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des sols (cultivés et non cultivés), des végétaux cultivés (légumes), des herbes et des indicateurs végétaux (mousses terrestres et lichens) échantillonnés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville.	35
Figure 9 - Localisation du CNPE de Flamanville et des stations marines échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.	41
Figure 10 – Variation temporelle entre 2013 et 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des sédiments et des algues échantillonnés dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville.	43
Figure 11 – Variation temporelle entre 2013 et 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des mollusques échantillonnés dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville.	44
Figure 12 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des crustacés et des poissons échantillonnés dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville.	45
Figure 13 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités en ^{14}C au sein des algues et mollusques dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville.	46
Figure 14 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l’environnement du CNPE de Paluel.....	74
Figure 15 - Localisation du CNPE de Paluel et des stations terrestres échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.	78
Figure 16 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des sols (cultivés et non cultivés), des végétaux cultivés (légumes) et herbes échantillonnés dans l’environnement terrestre du CNPE de Paluel.....	80
Figure 17 - Localisation du CNPE de Paluel et des stations marines échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.	85

Figure 18 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des sédiments, des algues, des crustacés et des poissons échantillonnés dans l’environnement marin du CNPE de Paluel.....	88
Figure 19 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l’environnement du CNPE de Penly.....	118
Figure 20 - Localisation du CNPE de Penly et des stations terrestres échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.	122
Figure 21 - Localisation du CNPE de Penly et des stations marines échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.	129
Figure 22 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des sédiments, des algues et des crustacés échantillonnés dans l’environnement marin du CNPE de Penly.....	132
Figure 23 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des mollusques et des poissons échantillonnés dans l’environnement marin du CNPE de Penly.	133
Figure 24 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l’environnement du CNPE de Gravelines.	159
Figure 25 - Localisation du CNPE de Gravelines et des stations terrestres échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.	163
Figure 26 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein de l’herbe et du lierre échantillonnés dans l’environnement terrestre du CNPE de Gravelines.....	165
Figure 27 - Localisation du CNPE de Gravelines et des stations marines échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.	170
Figure 28 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des sédiments et des algues échantillonnés dans l’environnement marin du CNPE de Gravelines.....	172
Figure 29 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des mollusques et des crustacés échantillonnés dans l’environnement marin du CNPE de Gravelines.....	173
Figure 30 - Activités en tritium libre ($\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ED) mesurées dans les algues, les mollusques, les crustacés et les poissons échantillonnés dans l’environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord depuis 2000. La zone violette indique le bruit de fond attendu en entrée de Manche (i.e. entre 3,7 et 5,9 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ à distance de l’usine ORANO [3, 25, 26]).	203
Figure 31 - Activités en ^{60}Co et en ^{137}Cs mesurées dans les algues échantillonnées en 2022 dans l’environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord.	204
Figure 32 - Activités en ^{14}C ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ C) dans les mollusques (patelles et moules) échantillonnés depuis 2010 dans l’environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord. Le graphique distingue les prélèvements fait en champ proche de chaque CNPE (losanges) de ceux effectués en champ lointain (triangles), et indique en violet le bruit de fond attendu hors influence industrielle (i.e., 233 ± 5 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ C d’après [3]).	204
Figure 33 - Démarche utilisée pour la réalisation du suivi radioécologique annuel de chaque site.....	211
Figure 34 - Chronique d’une incinération : montée en température et paliers en fonction du temps.	217
Figure 35 - Valeurs significatives et seuils de décision dans les graphiques.	222

Figure 36 – Teneur en ^{40}K et en radionucléides des familles du ^{232}Th et du ^{238}U dans les sols métropolitains (1er et 3ème quartiles, 1er et 9ème déciles, minimum et maximum).....	224
Figure 37 – Teneur en ^{238}U dans les sédiments métropolitains.	224

Tableaux

Tableau 1 - Identification des échantillons prélevés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique de 2022 et analyses réalisées.	31
Tableau 2 - Identification des échantillons prélevés dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville en 2022 et analyses réalisées.	37
Tableau 3 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d’échantillons de sols collectés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	49
Tableau 4 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d’échantillons de mousses et de lichens collectés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	50
Tableau 5 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d’échantillons d’herbe collectés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	51
Tableau 6 - Activités en radionucléides émetteurs β au sein d’échantillons de lierre collectés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	52
Tableau 7 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d’échantillons de légumes (salades) collectés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	53
Tableau 8 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d’échantillons de lait collectés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	54
Tableau 9 - Activités en radionucléides émetteurs β au sein d’échantillons d’eau de boisson collectés dans l’environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	55
Tableau 10 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d’échantillons de sédiments collectés dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	56
Tableau 11 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d’échantillons d’algues collectés dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	57
Tableau 12 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d’échantillons de mollusques collectés dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	58
Tableau 13 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d’échantillons de crustacés collectés dans l’environnement marin du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	59

Tableau 14 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Flamanville de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	60
Tableau 15 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sol collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	61
Tableau 16 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.....	62
Tableau 17 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.....	63
Tableau 18 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	64
Tableau 19 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	64
Tableau 20 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	65
Tableau 21 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiment collectés dans l'environnement marin du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	66
Tableau 22 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	67
Tableau 23 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	68
Tableau 24 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.....	69
Tableau 25 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.....	70
Tableau 26 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	71
Tableau 27 - Activités en ^{63}Ni mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	72
Tableau 28 - Activités en ^{55}Fe mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2022.	72
Tableau 29 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique de 2022 et analyses réalisées.	76
Tableau 30 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel en 2022 et analyses réalisées.	82
Tableau 31 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	91

Tableau 32 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses et de lichens collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	92
Tableau 33 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'herbe collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	93
Tableau 34 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de salades collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	94
Tableau 35 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de lait collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	95
Tableau 36 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'eau de boisson collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	96
Tableau 37 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	97
Tableau 38 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'algues collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	99
Tableau 39 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de mollusques collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	100
Tableau 40 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de crustacés collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	103
Tableau 41 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	105
Tableau 42 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sol collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	106
Tableau 43 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	107
Tableau 44 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	108
Tableau 45 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	109
Tableau 46 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	109
Tableau 47 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	110

Tableau 48 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiment collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	111
Tableau 49 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	112
Tableau 50 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	113
Tableau 51 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	114
Tableau 52 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	114
Tableau 53 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	115
Tableau 54 - Activités en ^{63}Ni mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	116
Tableau 55 - Activités en ^{55}Fe mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.	116
Tableau 56 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique de 2022 et analyses réalisées.	120
Tableau 57 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Penly en 2022 et analyses réalisées.	126
Tableau 58 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	135
Tableau 59 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses et lichens collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	136
Tableau 60 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'herbe collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	137
Tableau 61 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de salades collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	138
Tableau 62 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de lait collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	139
Tableau 63 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'eau de boisson collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	140
Tableau 64 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	141

Tableau 65 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'algues collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	143
Tableau 66 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de mollusques collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	144
Tableau 67 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de crustacés collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	145
Tableau 68 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	146
Tableau 69 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sol collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	147
Tableau 70 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	148
Tableau 71 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	149
Tableau 72 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	150
Tableau 73 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	150
Tableau 74 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	151
Tableau 75 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiment collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	152
Tableau 76 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	153
Tableau 77 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	154
Tableau 78 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	155
Tableau 79 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	155
Tableau 80 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	156
Tableau 81 - Activités en ^{63}Ni mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	157
Tableau 82 - Activités en ^{55}Fe mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2022.	157

Tableau 83 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique de 2022 et analyses réalisées.	161
Tableau 84 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines en 2022 et analyses réalisées.	167
Tableau 85 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	175
Tableau 86 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	176
Tableau 87 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'herbe collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	177
Tableau 88 - Activités en radionucléides émetteurs β au sein d'échantillons de lierre collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	179
Tableau 89 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de légumes (salades, choux-fleurs et pommes de terre) collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	180
Tableau 90 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de lait collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	181
Tableau 91 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'eau de boisson et d'irrigation collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	182
Tableau 92 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	183
Tableau 93 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'algues collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	184
Tableau 94 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de mollusques collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	185
Tableau 95 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de crustacés collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	186
Tableau 96 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.	187
Tableau 97 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sol collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	188

Tableau 98 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	189
Tableau 99 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	190
Tableau 100 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	191
Tableau 101 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	191
Tableau 102 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	192
Tableau 103 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiment collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	193
Tableau 104 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	195
Tableau 105 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	196
Tableau 106 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	198
Tableau 107 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	198
Tableau 108 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	199
Tableau 109 - Activités en ^{63}Ni mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	200
Tableau 110 - Activités en ^{55}Fe mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2022.	200

0. OBJECTIFS

Électricité de France (EDF) a sollicité l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) pour effectuer un suivi radioécologique annuel de l'environnement proche des Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE) de la Manche et de la Mer du Nord.

L'objectif de cette étude est de caractériser, chaque année, les niveaux de radioactivité dans l'environnement proche des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord (Flamanville, Paluel, Penly et Gravelines) dans un grand nombre de matrices du compartiment terrestre et marin et pour un large spectre de radionucléides. Il s'agit d'identifier les différentes sources, passées ou présentes, à l'origine de la présence de ces radionucléides observés dans l'environnement et d'analyser l'évolution de leurs concentrations dans les matrices au cours de la dernière décennie.

1. MÉTHODOLOGIE DU SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT PROCHE DES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ FRANÇAIS

La stratégie de prélèvements et d'analyses définie par EDF est commune à l'ensemble des sites. Des contraintes supplémentaires peuvent localement modifier le point de collecte, le nombre ou la nature des analyses réalisées. Le choix des stations et de la nature des prélèvements permet la comparaison des résultats avec ceux des études antérieures. Les stations de prélèvements ont été définies en fonction du régime éolien local en milieu terrestre, et en fonction de l'hydrodynamisme local en milieu marin (Annexe 1).

Les matrices échantillonnées sont les plus abondantes localement et/ou caractéristiques de l'économie locale (Annexe 2 et Annexe 3). Elles correspondent également, pour la plupart, aux espèces prélevées lors de l'état de référence et au cours de la dernière décennie. Les matrices prélevées tiennent également compte de la réglementation applicable à chaque CNPE.

L'ensemble des analyses sont réalisées à fréquence annuelle, ainsi qu'à fréquence trimestrielle pour le ^{14}C mesuré dans les végétaux terrestres (Annexe 3), voire quinquennale pour quelques techniques plus pointues. Dans la plupart des matrices collectées, une analyse gamma, une analyse de tritium organiquement lié voire de tritium libre, et une analyse de ^{14}C sont réalisées (Annexe 4, Annexe 7, Annexe 8 et Annexe 1). Dans certaines matrices, des analyses supplémentaires peuvent être réalisées (Annexe 4). L'analyse des émetteurs gamma d'origine naturelle permet de caractériser les échantillons prélevés, de vérifier la qualité des prélèvements et des analyses. Les méthodes de prélèvement, de préparation et d'analyses des échantillons mises en œuvre aux fins de la présente étude sont détaillées en annexes (Annexe 5, Annexe 6 et Annexe 7).

2. ORIGINE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT DES CNPE FRANÇAIS DE LA MANCHE ET DE LA MER DU NORD

La présence de radionucléides artificiels dans l'environnement marin et terrestre des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord résulte des retombées atmosphériques globales liées aux essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère, des rentrées atmosphériques de satellites artificiels, des utilisations médicales de sources radioactives et des rejets industriels d'effluents des installations nucléaires (Figure 1 page 18) ainsi que des retombées atmosphériques des accidents de Tchernobyl et, dans une moindre mesure, de Fukushima Daiichi.

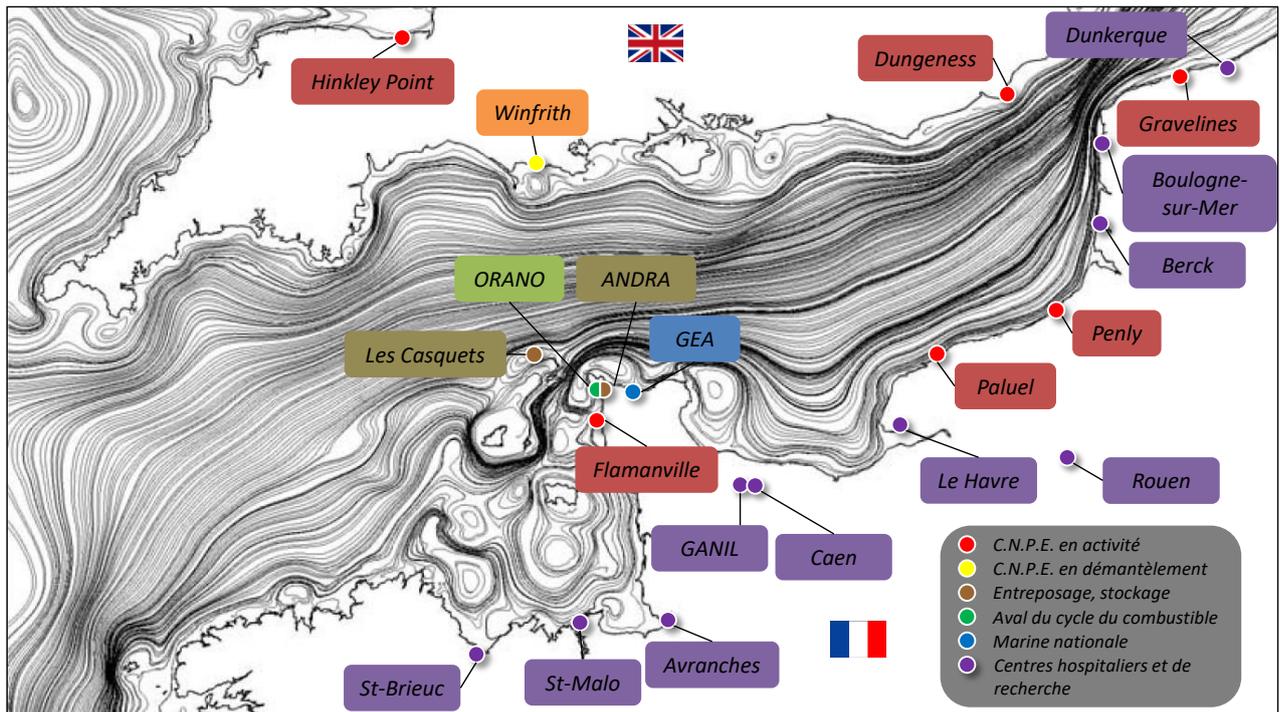


Figure 1 – Localisation des installations nucléaires de la façade Manche/Mer du Nord et circulation générale des masses d’eaux (carte : [1, 2]).

2.1. Radionucléides d’origine naturelle

Le bruit de fond radiologique naturel a deux origines : les radionucléides telluriques présents dans l’écorce terrestre et le rayonnement cosmique qui produit de manière permanente des radionucléides dits cosmogéniques.

2.1.1. Origine tellurique

Les radionucléides d’origine tellurique sont principalement le ^{40}K et les produits des chaînes de désintégration de l’ ^{238}U , de l’ ^{235}U et du ^{232}Th . Présents dans l’écorce terrestre, ces radionucléides sont persistants dans les divers compartiments de l’environnement du fait de leur période radioactive très longue, jusqu’à plusieurs milliards d’années. Leurs niveaux d’activité usuels sont indiqués dans le bilan de l’état radiologique de l’environnement français de 2018 à 2020 [3].

2.1.2. Rayonnement cosmique et comportement du tritium et du ^{14}C

Le rayonnement cosmique en provenance du soleil et de l’espace interagit avec la haute atmosphère terrestre et engendre en permanence la production de radionucléides cosmogéniques, comme le tritium (^3H), le ^{14}C , ^7Be et le ^{22}Na . Leurs niveaux d’activité usuels sont indiqués dans le bilan de l’état radiologique de l’environnement français de 2018 à 2020 [3].

Le ^3H et le ^{14}C ont également une origine anthropique, qui sera traitée plus en détail dans le paragraphe 2.2.

En tant qu’isotope de l’hydrogène, le ^3H (période radioactive : 12,312 ans [4]) est lié au cycle de cet élément dans l’environnement. Il peut être présent dans toutes les molécules hydrogénées, être associé aussi bien à l’eau

tissulaire qu'à la matière organique des végétaux et des animaux. Sous la forme d'eau tritiée (HTO et TED par déshydratation de la matière organique), ce radionucléide est extrêmement mobile dans l'environnement et dans tous les systèmes biologiques et, de ce fait rapidement intégré dans de nombreux cycles de la géosphère et de la biosphère. En situation d'équilibre, il ne s'accumule pas préférentiellement dans les composantes de l'environnement. Les activités en tritium métabolisé dans la matière organique (tritium organiquement lié, TOL) sont généralement à l'équilibre avec les activités en HTO [5, 6, 7]. Avant l'ère nucléaire, les valeurs en ^3H atmosphérique étaient de l'ordre de 0,1 à 0,6 Bq.L⁻¹.

S'agissant du ^{14}C (période radioactive : 5 700 ans [4]), en milieu terrestre, les observations permettent de montrer que l'activité spécifique, exprimée en becquerels de ^{14}C par kilogramme de carbone total (Bq.kg⁻¹ C), est en équilibre dans les composantes de l'environnement, notamment avec celle du CO₂ atmosphérique.

2.2. Radionucléides d'origine artificielle

2.2.1. Retombées des essais aériens d'armes nucléaires et des chutes de satellites

Entre 1945 et 1980, les États-Unis d'Amérique, l'Union Soviétique, la France, la Grande-Bretagne et la Chine ont procédé à plus de 500 essais aériens d'armes nucléaires, l'essentiel de la puissance ayant été libéré entre 1954 et 1958, puis en 1961 et 1962 [8]. Les particules radioactives libérées dans la troposphère et la stratosphère au cours de ces essais sont retombées sur l'ensemble du globe, mais en raison de la localisation des sites de tirs, l'hémisphère nord a reçu la majorité des retombées radioactives issues de ces essais. En France métropolitaine, les retombées de ces essais ont été globalement homogènes et constituent une source principale de radioactivité artificielle dans l'environnement.

En termes d'activité, les dépôts les plus importants concernent les radionucléides à vie courte. Ainsi, en France, les dépôts d' ^{131}I , de ^{95}Zr , de $^{144}\text{Ce/Pr}$ et de $^{106}\text{Ru/Rh}$ (périodes radioactives respectives de 8,0233, 64,032, 285,0 et 371,5 jours [4]), aujourd'hui disparus, ont été 10 fois plus importants que les dépôts de radionucléides à vie moyenne (^{90}Sr et ^{137}Cs , de 28,80 et 30,05 ans de périodes radioactives respectives [4]). Les dépôts de radionucléides à vie longue (^{241}Am ¹, ^{14}C , ^{240}Pu et ^{239}Pu , de 432,6, 5 700, 6 561 et 24 100 ans de périodes respectives [4]) ont été comparativement très faibles [8]. Le ^{137}Cs , le ^{90}Sr , le ^{238}Pu , le $^{239, 240}\text{Pu}$ et l' ^{241}Am sont encore détectés aujourd'hui dans de nombreux compartiments. Leurs faibles décroissances radioactives et, pour certains, leurs faibles mobilités dans les sols entretiennent un marquage ne diminuant que lentement depuis le milieu des années 1960 [8]. Dans une moindre mesure, la désintégration de onze satellites artificiels lors de leur entrée dans l'atmosphère, entre 1964 et 1996, a provoqué la dispersion dans l'atmosphère terrestre de ^{238}Pu , d' ^{235}U et de leurs produits de fission, puis leurs retombées sur l'ensemble de la planète. Pour ces radionucléides, l'activité rémanente des retombées anciennes constitue, dans le cadre de la présente étude, un bruit de fond radiologique dont les valeurs sont présentées dans le bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2018 à 2020 [3] et plus brièvement ci-dessous. En 2020, sur la majeure partie de la France, les activités rémanentes en ^{137}Cs des retombées des essais aériens étaient comprises entre 1 400 et 2 000 Bq.m⁻² [9], compte tenu de la seule décroissance radioactive du ^{137}Cs . Elles ont été augmentées par les retombées de l'accident de Tchernobyl (voir paragraphe suivant). En comparaison, celles de l'accident de Fukushima-Daiichi sont beaucoup plus faibles (voir paragraphe 2.2.3).

Le ^3H a été massivement émis lors des essais aériens d'armes nucléaires. De plus de 500 Bq.L⁻¹ dans les eaux de pluie analysées à Thonon-les-Bains ou à Vienne dans les années 1960, l'activité volumique a décliné à moins de 10 Bq.L⁻¹ dès la fin des années 1970. Depuis la fin des années 1990, elle est inférieure à 2 Bq.L⁻¹ [3, 10, 11, 12, 13] (Figure 2 page 20).

¹ L' ^{241}Am n'a pas été produit directement lors des essais mais par la décroissance du ^{241}Pu (T=14,4 ans).

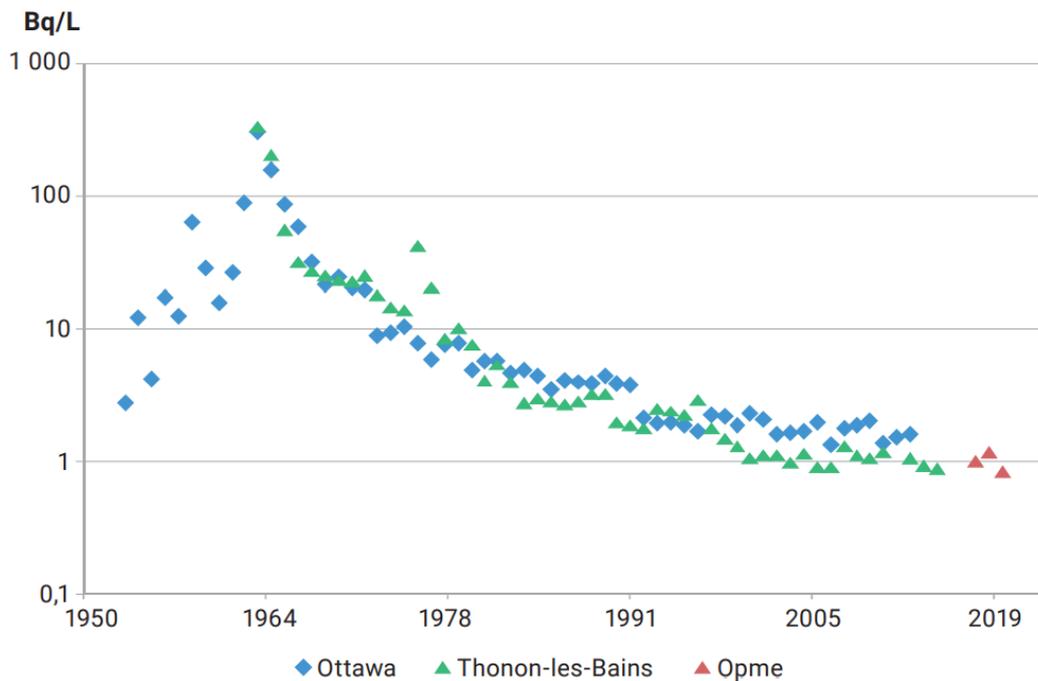


Figure 2 – Activités de ^3H dans l'eau de pluie d'après [3].

Le tritium produit lors des essais aériens est quantifiable aujourd'hui sous les formes libres (HTO directement dans l'eau et TED par collecte de l'eau de dessiccation, exprimés respectivement en Bq.L^{-1} et en Bq.L^{-1} d'eau de dessiccation, abrégé en Bq.L^{-1} ED) et liée à la matière organique (TOL, exprimé en Bq.L^{-1} d'eau de combustion, abrégé en Bq.L^{-1} EC). Hors influence industrielle locale, les formes libres (HTO et TED) sont à l'équilibre avec les niveaux atmosphériques actuels. Le bruit de fond radiologique du tritium libre et du tritium organiquement lié en milieu terrestre hors influence d'un rejet est de l'ordre de $1,0 \text{ Bq.L}^{-1}$ en France métropolitaine (dans une gamme allant de $0,34$ à $1,7 \text{ Bq.L}^{-1}$ pour le TOL, et de $0,5$ à 2 Bq.L^{-1} pour l'HTO et le TED d'après [3]) pour les matrices annuelles, proche des activités en tritium libre de la vapeur d'eau atmosphérique. En milieu marin, l'activité naturelle du tritium dans les eaux de surface (de l'ordre de $0,1 \text{ Bq.L}^{-1}$ [5, 14]) a plus que doublé du fait des retombées des essais nucléaires atmosphériques.

Les essais aériens d'armes nucléaires ont également conduit à l'époque à doubler les quantités de ^{14}C présent dans l'atmosphère. L'activité spécifique atmosphérique en ^{14}C a atteint plus de $400 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ C}$ avant de décroître suite à l'arrêt des essais atmosphériques ainsi qu'à l'augmentation des rejets de CO_2 dans l'atmosphère liée à l'utilisation de combustibles fossiles, dépourvus de ^{14}C [15]. En 1999, l'activité spécifique dans le milieu terrestre s'élevait à $255 \pm 7 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ C}$. En 2022, elle est de $222 \pm 7 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ C}$ d'après [3], de l'ordre de grandeur de l'activité spécifique atmosphérique antérieure aux premiers essais aériens ($226,0 \pm 1,1 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ C}$) (Figure 3 page 21).

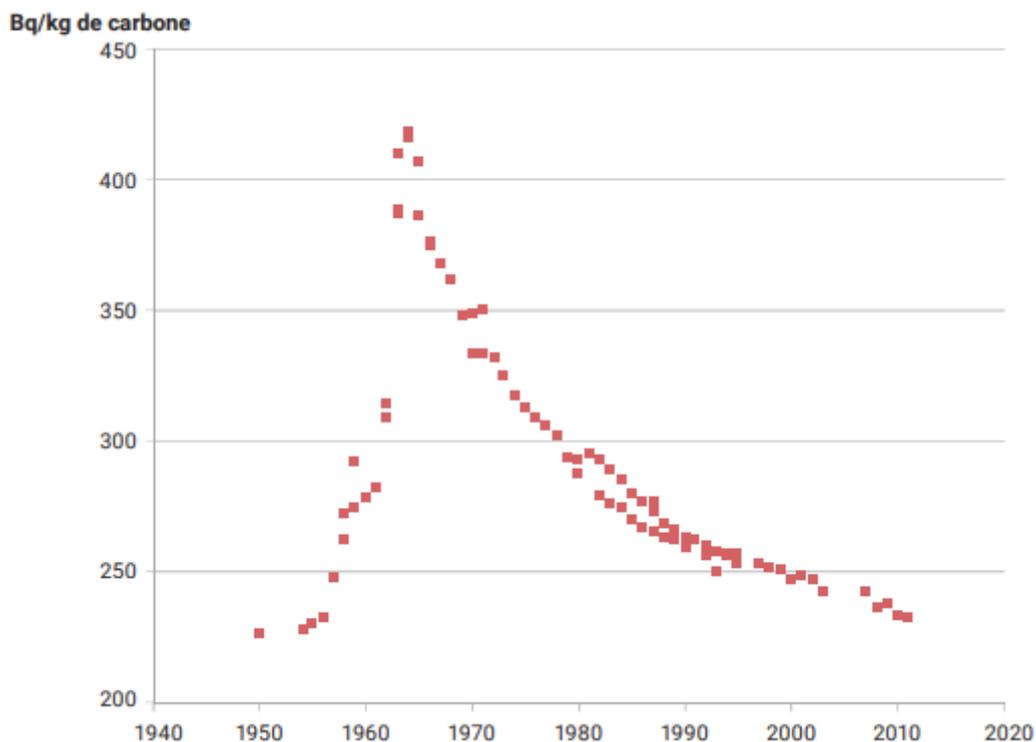


Figure 3 – Évolution de l'activité spécifique du ^{14}C dans l'hémisphère nord depuis 1950 (tirée de [3]).

Le ^{14}C des écosystèmes d'eau douce n'est pas en équilibre avec le $^{14}\text{CO}_2$ atmosphérique du fait de sa dilution notamment par les carbonates des roches sédimentaires anciennes dépourvues de ^{14}C . L'activité spécifique hors influence industrielle locale peut donc être plus faible et variable en fonction de la teneur en carbonates anciens, entre 200 et 220 $\text{Bq.kg}^{-1}\text{C}$ [3]. En milieu marin, le ^{14}C rejeté est en grande majorité sous forme minérale dissoute [16] et peut donc être incorporé ensuite à la matière organique. À proximité des points de rejets, lorsque les variations des quantités rejetées sont rapides et amples, l'état d'équilibre entre les activités spécifiques de la matière organique et de l'eau de mer n'est pas toujours atteint [16]. Les activités mesurées en Manche au Cap de la Hague, site proche du point de rejet de l'usine ORANO, sont par exemple comprises entre 300 et 800 $\text{Bq.kg}^{-1}\text{C}$ dans les matrices biologiques et l'eau de mer. Le bruit de fond en entrée de Manche est quant à lui estimé à $233\pm 5\text{ Bq.kg}^{-1}\text{C}$ en 2022, sur la base de mesures dans les algues et les mollusques effectuées entre 2001 et 2019 en entrée de Manche, à Concarneau et Roscoff, et du bilan radiologique 2018-2020 [3].

De nos jours, les apports industriels en ^3H et ^{14}C , notamment ceux liés aux CNPE, peuvent être identifiés, dans le milieu terrestre, par des activités mesurées un peu plus élevées dans des feuilles d'arbre et de lierre à proximité du CNPE ou dans l'herbe prélevée à la station AS1 et, dans le milieu aquatique, par des activités mesurées plus élevées dans les végétaux aquatiques et les poissons prélevés en champ proche du CNPE, comparativement au champ lointain.

2.2.2. Retombées de l'accident de Tchernobyl

Le 26 avril 1986, le réacteur n°4 de la centrale de Tchernobyl (Ukraine), en service depuis 3 ans, explose accidentellement lors de la réalisation d'un essai technique. L'énergie libérée par l'explosion entraîne l'émission dans l'atmosphère de produits de fission et d'activation jusqu'à plus de 1 200 mètres de hauteur. Pendant dix jours, près de 10^7 TBq sont libérés dans l'environnement, la majorité des radionucléides émis ayant une période radioactive inférieure à un mois. Jusqu'à la mi-mai 1986, la dispersion du panache radioactif dissémine divers

radionucléides sur la plupart des pays d'Europe. La dispersion du panache radioactif s'accompagne d'une dilution de l'activité volumique des radionucléides artificiels au sein de celui-ci. Ainsi, l'activité mesurée au sein du panache au voisinage du réacteur accidenté, de l'ordre de 10^7 Bq/m³, n'était plus que de quelques dizaines de Bq/m³ lorsque le panache a atteint la France métropolitaine durant la première semaine de mai 1986. Les événements pluvieux concomitants ont favorisé le dépôt des particules. Dix-neuf radionucléides ont été détectés dans les retombées de l'accident de Tchernobyl et sept ont principalement été mis en évidence sur le territoire français (¹⁰³Ru, ¹⁰⁶Ru/Rh, ^{110m}Ag, ¹³¹I, ¹³²Te, ¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs). Les retombées atmosphériques de l'accident de Tchernobyl ont affecté l'ensemble du territoire et, plus particulièrement, la moitié est de la France. Comparativement, l'environnement proche des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord a été relativement peu impacté par ces retombées. La carte de la Figure 4 page 22 présente la répartition estimée des activités surfaciques en ¹³⁷Cs sur cette zone, issues de la rémanence de ces retombées. De nos jours, seul le ¹³⁷Cs est encore mesurable [17].

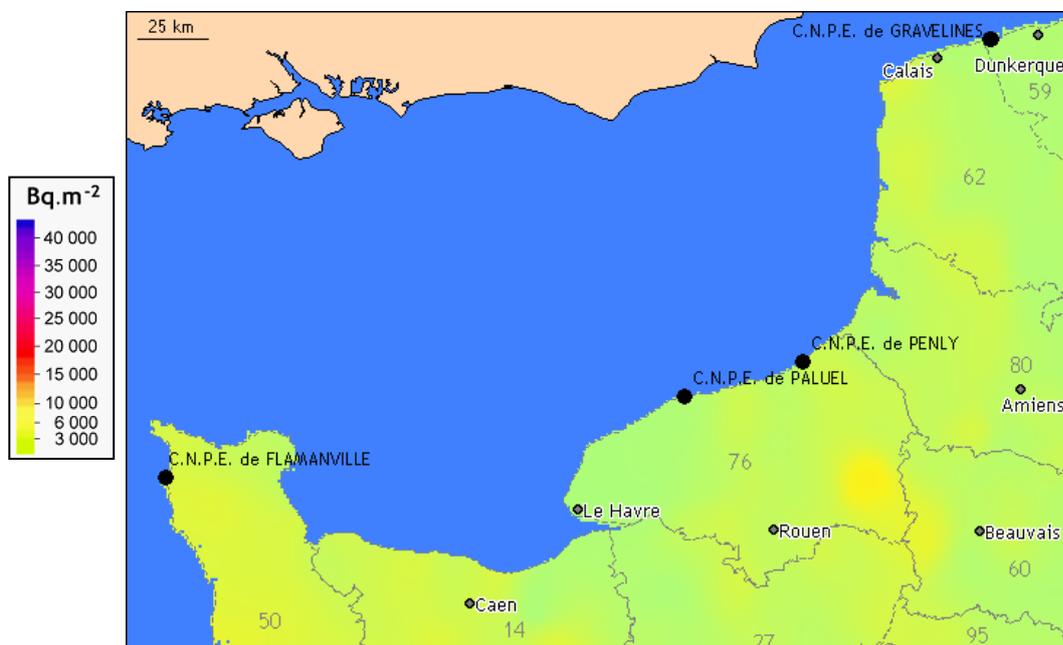


Figure 4 - Activités surfaciques de ¹³⁷Cs, calculées pour l'année 2010, issues des retombées atmosphériques des essais aériens et de l'accident de Tchernobyl à partir de [18].

2.2.3. Retombées de l'accident de Fukushima-Daiichi

Les dépôts issus des retombées atmosphériques de l'accident de Fukushima Daiichi survenu le 11 mars 2011 ont été de 500 à plus de 1 000 fois inférieurs à ceux mesurés début mai 1986 en France après l'accident de Tchernobyl (Figure 4 page 22). Les résultats des analyses réalisés sur le territoire métropolitain par l'IRSN et par les exploitants nucléaires ont montré la présence de ¹³¹I, de ¹³⁷Cs et de ¹³⁴Cs [19]. Le ¹³¹I, du fait de sa courte période radioactive (8,02 jours [4]), a rapidement disparu de l'environnement. Le ¹³⁴Cs, dont le dépôt massif issu des retombées de l'accident de Tchernobyl n'était plus détecté compte tenu de sa courte période radioactive (2,06 ans [4]), a pu être attribué à cet accident. En revanche, les résultats de ¹³⁷Cs sont difficilement imputables à ce seul événement compte-tenu de la rémanence de ce radionucléide sur le littoral de la Manche et de la Mer du Nord.

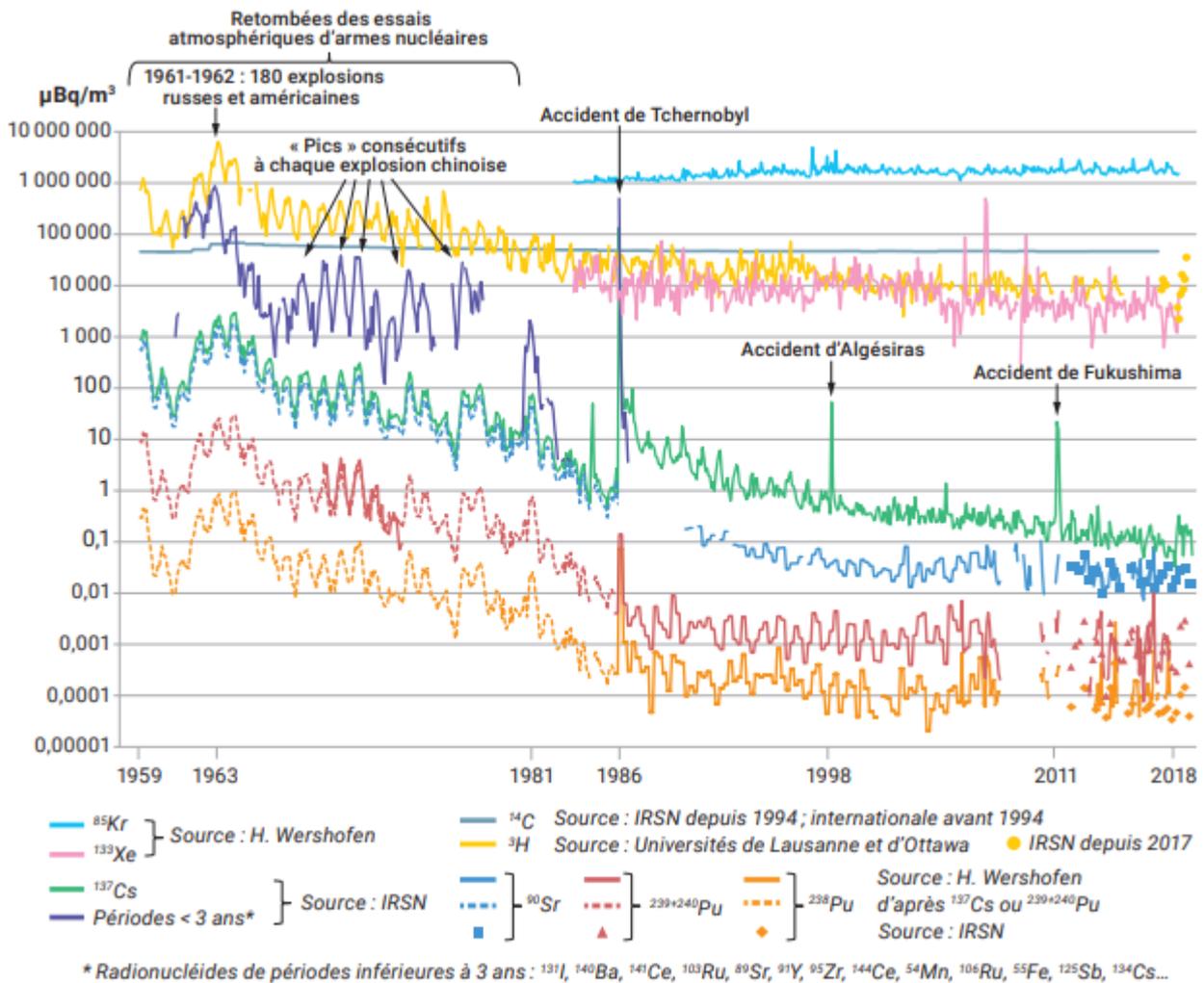


Figure 5 – Évolution des activités des principaux radionucléides artificiels mesurés dans l'air en France et en Allemagne au cours des 60 dernières années (tirée de [3]).

2.2.4. Installations nucléaires exploitées par EDF

L'exploitation d'un réacteur nucléaire implique la génération d'isotopes radioactifs issus de la fission des noyaux du combustible (produits de fission) et de l'activation des différents matériaux, notamment ceux de la structure et de certains composés issus du conditionnement des circuits (produits d'activation). Dans le cadre des décisions de rejets émises par l'ASN, les CNPE sont autorisés à rejeter, en fonctionnement normal, une partie de ces produits de fission et d'activation dans l'environnement par voie liquide et/ou atmosphérique. Ces rejets sont ainsi susceptibles de marquer l'environnement autour des installations nucléaires.

Les rejets d'effluents radioactifs atmosphériques des CNPE comprennent notamment le tritium, le ¹⁴C, l'⁴¹Ar, les xénon 131 métastable, 133 et 135, le ⁸⁵Kr, les ¹³¹I et ¹³³I, les ⁵⁸Co et ⁶⁰Co et les ¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs. Au sein des rejets d'effluents radioactifs liquides, le tritium, le ¹⁴C, les ⁵⁸Co et ⁶⁰Co, le ⁶³Ni, les ¹²⁴Sb et ¹²⁵Sb, les ¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs, le ⁵⁴Mn, l'^{110m}Ag, le ^{123m}Te, et l'¹³¹I sont prépondérants. Le ⁵⁵Fe et le l'^{108m}Ag sont rejetés dans une moindre mesure.

Les conditions d'exécution et les limites des rejets d'effluents, en mer et dans l'atmosphère, sont définies par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). L'exploitant n'a pas porté à la connaissance de l'IRSN d'évènements intéressants l'environnement pour l'année 2022.

2.2.5. Autres activités

Au regard de la circulation hydrodynamique et du contexte nucléaire en Manche et en Mer du Nord, l'environnement côtier est susceptible d'être marqué par les rejets d'effluents liquides d'autres installations nucléaires de base (INB) côtières localisées à proximité, et notamment ceux de l'usine de traitement de combustibles usés ORANO La Hague, dont les niveaux d'activité en radionucléides émetteurs gamma sont de 2 à 4 ordres de grandeur supérieurs à ceux d'un CNPE. En outre, les rejets d'effluents liquides d'ORANO sont susceptibles de marquer l'environnement côtier en radionucléides émetteurs alpha tel que le ^{241}Am et les isotopes 238, 239, et 240 du plutonium. Les rejets de l'usine de retraitement de Sellafield (Royaume-Uni) contribuent également potentiellement à l'apport de ^{137}Cs et de ^3H en Manche et en Mer du Nord.

Outre la filière énergétique, plusieurs unités hospitalières, centres de recherche et sites industriels sont également présentes sur le territoire étudié, le long du littoral même (Dunkerque, Boulogne-sur-Mer en particulier) ou le long des fleuves se déversant dans la Manche et la Mer du Nord (ex. : la Seine, avec Paris, Rouen, et Le Havre en particulier). Parmi les principaux radionucléides utilisés en médecine nucléaire, le $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (en diagnostic fonctionnel, période radioactive de 6 heures [4]) et l' ^{131}I (en thérapie métabolique, période radioactive de 8,02 jours [4]) représentent à eux seuls près de 99% de la radioactivité utilisée par les services de médecine nucléaire [20]. L' ^{131}I ainsi introduit dans l'environnement via les urines et les selles des patients traités peut être détecté dans les stations d'épuration et en aval des celles-ci. Difficile à détecter dans l'eau, l' ^{131}I peut être mesuré dans les végétaux, et en particulier les algues marines, dont le facteur de concentration pour l'iode est de l'ordre de 10^3 à 10^4 [21]. En Basse-Normandie, quatre sites non électronucléaires (centres hospitaliers et le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds à Caen (GANIL)) génèrent des rejets radioactifs (Figure 1 page 18), dans les agglomérations d'Avranches, de Cherbourg et de Caen, en « aval » du CNPE de Flamanville au sens de la circulation générale des masses d'eau en Manche (sauf pour Avranches, situé en « amont »). Le CNPE de Flamanville est situé en « amont » des trois autres CNPE au regard de la circulation générale des masses d'eau en Manche. On peut également citer la présence d'installations hospitalières dans le quart nord-est de la Bretagne, à Saint-Brieuc et Saint-Malo, situés en « amont » du CNPE de Flamanville au regard de la circulation générale des masses d'eau en Manche. En Haute-Normandie, six sites non électronucléaires (centres hospitaliers, centre de recherche et sites industriels) génèrent des rejets radioactifs (Figure 1 page 18), comme celles des agglomérations de Rouen et du Havre. Enfin, dans le Nord-Pas-de-Calais, treize centres hospitaliers disposent d'une unité de médecine nucléaire, comme celles des agglomérations de Dunkerque, Boulogne-sur-Mer, et Berck (Figure 1 page 18). Considérant les périodes radioactives du $^{99\text{m}}\text{Tc}$ et de l' ^{131}I , la localisation géographique des installations hospitalières et de recherche, les temps de transit des masses d'eaux, les taux de dilution au sein de celles-ci, et la direction de la circulation résiduelle des masses d'eau en Manche, il apparaît peu probable que les rejets d'effluents radioactifs de ces diverses installations puissent marquer l'environnement côtier des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord de manière décelable, à l'exception peut-être des algues prélevées au Cap Gris Nez en champ lointain du CNPE de Gravelines, qui pourraient éventuellement être marquées par les rejets d'effluents radioactifs du Centre Hospitalier de Boulogne sur Mer, situé à 16 km en "amont" au regard de la circulation générale des masses d'eau. Les autres installations présentées sur la Figure 1 page 18 représentent elles aussi des sources de radionucléides négligeables par rapport aux rejets de l'usine de traitement de combustibles usés ORANO La Hague.

De nos jours, les apports industriels, notamment ceux liés aux usines de traitement de combustibles usés, sont les principales sources de tritium et de ^{14}C dans les écosystèmes marins. Ainsi, dans la Manche et la Mer d'Irlande, les activités mesurées en tritium varient généralement de 0,3 à 10 Bq.L^{-1} , tandis qu'elles sont comprises entre 0,1 et 0,2 Bq.L^{-1} dans les eaux de surface de l'Atlantique Nord. Le ^{14}C est rejeté en milieu marin en grande majorité sous forme minérale dissoute [22] et peut donc être incorporé ensuite à la matière organique. À proximité des points de rejets, lorsque les variations des quantités rejetées sont rapides et amples, l'état d'équilibre entre les activités spécifiques de la matière organique et de l'eau de mer n'est pas toujours atteint [16]. Les activités mesurées en Manche au Cap de la Hague, site proche du point de rejet de l'usine ORANO, sont par exemple comprises entre 300 et 800 $\text{Bq.kg}^{-1}\text{C}$ [22].

3. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET GÉOGRAPHIQUE

3.1. Climatologie

Le CNPE de Flamanville est situé au pied d'un cap granitique sur la côte nord-ouest du Cotentin en Basse Normandie. Du fait de sa situation géographique, le Cotentin est caractérisé par un climat tempéré océanique. Proche du 50^{ème} parallèle, ceint par la mer sur trois côtés, le courant chaud du Gulf Stream fait encore sentir ses effets et confère à l'hiver une certaine douceur. Les températures estivales à la côte, comprises en moyenne entre 19 et 24°C, peuvent baisser de quelques degrés sous l'effet de la brise de mer. Les hivers sont doux, avec des températures minimales comprises entre 1 et 5°C. Les précipitations annuelles sont réparties sur 120 à 160 jours et sont plus abondantes en automne et en hiver, tombant souvent sous forme de bruine. Le nord-Cotentin recueille en moyenne près de 1100 mm de précipitation par année. Situé sur la trajectoire des perturbations, le vent y est presque toujours présent. On relève en moyenne 130 jours de vent fort à La Hague, majoritairement de secteur ouest-sud-ouest. Ce sont les vents de sud-ouest à nord-ouest, dominants, qui dispersent les effluents gazeux vers les terres, sur les secteurs est à nord-est. La zone la moins influencées est dans le secteur sud-est.

Les CNPE de Paluel et de Penly sont situés en Haute-Normandie, respectivement dans le Pays de Caux et du Petit-Caux, le long de la côte d'Albâtre. Le climat est de type océanique tempéré, marqué par la douceur des températures et une humidité importante. Les températures moyennes littorales sont de 5°C en janvier et de 17°C en juillet. Les précipitations sont abondantes : de l'ordre de 1000 mm en moyenne par an. Les vents dominants sont de secteur ouest à sud-ouest, portant les effluents gazeux en majorité vers la mer, et de secteur nord-est. La zone terrestre sous influence majeure des effluents gazeux du CNPE se trouve à l'est, la zone la moins influencée est dans le secteur sud à sud-est.

Le CNPE de Gravelines est implanté en bord de Mer du Nord, à l'ouest de l'avant-port ouest de Dunkerque. La région se situe au carrefour d'influences météorologiques contrastées. Les vents dominants sont de secteur ouest à sud-ouest, souvent conditionnés par les dépressions circulant sur l'Atlantique nord, et de secteur nord-est associé le plus souvent à des conditions anticycloniques. En flux de sud-ouest, le vent est fort, voire tempétueux, les pluies marquées et l'humidité importante. En flux de sud estival, les températures peuvent atteindre 30°C. En flux de nord à nord-est, la Mer du Nord draine l'air venu du pôle, avec des masses d'air turbulentes et agitées, de la grêle et de la neige. En flux d'est estival le temps est très beau. En revanche, le vent d'est en hiver est glacial, les températures moyennes pouvant descendre en dessous de 0°C. Les pluies sont relativement abondantes (600 à 700 mm). La zone terrestre sous influence majeure des effluents gazeux du CNPE se trouve dans le quart nord-est, la zone la moins influencée est dans le secteur sud.

Les quatre CNPE étant situés en bordure de la côte, les éventuelles retombées atmosphériques dues aux rejets d'effluents gazeux en milieu terrestre n'intéressent qu'un demi-secteur de la rose des vents centrée sur les cheminées.

3.2. Géologie et hydrogéologie

Les terrains de la région de Flamanville, dans le Nord-Cotentin, sont essentiellement d'origine primaire et reposent sur un socle antécambrien. Le Cap de Flamanville est composé de granites et de roches métamorphiques. Les terrains de couverture du socle étant de faible épaisseur, les captages d'alimentation en eau potable ont fréquemment recours aux eaux de surface (rivière ou petit barrage). On y trouve une zone de bocage propre à l'élevage bovin et des zones maraîchères reposant sur des sols sablonneux.

Les terrains de la région de Paluel et Penly, les Pays de Caux et du Petit Caux, appartiennent à l'ensemble géologique du Bassin Parisien, formé à l'ère secondaire. Le sous-sol est constitué d'une grande épaisseur de craie, pouvant mesurer jusqu'à 200 m de profondeur. Il est couvert d'une couche d'argile à silex et d'un limon fertile. Il est entaillé par des vallées et des vallons tapissés d'alluvions et de sédiments : les vallées humides, désignées ainsi car elles sont parcourues par un fleuve ou une rivière, possèdent un fond plat et large de quelques centaines

de mètres. Elles s'ouvrent sur la Manche, telles les vallées du Dun et de la Durdent. Des vallées sèches et des valleuses coupent également le plateau de craie, comme à Saint-Valéry-en-Caux. Elles n'ont pas d'écoulement en surface et sont peu peuplées, sauf à leur embouchure. Leurs versants sont boisés et la craie affleure du fait de l'érosion. Certaines valleuses sont « suspendues » à cause du lent recul de la falaise : elles ne permettent pas d'accéder directement à la plage. Le littoral est constitué de falaises de craie plus ou moins hautes, qui reculent plus ou moins rapidement en fonction de l'érosion marine. Les plages sont tapissées de galets, détachés de la falaise et polis par la mer. Ces galets ont néanmoins tendance à migrer et le sable peut affleurer à certains endroits. Le pays de Caux est une région agricole prospère grâce au climat océanique et aux sols limoneux. Les agriculteurs cauchois pratiquent la polyculture : le blé, le maïs, le lin, la pomme de terre, la luzerne, le colza sont les principales cultures. La betterave à sucre est la principale culture industrielle. L'élevage bovin pour la production de lait est également répandu.

Le CNPE de Gravelines est, quant à lui, implanté sur la plaine maritime de Flandre sur un remblai de sable gagné sur la mer. La frange littorale est formée de dunes et l'intérieur des terres est constitué de marais et polders. La poldérisation a conduit à la création d'un réseau de canaux (les watergangs) et d'écluses évacuant les eaux vers la mer. L'Aa est le principal cours d'eau qui draine les eaux du marais audomarois (Saint-Omer) vers la mer à Grand Fort Philippe. De grandes surfaces ont été remaniées par l'homme du fait des activités agricoles et industrielles. La zone située à l'est du CNPE est fortement industrialisée. Le sud-est, le sud et l'ouest sont occupés par diverses activités agricoles : céréales, productions industrielles (lin, chicorée, colza), élevage et maraîchage.

3.3. Hydrographie et hydrologie

La mer de la Manche est une importante zone de transit des eaux de l'Atlantique vers la mer du Nord. Elle est caractérisée par une circulation hydrodynamique complexe et une forte influence de la marée. L'amplitude de marée, ou marnage, est importante, atteignant plus de 10 m lors des grandes marées d'équinoxe et en moyenne 4 m lors des coefficients de mortes eaux. Les eaux de la Manche sont en perpétuel renouvellement à partir des masses d'eaux provenant de l'ouest. Les plus grosses houles viennent de l'ouest et du sud-ouest. La température de l'eau présente une variation annuelle sinusoïdale caractéristique des mers tempérées comprise entre 8 et 21°C. Les variations de salinité restent faibles, comprises entre 34 et 35,5 psu.

Un modèle hydrodynamique développé par l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) a permis d'étudier les trajectoires des courants résiduels en Manche en fonction de diverses conditions de marée et de météorologie (Figure 1 page 18 ; [1, 2]). Dans le golfe normand-breton, ce modèle identifie diverses masses d'eau et des structures de circulation cycloniques et anticycloniques complexes. Cette hydrodynamique complexe influence fortement la dispersion des effluents liquides faiblement radioactifs rejetés par le CNPE de Flamanville et l'usine ORANO La Hague. Plus à l'est de la Manche, et notamment à l'est de la Baie de Seine, en particulier devant les sites de Paluel, Penly et Gravelines, on observe des structures en bandes parallèles au trait de côte. Ceci a pour effet de confronter des eaux marines avec des eaux côtières alimentées par la Seine et quelques rivières de moindre importance. Côté français, ces eaux sont plaquées sur le continent le long duquel elles forment un fleuve côtier dans lequel sont rejetés les effluents liquides des CNPE de Paluel, Penly et Gravelines. En Manche, on distingue une voie centrale de transfert rapide des eaux depuis La Hague jusqu'au Pas de Calais (2 à 4 mois) et une voie côtière, plus lente (4 à 8 mois). Entre 1986 et 1998, le Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville de l'IRSN a réalisé de nombreuses campagnes océanographiques au cours desquelles des mesures d'activité en radionucléides conservatifs², rejetés par l'usine ORANO La Hague, en particulier l'¹²⁵Sb, ont été effectuées. Ces mesures ont permis de caler le modèle de circulation hydrodynamique développé par l'IFREMER. Si la dérive générale des masses d'eaux va de l'ouest vers l'est, le modèle montre que, sous certaines conditions météorologiques, caractérisées par un vent de secteur est à nord-est persistant, la dérive des eaux côtières peut s'inverser et s'orienter temporairement vers l'ouest.

² Un radionucléide est considéré comme un traceur conservatif dès lors qu'il ne subit aucune transformation biogéochimique au sein des masses d'eau, et donc que l'évolution de sa distribution est seulement régulée par son transport dans l'eau de mer.

Par son statut de bras de mer entre l'océan Atlantique et la mer du Nord, la Manche constitue la principale voie maritime entre l'océan Atlantique et l'Europe du Nord. Bien qu'exploitée par un nombre restreint et décroissant de navires, essentiellement voués à la petite pêche (marées inférieures à 24 heures) et à la pêche côtière (marées de 24 à 96 heures), la Manche orientale produit plus de 80 % des pêches déclarées par les pays exploitant les ressources maritimes de ce secteur, non sans impact écologique et halieutique. Parmi les principales espèces cibles de poissons pêchées, on retrouve les poissons plats (sole, plie), le merlan, le rouget barbet, la dorade grise et le bar. Les ressources en crustacés³ (tourteau, homard, étrille et araignée de mer) et en mollusques (coquille Saint-Jacques et bulot) y sont également exploitées. Les activités conchylicoles (huîtres, moules) sont par ailleurs bien implantées, en particulier sur la côte ouest de la presqu'île du Cotentin.

³ Indifféremment appelés « crustacés » ou « arthropodes » dans la suite de ce rapport.

5. ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE PALUEL

5.1. Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures

Le CNPE de Paluel est situé dans le Pays de Caux, sur le littoral de la Manche, à 6 km au sud-ouest de Saint-Valéry-en-Caux et à 21 km au nord-est de Fécamp (Figure 15 page 78). Au regard de la circulation résiduelle générale des masses d'eau en Manche, dont la résultante est orientée vers l'est, le CNPE de Paluel est situé « en aval » du CNPE de Flamanville (185 km à vol d'oiseau) et de l'usine de traitement de combustible usé ORANO La Hague (185 km), et "en amont" des CNPE de Penly (43 km) et de Gravelines (167 km ; Figure 1 page 18). Le CNPE de Paluel se compose de quatre réacteurs de la filière des réacteurs à eau pressurisée (REP) d'une puissance unitaire de 1300 MWe, couplés au réseau en juin 1984 (INB n°103), septembre 1984 (INB n°104), septembre 1985 (INB n°113) et avril 1986 (INB n°114).

La chronologie des études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Paluel est présentée sur la Figure 14 page 74. Les références bibliographiques sont présentées en pages 205 et suivantes.



Figure 14 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Paluel.

5.2. État radiologique de l'environnement terrestre

5.2.1. Stratégie d'échantillonnage

La localisation des stations de prélèvements ainsi que la nature des échantillons collectés sont reportées sur la Figure 15 page 78. Les dates de prélèvement, stations, natures et caractéristiques identifiant chaque échantillon sont répertoriées dans le Tableau 29 page 76. L'analyse granulométrique et la teneur en matière organique des sols de pâturage échantillonnés sont présentées dans le Tableau 42 page 106.

Pour l'essentiel, la stratégie de prélèvement et d'analyse est commune à l'ensemble des sites (Annexes). Le choix des stations et de la nature des prélèvements permet la comparaison des résultats avec ceux des études antérieures. Les sols échantillonnés sont des sols non cultivés sur lesquels les cultures, pluriannuelles, ne demandent aucun remaniement (pâturages). Ce type de sol est privilégié dans l'objectif de mesurer l'accumulation des dépôts atmosphériques. Les échantillons sont, en dehors des indicateurs végétaux (mousses terricoles), des vecteurs directs ou indirects de radioactivité vers l'homme. Ils sont caractéristiques des principales activités agricoles de la région, à savoir l'élevage laitier et le maraîchage. Les végétaux cultivés (salade et herbe) sont communs sur l'ensemble du territoire français. Leur cycle végétatif annuel et leur grande surface d'interception en font d'assez bons indicateurs de marquage. De l'eau de boisson et du lait de vache sont collectés sur une commune à proximité du site. Dans la stratégie générale, une mousse terricole, une production agricole, un sol de prairie, de l'herbe, un lait et une eau de boisson sont prélevés sous les vents dominants.

Les stations de prélèvements ont été définies en fonction du régime éolien local, généralement dominé par les vents de secteur ouest-sud-ouest à sud-sud-ouest, qui dispersent principalement les effluents atmosphériques vers la mer. La zone terrestre potentiellement la plus influencée par les rejets d'effluents atmosphériques du CNPE (ZI) se trouve dans le secteur est ou en champ proche (Paluel, Ingouville, Saint-Valéry-en-Caux). La zone hors vents dominants (ZNI) est située dans le secteur sud à sud-est. Depuis 2018, au vu du retour d'expérience, de la rose des vents moyenne sur la décennie précédente et de sa distance au CNPE, la station de Gueutteville-les-Grès, située en secteur est et auparavant considérée comme en ZI, est recatégorisée en ZNI.

En 2022, l'IRSN n'a rencontré aucune difficulté de prélèvement dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel.

En outre, l'herbe fait l'objet de quatre mesures de ^{14}C (une par trimestre) dont les résultats seront présentés dans le rapport simplifié exigé au titre de la réglementation 2022.

Tableau 29 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique de 2022 et analyses réalisées.

Situation par rapport au CNPE	Chronique	Commune	Longitude WGS 84	Latitude WGS 84	Nature	Espèce	Fraction	Date de prélèvement	Type de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendres
9,66 km E	Paluel - Zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	00,76818	49,84410	Aliments liq. Non transformés	Lait de vache	Entier	02/08/2022	Gamma (Cendre)	7,66	17,17
9,66 km E	Paluel - Zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	00,76818	49,84410	Aliments liq. Non transformés	Lait de vache	Entier	02/08/2022	C-14 par SL (Benzène) (Sec)	7,44	-
9,66 km E	Paluel - Zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	00,76818	49,84410	Aliments liq. Non transformés	Lait de vache	Entier	02/08/2022	C élémentaire (Sec)	7,44	-
9,66 km E	Paluel - Zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	00,76818	49,84410	Aliments liq. Non transformés	Lait de vache	Entier	02/08/2022	Rapport relatif C13/C12 (Sec)	7,44	-
9,66 km E	Paluel - Zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	00,76818	49,84410	Aliments liq. Non transformés	Lait de vache	Entier	02/08/2022	H-3 lié (Sec)	7,44	-
9,66 km E	Paluel - Zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	00,76818	49,84410	Aliments liq. Non transformés	Lait de vache	Entier	02/08/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	7,44	-
9,66 km E	Paluel - Zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	00,76818	49,84410	Aliments liq. Non transformés	Lait de vache	Entier	02/08/2022	H-3 libre (Liquide)	7,44	-
0,92 km ENE	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Paluel	00,64606	49,86183	Sols non cultivés	Sol de pâturage ou de prairie	≤ 2 mm Strate 0-5 cm	04/04/2022	Gamma (Sec)	1,31	-
0,92 km ENE	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Paluel	00,64606	49,86183	Sols non cultivés	Sol de pâturage ou de prairie	≤ 2 mm Strate 0-5 cm	04/04/2022	Granulométrie (Sec)	1,31	-
0,92 km ENE	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Paluel	00,64606	49,86183	Sols non cultivés	Sol de pâturage ou de prairie	≤ 2 mm Strate 0-5 cm	04/04/2022	MO après combustion (Sec)	1,31	-
0,92 km ENE	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Paluel	00,64606	49,86183	Herbes	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	04/04/2022	Gamma (Cendre)	6,79	7,12
0,92 km ENE	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Paluel	00,64606	49,86183	Herbes	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	04/04/2022	H-3 lié (Sec)	6,22	-
0,92 km ENE	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Paluel	00,64606	49,86183	Herbes	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	04/04/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	6,22	-
0,92 km ENE	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Paluel	00,64606	49,86183	Herbes	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	04/04/2022	H-3 libre (Liquide)	6,22	-
1,64 km E	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	00,65737	49,86066	Légumes	Salade	Parties aériennes	02/08/2022	Gamma (Cendre)	8,39	5,23
1,64 km E	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	00,65737	49,86066	Légumes	Salade	Parties aériennes	02/08/2022	C-14 par SL (Benzène) (Sec)	8,08	-
1,64 km E	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	00,65737	49,86066	Légumes	Salade	Parties aériennes	02/08/2022	C élémentaire (Sec)	8,08	-
1,64 km E	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	00,65737	49,86066	Légumes	Salade	Parties aériennes	02/08/2022	Rapport relatif C13/C12 (Sec)	8,08	-
1,64 km E	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	00,65737	49,86066	Légumes	Salade	Parties aériennes	02/08/2022	H-3 lié (Sec)	8,08	-
1,64 km E	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	00,65737	49,86066	Légumes	Salade	Parties aériennes	02/08/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	8,08	-
1,64 km E	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	00,65737	49,86066	Légumes	Salade	Parties aériennes	02/08/2022	H-3 libre (Liquide)	8,08	-
5,08 km E	Paluel - Zone sous les vents (<5 km)	Saint-Valery-en-Caux	00,70582	49,85607	Mousses terricoles	Polytric Polytrichum species	Entier	04/04/2022	Gamma (Frais)	1,16	-
9,66 km E	Paluel - Eau phréatique hors aval hydraulique	Gueutteville-les-Grès	00,76818	49,84410	Eaux boisson	Eau de boisson	Filtrée 0,2µm	01/08/2022	H-3 libre (Liquide)	-	-

- : absence de traitement. Distance au site calculée en ligne droite entre les coordonnées d'un point de référence du site et celles du point de prélèvement

Dans les tableaux des pages suivantes, pour le milieu terrestre :

	Prélèvements hors vents dominants de l'installation (> 5km)
	Prélèvements sous les vents dominants de l'installation (< 5km)
	Prélèvement d'eau phréatique hors aval hydraulique



Figure 15 - Localisation du CNPE de Paluel et des stations terrestres⁷ échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.

⁷ Vert clair : stations hors vents dominants (ZNI). Vert foncé : stations sous les vents dominants (ZI). Les anciens noms des stations (jusqu'en 2018) sont indiqués en italique lorsqu'ils diffèrent de la nomenclature actuelle.

5.2.2. Résultats et interprétation

5.2.2.1. Radionucléides émetteurs gamma

Radionucléides émetteurs gamma d'origine naturelle

Les résultats d'analyse par spectrométrie γ des activités en radionucléides d'origine naturelle dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel sont présentés dans le Tableau 43 page 107.

En 2022, la radioactivité d'origine naturelle quantifiée dans les matrices terrestres environnant le CNPE de Paluel est du même ordre de grandeur que celle mesurée lors de l'état de référence et depuis le début des suivis radioécologiques annuels. Les activités détectées sont en accord avec les valeurs habituelles pour ces matrices [3]. Elles ont pour principale origine le ^{40}K et, dans une moindre mesure, les familles du ^{232}Th et de ^{238}U . Dans le sol, l'activité massique en ^{40}K , en fils du ^{232}Th et du ^{238}U est en accord avec les valeurs observées en France métropolitaine [23, 24, 28]. La seconde composante cosmogénique est due au ^7Be , présent principalement dans les végétaux dont la surface foliaire est propice à la captation des retombées atmosphériques. Dans le lait de vache, le ^{40}K est toujours proche de 50 Bq.L^{-1} , quels que soient l'année ou le lieu du prélèvement, car la teneur en potassium du lait est physiologiquement régulée chez l'animal.

Ces résultats de mesure attestent de l'absence de biais dans les étapes de préparation et de mesure des échantillons.

Radionucléides émetteurs gamma d'origine artificielle

Les résultats d'analyse par spectrométrie γ des activités en radionucléides d'origine artificielle dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel sont présentés dans le Tableau 44 page 108.

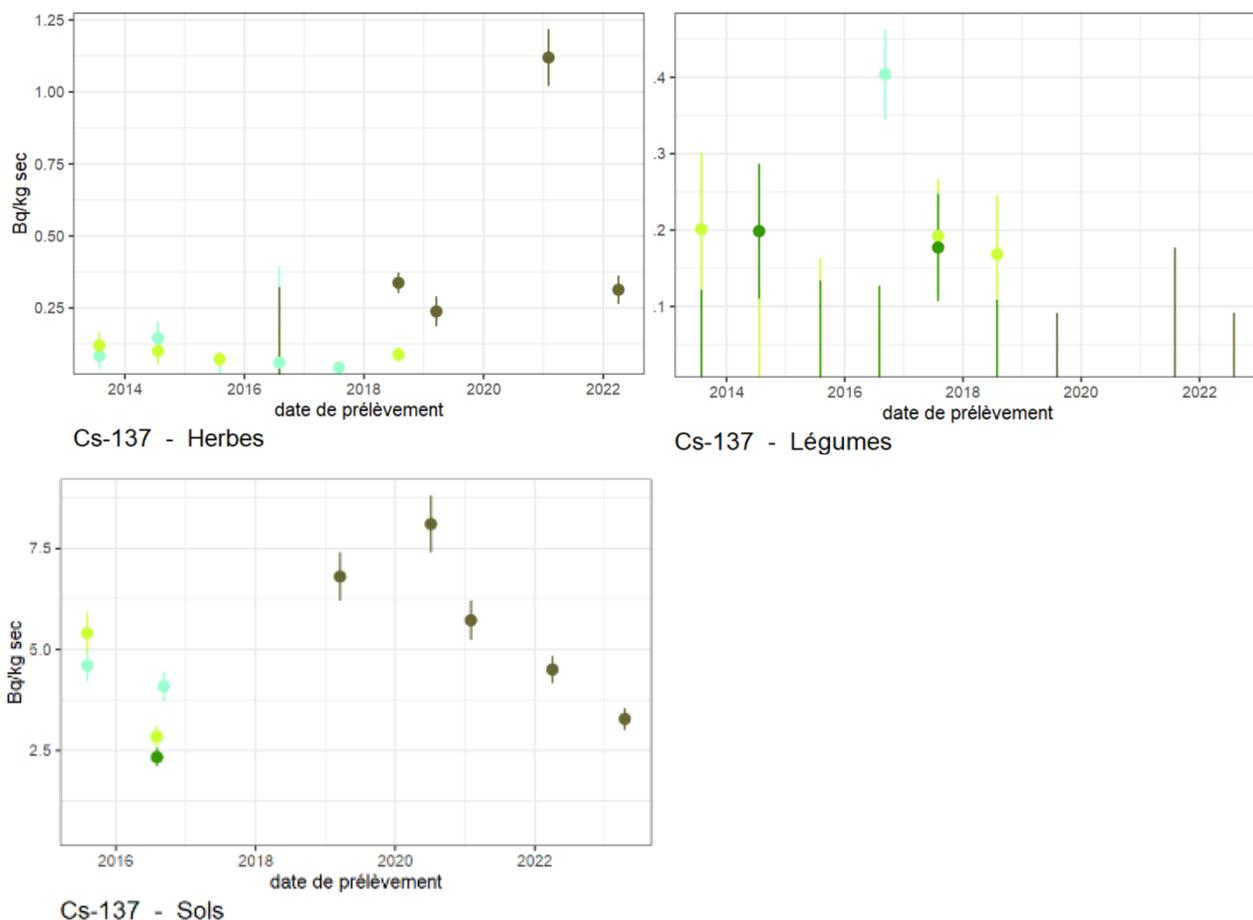
Dans le sol échantillonné dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel, le seul radionucléide d'origine artificielle quantifié est le ^{137}Cs . Ce radionucléide est également quantifié dans l'herbe, les mousses terrestres et le lait, mais il ne l'est pas dans les salades. Les analyses d' ^{131}I réalisées sur l'échantillon frais de mousses ne révèlent pas la présence de cet élément à des niveaux d'activité supérieurs au seuil de décision. Les activités en ^{137}Cs détectées dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel en 2022 sont en accord avec les niveaux observés au cours des dix dernières années (Tableau 31 à Tableau 35 page 91 et suivantes ; et Figure 16 page 80) et aux niveaux de bruit de fond attendu en milieu continental [3]. L'évolution temporelle des niveaux d'activité du ^{137}Cs dans l'environnement terrestre du CNPE témoigne de niveaux relativement stables de cet élément au cours des dix dernières années. L'activité γ détectée dans le cadre de cette étude ne met pas en évidence de marquage de l'environnement par les rejets d'effluents atmosphériques du CNPE.

5.2.2.2. Radionucléides émetteurs bêta

Tritium

Les résultats d'analyse des activités en tritium libre et en tritium organiquement lié dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 45 et du Tableau 46 page 109, respectivement.

L'activité en tritium libre dans l'eau de boisson est inférieure au seuil de décision. Les activités en tritium dans la salade (HTO) et le lait (HTO et TOL) sont proches du bruit de fond attendu en milieu terrestre hors influence d'un apport industriel local ($0,5$ à 2 Bq.L^{-1} pour l'HTO et $0,34$ à $1,7 \text{ Bq.L}^{-1}$ pour le TOL d'après [3]). Les activités en tritium libre et en tritium organiquement lié dans l'herbe ($8,2 \pm 1,2 \text{ Bq.L}^{-1}$ ED et $5,8 \pm 1,0 \text{ Bq.L}^{-1}$ EC, respectivement) ainsi que dans la salade (tritium organiquement lié, $2,7 \pm 0,8 \text{ Bq.L}^{-1}$ ED) sont en revanche supérieures à ce bruit de fond. Ces activités témoignent d'un apport local en champ proche du CNPE de Paluel pour l'herbe et la salade.



Légende pour les figures en milieu terrestre :

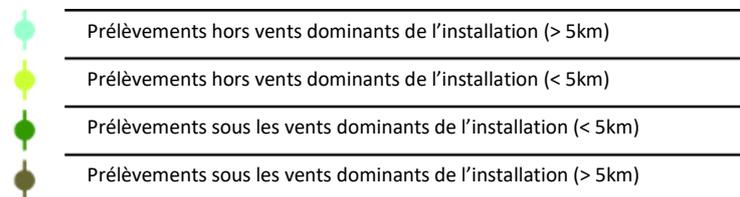


Figure 16 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des sols (cultivés et non cultivés), des végétaux cultivés (légumes) et herbes échantillonnés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel.

Carbone 14

Les résultats d'analyse des activités en ^{14}C dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 47 page 110.

L'activité en ^{14}C dans les salades échantillonnées ($238 \pm 12 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ C}$) n'est pas significativement supérieure au bruit de fond sur le territoire métropolitain français hors influence industrielle locale ($222 \pm 7 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ C}$ d'après [3]), et ne témoigne pas d'un apport local dans l'environnement du CNPE de Paluel par les rejets à l'atmosphère du CNPE. Dans le lait de vache, l'activité en ^{14}C ($228 \pm 11 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ C}$) n'est pas non plus significativement différente du bruit de fond. Les activités mesurées dans l'herbe ($226\text{-}233 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ de C}$) dans le cadre de la surveillance trimestrielle de l'année 2022 ne montrent pas non plus de marquage.

5.3. État radiologique de l'environnement aquatique

5.3.1. Stratégie d'échantillonnage

La localisation des stations de prélèvements ainsi que la nature des échantillons collectés sont reportées sur la Figure 17 page 85. Les dates de prélèvement, stations, natures et caractéristiques identifiant chaque échantillon sont répertoriées dans le Tableau 30 pages 82 et suivantes. L'analyse granulométrique et la teneur en matière organique des sédiments échantillonnés sont présentées dans le Tableau 48 page 111. Le choix des stations et de la nature des prélèvements permet la comparaison des résultats avec ceux des études antérieures. Les matrices biologiques échantillonnées sont les plus abondantes localement et/ou caractéristiques de l'économie locale. Elles correspondent également, pour la plupart, aux espèces prélevées lors de l'état de référence et au cours de la dernière décennie. Au niveau des stations côtières, accessibles à marée basse, les prélèvements de sédiments et d'algues ont été effectués à la main, tandis que les prélèvements de poissons, de crustacés et de mollusques (bulots) ont été confiés à un pêcheur professionnel. Dans la mesure du possible, des sédiments fins, ayant une surface spécifique importante plus propice au piégeage des radionucléides, ont été privilégiés (port de Saint-Valéry-en-Caux). De même, des sédiments de granulométrie proche ont été recherchés afin de mieux comparer les résultats des différents points de prélèvement. Cependant, le fort régime hydrodynamique le long de la côte d'Albâtre ne permet pas la sédimentation des particules les plus fines (limons et argiles) autour du CNPE de Paluel hormis dans les ports (cas de Saint-Valéry-en-Caux). Ainsi, aux stations de Sassetot-le-Mauconduit et de Veulettes-sur-Mer, seuls des sédiments relativement grossiers ont pu être récoltés.

Les stations de prélèvements ont été définies en fonction de l'hydrodynamisme local, dominé par des courants parallèles au trait de côte le long de la côte d'Albâtre et globalement orientés d'ouest en est. La zone marine potentiellement la plus influencée est située en champ proche (CP), un terme qui désigne des stations situées à proximité du ou des points de rejets d'effluents liquides du CNPE, et/ou dans la zone d'excursion du panache des rejets d'effluents liquides du CNPE, et qui sont donc potentiellement influencées par ces rejets. A Paluel, le champ proche désigne les stations situées à quelques kilomètres à l'ouest et à l'est du CNPE, de Veulettes-sur-Mer à Saint-Valéry-en-Caux. Les stations de référence sont situées en champ lointain (CL), un terme qui désigne des stations situées suffisamment à distance du ou des points de rejets d'effluents liquides du CNPE pour être considérées comme n'étant que peu influencées par ces rejets. Cette distance s'apprécie en fonction des conditions hydrodynamiques locales moyennes. A Paluel, le champ lointain désigne les stations situées au-delà d'une dizaine de kilomètres en « amont » du CNPE au regard de la circulation résiduelle générale des masses d'eau en Manche [1, 2], de Saint-Pierre-en-Port à Sassetot-le-Mauconduit.

En 2022, concernant les prélèvements et analyses réglementaires, comme auparavant, les analyses sur les crustacés ont été réalisées sur l'animal entier pour ce qui est de la spectrométrie gamma, et sur la chair du corps et des pinces qui a été décortiquée pour la recherche du tritium organiquement lié. De plus, comme depuis 2018, pour des raisons de sécurité, les prélèvements de sédiment, d'algues et de mollusques (patelles) habituellement effectués à Saint-Pierre-en-Port en champ lointain, ont été remplacés par des prélèvements effectués à Sassetot-le-Mauconduit (algues et sédiment) et au large de Saint-Pierre-en-Port (mollusques : patelles remplacées par des bulots). L'IRSN n'a rencontré aucune autre difficulté de prélèvement dans l'environnement marin du CNPE de Paluel.

Tableau 30 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel en 2022 et analyses réalisées.

Situation par rapport au CNPE	Chronique	Commune	Longitude WGS 84	Latitude WGS 84	Nature	Espèce	Fraction	Date de prélèvement	Type de mesure	Frais/ Sec	Sec/ Cendres
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Gamma (Cendre)	5,34	3,47
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Gamma (Frais)	5,30	-
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	C-14 par MS (spectrométrie de masse) (Sec)	5,30	-
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	C élémentaire (Sec)	5,30	-
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Rapport relatif C13/C12 (Sec)	5,30	-
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	H-3 lié (Sec)	5,30	-
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	5,30	-
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	H-3 libre (Liquide)	5,30	-
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Fe-55 par SL (Cendre)	5,34	3,47
8,69 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Ni-63 par Sc. Liq. (Cendre)	5,34	3,47
8,7 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	Gamma (Sec)	1,32	-
8,7 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	Granulométrie (Sec)	1,32	-
8,7 km	Paluel - Champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	00,52414	49,82613	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	MO après combustion (Sec)	1,32	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Crustacés	Araignée de mer <i>Maja brachydactyla</i>	Entier	12/03/2022	Gamma (Cendre)	2,25	1,73
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Crustacés	Araignée de mer <i>Maja brachydactyla</i>	Chair	12/03/2022	H-3 lié (Sec)	3,71	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Crustacés	Araignée de mer <i>Maja brachydactyla</i>	Chair	12/03/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	3,71	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	01/07/2022	Gamma (Cendre)	3,94	9,79
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	01/07/2022	C-14 par MS (spectrométrie de masse) (Sec)	3,62	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	01/07/2022	C élémentaire (Sec)	3,62	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	01/07/2022	Rapport relatif C13/C12 (Sec)	3,62	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	01/07/2022	H-3 lié (Sec)	3,62	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	01/07/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	3,62	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	01/07/2022	Fe-55 par SL (Cendre)	3,94	9,79
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	01/07/2022	Ni-63 par Sc. Liq. (Cendre)	3,94	9,79
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	27/03/2022	Gamma (Cendre)	4,57	16,04
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	27/03/2022	C-14 par SL (Benzène) (Sec)	4,37	-

Situation par rapport au CNPE	Chronique	Commune	Longitude WGS 84	Latitude WGS 84	Nature	Espèce	Fraction	Date de prélèvement	Type de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendres
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	27/03/2022	C élémentaire (Sec)	4,37	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	27/03/2022	Rapport relatif C13/C12 (Sec)	4,37	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	27/03/2022	H-3 lié (Sec)	4,37	-
12,33 km	Paluel - Champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	00,47330	49,82000	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	27/03/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	4,37	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Crustacés	Araignée de mer <i>Maja brachydactyla</i>	Entier	13/03/2022	Gamma (Cendre)	2,35	1,83
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Crustacés	Araignée de mer <i>Maja brachydactyla</i>	Chair	13/03/2022	H-3 lié (Sec)	3,83	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Crustacés	Araignée de mer <i>Maja brachydactyla</i>	Chair	13/03/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	3,83	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	05/07/2022	Gamma (Cendre)	3,83	10,09
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	05/07/2022	C-14 par MS (spectrométrie de masse) (Sec)	3,76	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	05/07/2022	C élémentaire (Sec)	3,76	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	05/07/2022	Rapport relatif C13/C12 (Sec)	3,76	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	05/07/2022	H-3 lié (Sec)	3,76	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Mollusques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	05/07/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	3,76	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	26/03/2022	Gamma (Cendre)	4,56	16,11
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	26/03/2022	C-14 par SL (Benzène) (Sec)	4,28	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	26/03/2022	C élémentaire (Sec)	4,28	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	26/03/2022	Rapport relatif C13/C12 (Sec)	4,28	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	26/03/2022	H-3 lié (Sec)	4,28	-
1,14 km	Paluel - Champ proche	Paluel au large	00,63110	49,86750	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	26/03/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	4,28	-
1,44 km	Paluel - Champ proche	Paluel	00,61527	49,85988	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Gamma (Cendre)	5,23	3,81
2,2 km	Paluel - Champ proche	Veulettes-sur-Mer	00,60454	49,85582	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	Gamma (Sec)	1,33	-
2,2 km	Paluel - Champ proche	Veulettes-sur-Mer	00,60454	49,85582	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	Granulométrie (Sec)	1,33	-
2,2 km	Paluel - Champ proche	Veulettes-sur-Mer	00,60454	49,85582	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	MO après combustion (Sec)	1,33	-
5,74 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71256	49,87052	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	Gamma (Sec)	2,03	-
5,74 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71256	49,87052	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	Granulométrie (Sec)	2,03	-
5,74 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71256	49,87052	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	05/04/2022	MO après combustion (Sec)	2,03	-
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Gamma (Cendre)	5,59	3,65
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	05/04/2022	Gamma (Frais)	5,68	-

Situation par rapport au CNPE	Chronique	Commune	Longitude WGS 84	Latitude WGS 84	Nature	Espèce	Fraction	Date de prélèvement	Type de mesure	Frais/ Sec	Sec/ Cendres
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus Fucus serratus	Entier	05/04/2022	C-14 par MS (spectrométrie de masse) (Sec)	5,68	-
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus Fucus serratus	Entier	05/04/2022	C élémentaire (Sec)	5,68	-
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus Fucus serratus	Entier	05/04/2022	Rapport relatif C13/C12 (Sec)	5,68	-
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus Fucus serratus	Entier	05/04/2022	H-3 lié (Sec)	5,68	-
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus Fucus serratus	Entier	05/04/2022	Pourcentage massique de l'hydrogène (Sec)	5,68	-
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus Fucus serratus	Entier	05/04/2022	H-3 libre (Liquide)	5,68	-
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus Fucus serratus	Entier	05/04/2022	Fe-55 par SL (Cendre)	5,59	3,65
6,22 km	Paluel - Champ proche	Saint-Valéry-en-Caux	00,71967	49,86999	Algues brunes	Fucus Fucus serratus	Entier	05/04/2022	Ni-63 par Sc. Liq. (Cendre)	5,59	3,65

- : absence de traitement. Distance au site calculée en ligne droite entre les coordonnées d'un point de référence du site et celles du point de prélèvement

Dans les tableaux des pages suivantes, pour le milieu marin :

Prélèvements en champ lointain et hors influence potentielle du dispositif de rejet des effluents liquides du CNPE
Prélèvements en champ proche et sous influence potentielle du dispositif de rejet des effluents liquides du CNPE

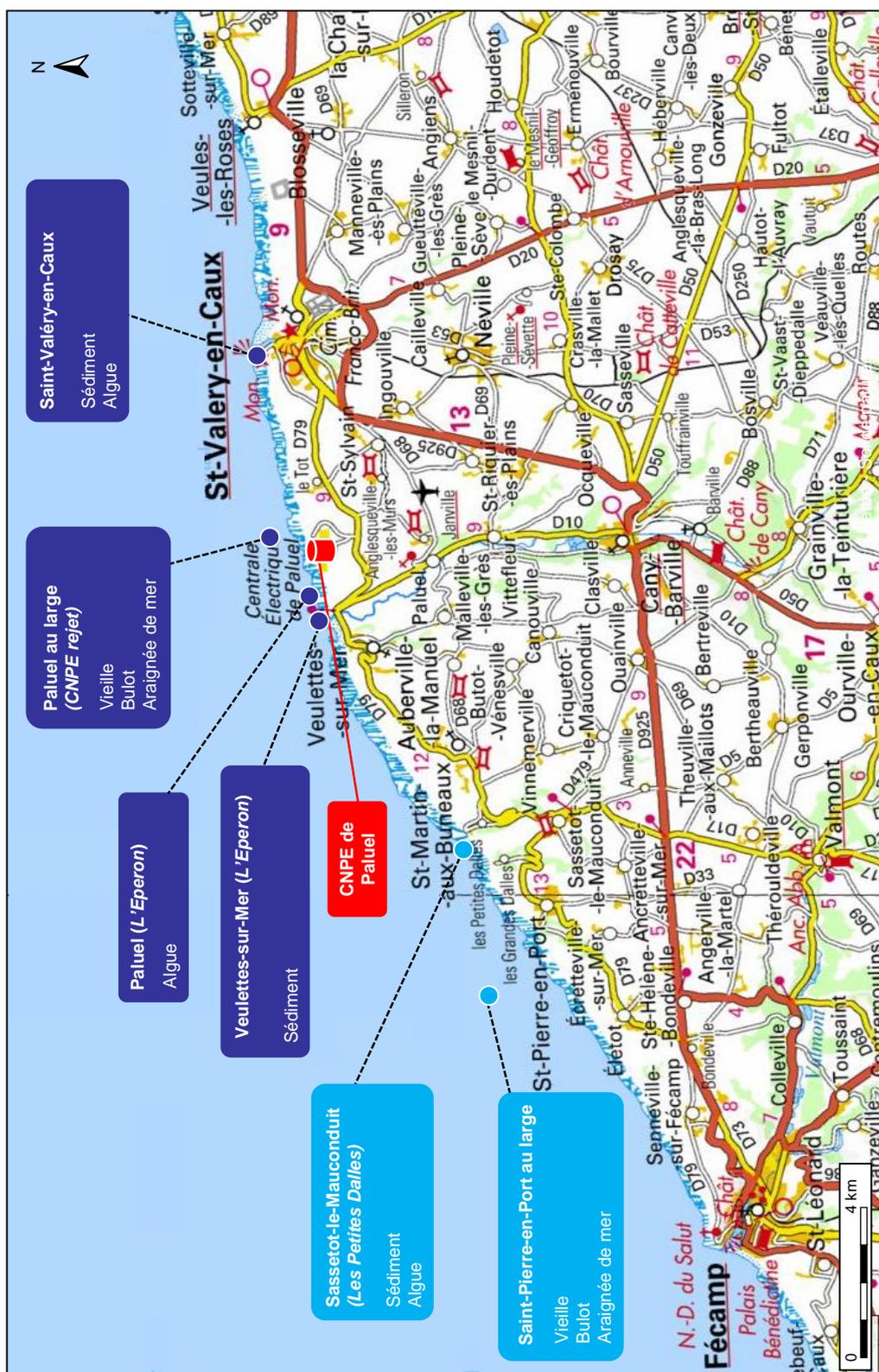


Figure 17 - Localisation du CNPE de Paluel et des stations marines⁸ échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2022.

⁸ Bleu foncé : stations en champ proche (sous influence potentielle des rejets d'effluents liquides du CNPE ; CP). Bleu clair : station en champ lointain et hors influence potentielle des rejets d'effluents liquides du CNPE (CL). Les anciens noms des stations (jusqu'en 2018) sont indiqués en italique lorsqu'ils diffèrent de la nomenclature actuelle.

5.3.2. Résultats et interprétation

5.3.2.1. Radionucléides émetteurs gamma

Radionucléides émetteurs gamma d'origine naturelle

Les résultats d'analyse par spectrométrie γ des activités en radionucléides d'origine naturelle dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 49 page 112.

En 2022, la radioactivité d'origine naturelle détectée dans les matrices marines environnant le CNPE de Paluel est qualitativement et quantitativement du même ordre de grandeur que celle mesurée lors de l'état de référence et depuis le début des suivis radioécologiques annuels. Les activités détectées sont en accord avec les valeurs habituelles pour ces matrices [3]. Le ^{40}K est le radionucléide prépondérant en termes d'activité. Les activités en ^{40}K dans les poissons sont en accord avec les valeurs attendues pour ces animaux dont la teneur en potassium est physiologiquement régulée (activité massique toujours proche de 100 Bq.kg^{-1} frais). Le ^7Be est détecté dans les matrices régulièrement émergées lors du cycle de marée, c'est le cas notamment des algues, présentant des niveaux d'activité élevés du fait de leur capacité à capter les aérosols, ainsi que des sédiments fins du port de Saint-Valéry-en-Caux. Le ^7Be est également détecté à un niveau proche du seuil de décision dans les crustacés prélevés en champ lointain.

L'ensemble des résultats obtenus permet d'assurer que les échantillons n'ont pas subi de biais au cours des étapes de préparation et d'analyse par spectrométrie gamma.

Radionucléides émetteurs gamma d'origine artificielle

Les résultats d'analyse par spectrométrie γ des activités en radionucléides d'origine artificielle dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 50 page 113.

La radioactivité d'origine artificielle au sein des sédiments et des organismes marins végétaux et animaux est essentiellement imputable au ^{137}Cs , et dans une moindre mesure, au ^{60}Co , au ^{241}Am et à l' $^{108\text{m}}\text{Ag}$. Le ^{137}Cs , qui trouve son origine à la fois dans les retombées des essais aériens et de l'accident de Tchernobyl, ainsi que dans les rejets d'effluents liquides de l'usine de retraitement ORANO de la Hague et dans ceux des CNPE, est le plus fréquemment quantifié. Il l'est à des niveaux comparables en champ proche et en champ lointain pour les algues, les crustacés, les mollusques et les poissons. Pour les sédiments, ceux mesurés en champ proche à Saint-Valéry-en-Caux présentent un niveau d'activité en ^{137}Cs plus élevé que les deux autres sédiments (prélevés à Veulettes-sur-Mer en champ proche et à Sassetot-le-Mauconduit en champ lointain), qui s'explique par une granulométrie plus fine à Saint-Valéry-en-Caux qu'aux deux autres sites. Comme il le fut régulièrement au cours de la dernière décennie, l' $^{108\text{m}}\text{Ag}$ est détecté dans les bulots en champ proche et lointain du CNPE de Paluel en 2022, à un niveau comparable entre les deux et proche du seuil de décision. L'origine de ce radionucléide est incertaine. Le ^{60}Co , provenant à la fois des rejets d'effluents liquides de l'usine de retraitement ORANO de la Hague et de ceux des CNPE, est quant à lui détecté en champ proche du CNPE (sédiments et algues) mais toujours à des activités proches des seuils des décisions pour les algues. Les teneurs dans le sédiment sont un peu plus élevées du fait de la finesse du sédiment de Saint-Valéry-en-Caux, apte à retenir certains radionucléides dont le ^{60}Co . Le ^{241}Am , provenant des rejets d'effluents liquides de l'usine de retraitement ORANO de la Hague, est détecté dans les sédiments fins du Port de Saint-Valéry-en-Caux, en champ proche du CNPE de Paluel. L' ^{131}I , présent dans les rejets d'effluents liquides de l'usine de retraitement ORANO de la Hague et dans ceux des CNPE, et recherché dans les algues, ne présente pas d'activité supérieure au seuil de décision.

Les résultats de mesure par spectrométrie gamma obtenus en 2022 confirment ceux des années précédentes quant à la stabilité des niveaux d'activités en radionucléides artificiels mesurés dans les matrices environnementales marines proches du CNPE de Paluel (Tableau 37 à Tableau 41, pages 97 et suivantes ; et Figure 18 page 88). Par ailleurs, le contexte régional (dispersion des rejets d'effluents liquides de l'usine ORANO La Hague en « amont » du CNPE de Paluel) et hydrologique local rend difficile une discrimination du marquage spécifique par les rejets du CNPE de Paluel sur l'environnement marin.

5.3.2.2. Radionucléides émetteurs bêta

Tritium

Les résultats d'analyse des activités en tritium libre et en tritium organiquement lié dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 51 et du Tableau 52 page 114, respectivement.

Les activités en tritium libre dans les algues correspondent aux valeurs attendues du fait des niveaux d'activités mesurables dans l'eau de mer en Manche (de l'ordre de 5 Bq.L⁻¹, et comprises entre 3,7 et 5,9 Bq.L⁻¹ à distance de l'usine ORANO [3, 25, 26]) et majoritairement imputables à la dispersion des rejets d'effluents liquides de l'usine ORANO La Hague. Les activités en tritium libre mesurées dans les algues ne sont pas significativement différentes en champ proche et en champ lointain. Les activités en tritium organiquement lié dans les échantillons prélevés, toutes matrices confondues, sont également comparables en champ proche et en champ lointain. Néanmoins, les activités en tritium libre et en tritium organiquement lié mesurées dans les algues en champ proche sont supérieures aux niveaux d'activités mesurables dans l'eau de mer en Manche (de l'ordre de 5 Bq.L⁻¹, et comprises entre 3,7 et 5,9 Bq.L⁻¹ à distance de l'usine ORANO [3, 25, 26]). Cette observation cohérente avec les valeurs observées au cours de la dernière décennie, témoigne d'un marquage par le tritium de l'environnement proche de l'émissaire du CNPE pour les algues en 2022.

Carbone 14

Les résultats d'analyse des activités en ¹⁴C dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 53 page 115.

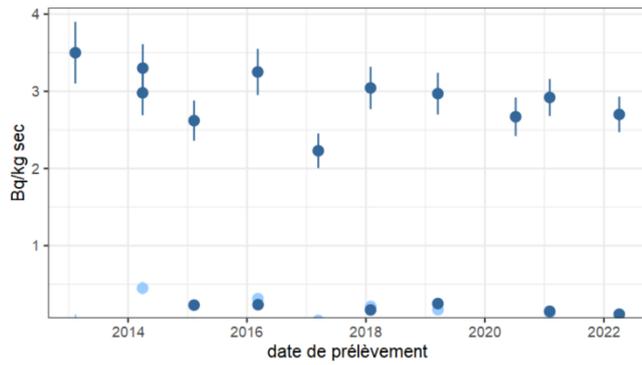
Les activités en ¹⁴C quantifiées au sein des algues, mollusques et poissons collectés en champ proche et/ou en champ lointain des rejets d'effluents liquides du CNPE de Paluel sont supérieures au bruit de fond en ¹⁴C observé hors influence dans les matrices biologiques collectées en entrée de Manche (233±5 Bq.kg⁻¹ C en 2022 d'après nos mesures et d'après [3]). Dans les algues, les activités sont supérieures en champ lointain par rapport au champ proche. Dans les poissons et les mollusques, les activités sont comparables en champ proche et en champ lointain. Ces activités sont cohérentes avec les valeurs moyennes enregistrées par le passé du fait du marquage global par les INB de la Manche [3], et notamment de la proximité de l'usine ORANO La Hague.

Nickel 63 et Fer 55

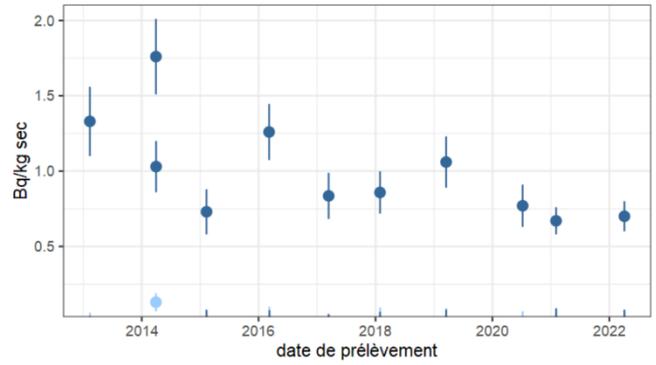
Les résultats d'analyse des activités en ⁶³Ni et en ⁵⁵Fe dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 54 et du Tableau 55 page 116, respectivement.

Le ⁶³Ni est détectable dans les algues en champ proche et lointain des rejets d'effluents liquides du CNPE de Paluel, avec des activités comparables en champ proche et lointain. Les activités mesurées dans l'environnement du CNPE de Paluel sont dans la même gamme que les valeurs mesurées depuis 2016 dans les algues.

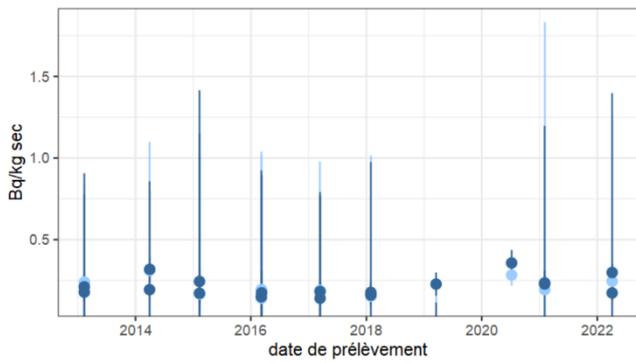
Le ⁵⁵Fe, recherché dans les algues et les bulots, n'y est pas décelable en 2022. La technique de mesure du ⁵⁵Fe fournit pour ces échantillons des limites de détection trop élevées pour affiner le diagnostic, comme ce fut le cas pour les précédents bilans décennaux et suivis annuels des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord depuis 2011.



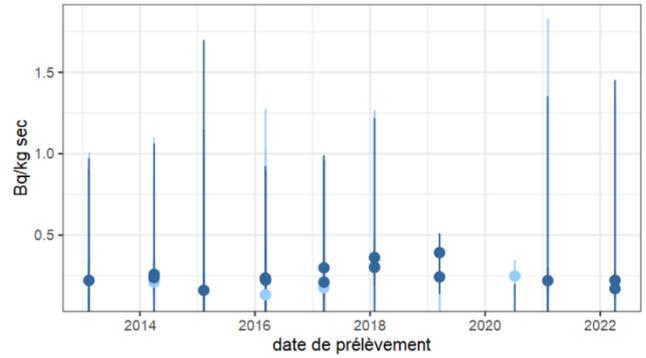
Cs-137 - Sédiments



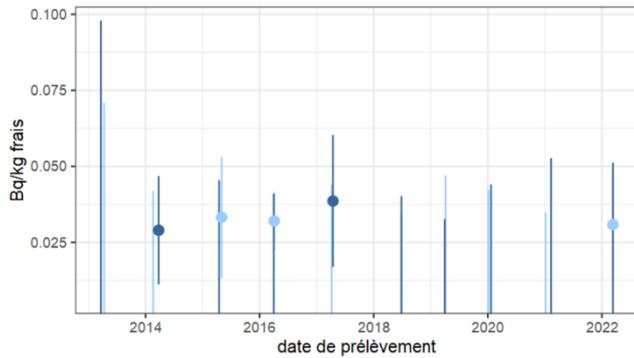
Co-60 - Sédiments



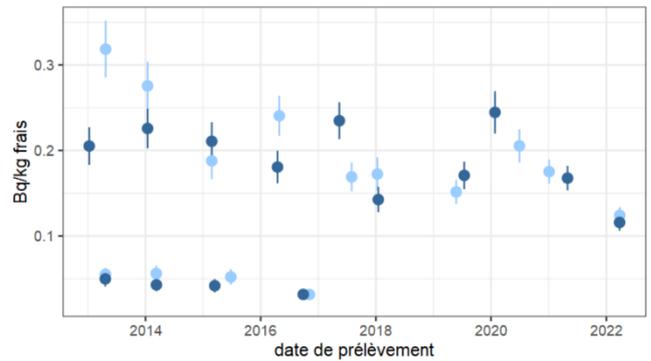
Cs-137 - Algues



Co-60 - Algues



Cs-137 - Crustacés aquatiques



Cs-137 - Poissons

Légende pour les figures des pages suivantes en milieu marin :



Prélèvements en champ lointain et hors influence potentielle du dispositif de rejet des effluents liquides du CNPE

Prélèvements en champ proche et sous influence potentielle du dispositif de rejet des effluents liquides du CNPE

Figure 18 – Variation temporelle de 2013 à 2022 des activités des principaux radionucléides artificiels détectés par spectrométrie gamma au sein des sédiments, des algues, des crustacés et des poissons échantillonnés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel.

5.4. Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Paluel

Les niveaux d'activités des radionucléides naturels détectés en 2022 dans l'environnement du CNPE de Paluel sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés depuis l'instauration des suivis radioécologiques. Le ^{40}K est le radionucléide d'origine naturelle prépondérant.

La radioactivité gamma d'origine artificielle dans le sol, l'herbe, les mousses terrestres et le lait est exclusivement imputable au ^{137}Cs . La présence de ce radionucléide artificiel dans l'environnement terrestre est essentiellement liée aux retombées des essais aériens d'armes nucléaires, l'accident de Tchernobyl ayant peu marqué la Normandie. La dispersion de ^{137}Cs depuis le milieu marin vers l'environnement terrestre *via* les aérosols marins, quelle qu'en soit l'origine, n'est également pas à exclure pour expliquer la présence de ce radionucléide au sein des matrices terrestres échantillonnées à proximité immédiate de la côte (herbe et salade notamment). L'activité en tritium libre et en tritium organiquement lié met en évidence un marquage lié aux rejets d'effluents à l'atmosphère pour l'herbe et la salade. L'activité en ^{14}C dans les salades est significativement supérieure au bruit de fond sur le territoire français hors influence industrielle ($222 \pm 7 \text{ Bq.kg}^{-1} \text{ C}$ d'après [3]). Au vu des résultats obtenus dans le cadre du suivi radioécologique 2022, il apparaît que les rejets d'effluents à l'atmosphère ne donnent pas lieu à un marquage quantifiable de l'environnement terrestre du site, si ce n'est pour le ^{14}C et le ^3H dans les salades et le ^3H dans l'herbe.

En 2022, les diverses matrices sédimentaires et biologiques collectées dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont essentiellement marquées par le ^{137}Cs . À une fréquence moindre, d'autres radionucléides artificiels tels le ^{60}Co (sédiments, algues), le ^{241}Am (sédiments), et l' $^{108\text{m}}\text{Ag}$ (mollusques) sont également quantifiés. Outre la rémanence des retombées atmosphériques globales dans le cas du ^{137}Cs , les radionucléides artificiels quantifiés dans les matrices marines ont parfois une double origine : les rejets d'effluents liquides de l'usine ORANO La Hague et ceux du CNPE de Paluel (hormis pour le ^{241}Am , présent uniquement dans les rejets de l'usine ORANO La Hague). L' $^{108\text{m}}\text{Ag}$, qui peut se trouver ponctuellement dans les rejets liquides des CNPE, est uniquement quantifié dans les bulots en champ proche et en champ lointain, à des niveaux comparables, sans que son origine ne soit clairement établie. En 2022, le ^{60}Co est quantifié dans les sédiments et les algues prélevés en champ proche uniquement. Les niveaux d'activité en radionucléides artificiels émetteurs gamma quantifiés dans l'environnement marin proche du CNPE de Paluel, notamment dans les produits de consommation (mollusques, crustacés et poissons) restent très faibles. Les activités en tritium libre et en tritium organiquement lié dans les différents échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont dans la gamme des valeurs attendues considérant les niveaux d'activité mesurables dans l'eau de mer principalement liés à la dispersion des rejets d'effluents liquides de l'usine ORANO La Hague, hormis pour les algues en champ proche, et mettent en évidence un marquage en tritium par les rejets d'effluents liquides du CNPE de Paluel dans les algues. Les activités en ^{14}C témoignent de l'influence globale des INB de la Manche [3], sans que l'influence des rejets d'effluents liquides du CNPE de Paluel ne puisse être mise en évidence.

5.5. Tableaux de résultats

Tableau 31 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Date	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Distance au site	10 km	10 km	10 km	1,6 à 10,3 km	0,8 et 10,0 km	0,7 km	0,7 km	0,8 km	0,9 km	0,9 km
Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg ⁻¹ sec)										
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³⁷ Cs	5,7 (1/1)	4,2 (1/1)	4,6 (1/1)	2,1-4,7 (4/4)	3,87-6,60 (2/2)	6,6 (1/1)	6,8 (1/1)	8,1 (1/1)	5,72 (1/1)	4,5 (1/1)
⁵⁷ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⁶⁰ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
^{110m} Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹⁰⁶ Ru/Rh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
²⁴¹ Am	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	-

n.a : non analysé ; - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 32 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses et de lichens collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Année	2013		2014		2015		2016		2017		2018	2019	2021	2022
Fraction	Entier		Entier	Entier	Entier	Entier								
Chronique	Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (<5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (<5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (<5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (<5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (<5 km)	Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel - zone sous les vents (<5 km)
<i>Emetteurs gamma d'origine artificielle (Bq.kg⁻¹ sec)</i>														
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³⁷ Cs	1,41-9,7 (2/2)	0,78 (1/1)	1,14 (1/1)	0,48-1,87 (2/2)	-	0,21 (1/2)	0,76 (1/1)	0,42 (1/2)	0,45-1,72 (2/2)	0,45 (1/1)	0,50-0,75 (2/2)	0,40 (1/1)	-	0,91 (1/1)
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⁶⁰ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
^{110m} Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⁵⁴ Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹²⁴ Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹²⁵ Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³¹ I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Espèces concernées : *Eurhynchium species*, *Polytric*, *Polytric formosum*, Ramaline des Rochers

n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 33 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'herbe collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Date	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg⁻¹ sec)										
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
¹³⁷ Cs	0,08 (1/1)	0,15 (1/1)	-	0,06 (1/3)	0,04 (1/1)	0,34 (1/1)	0,24 (1/1)	n.a.	1,119 (1/1)	0,313 (1/1)
⁵⁷ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
⁶⁰ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
^{110m} Ag	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
¹⁰⁶ Ru/Rh	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
²⁴¹ Am	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
Émetteurs β (³H libre : Bq.L⁻¹ d'eau de dessiccation, ³H lié : Bq.L⁻¹ d'eau de combustion ; ¹⁴C : Bq.kg⁻¹ C)										
³ H libre	n.a.	n.a.	3,0 (1/1)	1,8-5,8 (2/2)	2,4 (1/1)	2,5 (1/1)	4,1 (1/1)	2,8 (1/1)	2,3 (1/1)	8,2 (1/1)
³ H lié	n.a.	n.a.	n.a.	1,4-3,6 (2/2)	3,1 (1/1)	2,5 (1/1)	3,5 (1/1)	2,7 (1/1)	3,6 (1/1)	5,8 (1/1)
¹⁴ C	232 (1/1)	229-244 (2/2)	230-252 (5/5)	231-278 (6/6)	232-272 (5/5)	226-242 (4/4)	244-259 (4/4)	232-264 (4/4)	221-233 (4/4)	226-233 (3/3)

n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 34 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de salades collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Date	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Distance au site	1,6 km	1,6 km	1,6 km	1,6 et 5,7 km	1,6 km	1,6 km	1,6 km	-	1,6 km	1,6 km
Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg ⁻¹ sec)										
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
¹³⁷ Cs	-	0,20 (1/1)	-	0,40 (1/2)	0,18 (1/1)	-	-	n.a.	-	-
⁵⁷ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
⁶⁰ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
^{110m} Ag	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
¹⁰⁶ Ru/Rh	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
²⁴¹ Am	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-

Date	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Distance au site	1,6 km	1,6 km	1,6 km	1,6 et 5,7 km	1,6 km	1,6 km	1,6 km	-	1,6 km	1,6 km
Émetteurs β (³ H libre : Bq.L ⁻¹ d'eau de dessiccation, ³ H lié : Bq.L ⁻¹ d'eau de combustion ; ¹⁴ C : Bq.kg ⁻¹ C)										
³ H libre	n.a.	n.a.	2,6 (1/1)	1,2-1,6 (2/2)	1,6 (1/1)	2,2 (1/1)	1,7 (1/1)	n.a.	2,7 (1/1)	2,5 (1/1)
³ H lié	n.a.	n.a.	2,5 (1/1)	2,7-3,2 (2/2)	2,6 (1/1)	2,4 (1/1)	2,2 (1/1)	n.a.	3,5 (1/1)	2,7 (1/1)
¹⁴ C	n.a.	n.a.	n.a.	236-257 (2/2)	n.a.	235 (1/1)	239 (1/1)	n.a.	272 (1/1)	238 (1/1)

n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 35 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de lait collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Date	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Distance au site	10 km	10 km	10 km	10 km	10 km	9,5 km	9,6 km	9,6 km	9,7 km	9,7 km
Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.L⁻¹)										
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
¹³⁷ Cs	-	-	-	0,009 (1/1)	-	0,006 (1/1)	0,004 (1/1)	n.a.	-	0,0068 (1/1)
⁵⁷ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
⁶⁰ Co	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
^{110m} Ag	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
¹⁰⁶ Ru/Rh	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
²⁴¹ Am	-	-	-	-	-	-	-	n.a.	-	-
Date	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Distance au site	10 km	10 km	10 km	10 km	10 km	9,5 km	9,6 km	9,6 km	9,7 km	9,7 km
Émetteurs β (³H libre : Bq.L⁻¹ d'eau de dessiccation, ³H lié : Bq.L⁻¹ d'eau de combustion, ¹⁴C : Bq.kg⁻¹ C)										
³ H libre	-	0,8 (1/1)	0,7 (1/1)	0,9 (1/1)	-	-	-	-	0,9 (1/1)	-
³ H lié	1,2 (1/1)	1,7 (1/1)	1,8 (1/1)	0,9 (1/1)	0,9 (1/1)	1,4 (1/1)	0,6 (1/1)	n.a.	1,2 (1/1)	1,5 (1/1)
¹⁴ C	n.a.	n.a.	230-233 (4/4)	227-235 (5/5)	234 (1/1)	243 (1/1)	229 (1/1)	246 (1/1)	227 (1/1)	228 (1/1)

n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 36 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'eau de boisson collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Date	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Distance au site	1,6 km	10 km	1,6 km	1,6 km	1,6 km	1,6 km	1,6 km	-	9,7 km	9,7 km
Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.L⁻¹)										
¹³⁴ Cs	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
¹³⁷ Cs	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
⁵⁷ Co	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
⁵⁸ Co	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
⁶⁰ Co	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
^{110m} Ag	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
¹⁰⁶ Ru/Rh	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
²⁴¹ Am	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Émetteurs β (³H libre : Bq.L⁻¹)										
³ H libre	1,1 (1/1)	-	-	-	-	0,7 (1/1)	-	n.a.	-	-

n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 37 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Année	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020	2021		2022		
Fraction	≤ 2 mm		Produits de tamisage		Produits de tamisage	Produits de tamisage		Produits de tamisage												
Chronique	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	
<i>Emetteurs gamma d'origine artificielle (Bq.kg⁻¹ sec)</i>																				
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³⁷ Cs	-	3,5 (1/2)	0,45 (1/1)	2,98-3,3 (2/2)	-	0,23-2,62 (2/2)	0,313 (1/1)	0,235-3,25 (2/2)	0,032 (1/1)	2,23 (1/2)	0,213 (1/1)	0,167-3,04 (2/2)	0,17 (1/1)	0,25-2,97 (2/2)	-	2,67 (1/1)	0,133 (1/1)	0,15-2,92 (2/2)	-	0,112-2,7 (2/2)
²⁴¹ Am	-	-	-	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,49 (1/2)	n.d.	1,17 (1/2)								
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⁶⁰ Co	-	1,33 (1/2)	0,13 (1/1)	1,03-1,76 (2/2)	-	0,73 (1/2)	-	1,26 (1/2)	-	0,84 (1/2)	-	0,86 (1/2)	-	1,06 (1/2)	-	0,77 (1/1)	-	0,67 (1/2)	-	0,7 (1/2)
^{110m} Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⁵⁴ Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹²⁴ Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹²⁵ Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³¹ I	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.
<i>Emetteurs beta (³H libre : Bq.L⁻¹ d'eau de dessiccation, ³H lié : Bq.L⁻¹ d'eau de combustion, ¹⁴C : Bq.kg⁻¹ C, autres : Bq.kg⁻¹ sec)</i>																				
³ H libre	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7,6 (1/1)	6,5-6,9 (2/2)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
³ H lié	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	34-44 (2/2)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2,13	4,8	n.a.	n.a.
¹⁴ C	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	95,6 (1/1)	135-206,6 (2/2)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	340,9 (1/1)	n.a.	n.a.
⁶³ Ni	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	1,99 (1/2)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Année	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020	2021	2022	
Fraction	≤ 2 mm		≤ 2 mm		≤ 2 mm		≤ 2 mm		≤ 2 mm		≤ 2 mm		Produits de tamisage		Produits de tamisage	Produits de tamisage	Produits de tamisage	
<i>Emetteurs alpha (Bq.kg⁻¹ sec)</i>																		
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,0955 (1/1)	0,970 (1/1)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
²³⁸ Pu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,0287 (1/1)	0,332 (1/1)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
²⁴¹ Am	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,1069 (1/1)	1,660 (1/1)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Espèces concernées : Sable de plage, Sédiments

n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 38 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'algues collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Date	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Distance au site	0,8 à 12 km	0,8 à 12 km	0,8 à 12 km	0,8 à 22 km	0,8 à 12 km	1,6 à 8,8 km	1,6 à 8,8 km	6,3 et 9,7 km	1,4 à 8,7 km	1,4 à 8,7 km
Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg ⁻¹ sec)										
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³⁷ Cs	0,18-0,24 (3/3)	0,19-0,32 (3/3)	0,17-0,24 (3/3)	0,15-0,19 (4/4)	0,14-0,19 (3/3)	0,15-0,18 (3/3)	0,23 (1/3)	0,28-0,36 (2/2)	0,193-0,235 (3/3)	0,172-0,299 (3/3)
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⁶⁰ Co	0,22 (1/3)	0,21-0,26 (3/3)	0,16 (1/3)	0,13-0,24 (3/4)	0,18-0,30 (3/3)	0,30-0,36 (3/3)	0,24-0,39 (2/3)	0,25 (1/2)	0,220 (1/3)	0,171-0,222 (2/3)
^{110m} Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹⁰⁶ Ru/Rh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
²⁴¹ Am	0,18 (1/3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹²⁹ I	-	-	-	4,6-10,8 (4/4)	-	-	-	-	-	-
¹³¹ I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Émetteurs β (³ H libre : Bq.L ⁻¹ d'eau de dessiccation, ³ H lié : Bq.L ⁻¹ d'eau de combustion ; ¹⁴ C : Bq.kg ⁻¹ C ; ⁶³ Ni : Bq.kg ⁻¹ sec)										
³ H libre	n.a.	n.a.	5,2-6,5 (3/3)	4,0-6,8 (4/4)	n.a.	5,6-6,9 (2/2)	4,6-9,5 (2/2)	n.a.	3,4-5,4 (2/2)	5,5-6,9 (2/2)
³ H lié	n.a.	n.a.	n.a.	4,8-7,3 (4/4)	n.a.	6,0-7,1 (2/2)	6,5-7,3 (2/2)	n.a.	5,1-5,3 (2/2)	6,7-8,1 (2/2)
¹⁴ C	n.a.	n.a.	n.a.	288-302 (3/3)	n.a.	286-290 (2/2)	269-278 (2/2)	n.a.	274,5-284,1 (2/2)	253,8-277,8 (2/2)
⁶³ Ni	n.a.	n.a.	0,462-0,91 (2/2)	0,36-1,32 (3/3)	1,08-1,53 (2/2)	1,00-1,92 (3/3)	1,10-1,16 (2/2)	n.a.	0,86-1,13 (2/2)	0,71-0,72 (2/2)
Émetteurs α (Bq.kg ⁻¹ sec)										
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	n.a.	n.a.	n.a.	87,8-172,0 (3/3)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
²³⁸ Pu	n.a.	n.a.	n.a.	32,8-61,1 (3/3)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
²⁴¹ Am	n.a.	n.a.	n.a.	18,8-26,2 (3/3)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
²⁴⁴ Cm	n.a.	n.a.	n.a.	0,94-1,58 (3/3)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 39 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de mollusques collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Année	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022										
Fraction	Chair																			
Chronique	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche																		
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³⁷ Cs	0,0172- 0,037 (2/2)	0,0220- 0,076 (2/2)	0,0357 (1/2)	0,0214- 0,128 (2/2)	0,0196- 0,0290 (2/2)	0,0184- 0,0745 (2/2)	0,0147- 0,0209 (2/2)	0,0180- 0,0208 (2/2)	0,0177 (1/1)	0,0393 (1/1)	0,0175 (1/1)	0,0214- 0,049 (2/2)	0,0235 (1/1)	0,0163 (1/1)	-	0,0136 (1/1)	0,0111 (1/1)	0,0154 (1/1)	0,0187 (1/1)	0,0181 (1/1)
²⁴¹ Am	n.a.	0,027 (1/2)	n.a.	0,051 (1/2)	n.a.	0,0318 (1/2)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,0192 (1/2)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
⁶⁰ Co	-	0,0150 (1/2)	0,023- 0,031 (2/2)	0,071 (1/2)	-	0,0432 (1/2)	-	-	-	0,0118 (1/1)	0,0142 (1/2)	-	-	-	-	0,0087 (1/1)	-	-	-	-
^{110m} Ag	-	-	-	0,025 (1/2)	0,0137 (1/2)	0,0169 (1/2)	0,025 (1/2)	0,054 (1/2)	-	-	0,0127 (1/1)	0,0119 (1/2)	-	-	-	-	-	-	-	-
⁵⁴ Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹²⁴ Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹²⁵ Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³¹ I	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	-	n.a.	n.a.										
¹⁰⁶ Rh	n.a.	n.a.	0,155 (1/1)	0,100 (1/2)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.								
^{108m} Ag	0,0199 (1/1)	0,0191 (1/1)	0,026 (1/1)	n.a.	0,0185- 0,0220 (2/2)	0,0217 (1/2)	0,0180- 0,0332 (2/2)	0,0184 (1/2)	n.a.	0,0141 (1/1)	0,0519 (1/1)	0,0510 (1/2)	0,0276 (1/1)	0,0137 (1/1)	0,047 (1/1)	0,0159 (1/1)	n.a.	0,0240 (1/1)	0,0417 (1/1)	0,0453 (1/1)
<i>Emetteurs beta (³H libre : Bq.L⁻¹ d'eau de dessiccation, ³H lié : Bq.L⁻¹ d'eau de combustion, ¹⁴C : Bq.kg⁻¹ C, autres : Bq.kg⁻¹ frais)</i>																				
³ H libre	5,8 (1/1)	7,4 (1/1)	5 (1/1)	4,8 (1/1)	7,6 (1/1)	5,3 (1/1)	7 (1/1)	7,8 (1/1)	5,93 (1/1)	5,53 (1/1)	n.a.	n.a.								
³ H lié	4,6 (1/1)	5,1 (1/1)	5,2 (1/1)	4,1 (1/1)	5,8 (1/1)	5,1 (1/1)	6,3 (1/1)	7,5 (1/1)	5,35 (1/1)	5,40 (1/1)	5,22 (1/1)	6,2 (1/1)	5,3 (1/1)	4,6 (1/1)	4,6 (1/1)	4,1 (1/1)	5,1 (1/1)	5,3 (1/1)	6,3 (1/1)	6,4 (1/1)

Année	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022										
Fraction	Chair																			
Chronique	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche																		
¹⁴ C	267,3 (1/1)	301,3 (1/1)	270,1 (1/1)	278,1 (1/1)	273,9 (1/1)	266 (1/1)	281 (1/1)	287,4 (1/1)	296 (1/1)	280 (1/1)	368 (1/1)	287 (1/1)	330,6 (1/1)	333,2 (1/1)	n.a.	n.a.	334,7 (1/1)	335 (1/1)	331 (1/1)	336,6 (1/1)
⁵⁵ Fe	n.a.	n.a.	-	-	n.a.	n.a.														
⁶³ Ni	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,028 (1/1)	0,036 (1/1)	0,013 (1/1)	0,019 (1/1)	0,0500 (1/1)	0,0598 (1/1)	-	0,079 (1/1)	0,0227 (1/1)	0,0124 (1/1)	n.a.	n.a.	-	0,0138	n.a.	n.a.
<i>Emetteurs alpha (Bq.kg⁻¹ frais)</i>																				
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,00730 (1/1)	0,00767 (1/1)	n.a.	n.a.										
²³⁸ Pu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,00249 (1/1)	0,00272 (1/1)	n.a.	n.a.										
²⁴¹ Am	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,00932 (1/1)	0,00905 (1/1)	n.a.	n.a.										

Espèces concernées : Bulot, Patelle

n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 41 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2013 à 2022 dans le cadre du suivi radioécologique.

Année	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		
Fraction	Muscle																				
Chronique	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	Paluel - champ lointain	Paluel - champ proche	
<i>Emetteurs gamma d'origine artificielle (Bq.kg⁻¹ frais)</i>																					
¹³⁴ Cs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
¹³⁷ Cs	0,0551-0,318 (2/2)	0,0498-0,205 (2/2)	0,0561-0,275 (2/2)	0,0429-0,226 (2/2)	0,0521-0,188 (2/2)	0,0418-0,211 (2/2)	0,0315-0,241 (2/2)	0,0317-0,181 (2/2)	0,169 (1/1)	0,235 (1/1)	0,172 (1/1)	0,143 (1/1)	0,152 (1/1)	0,171 (1/1)	0,205 (1/1)	0,245 (1/1)	0,175 (1/1)	0,168 (1/1)	0,1241 (1/1)	0,1158 (1/1)	
⁵⁸ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⁶⁰ Co	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
^{110m} Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
⁵⁴ Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
¹²⁴ Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
¹²⁵ Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
¹³¹ I	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.	n.a.											
<i>Emetteurs beta (³H libre : Bq.L⁻¹ d'eau de dessiccation, ³H lié : Bq.L⁻¹ d'eau de combustion, ¹⁴C : Bq.kg⁻¹ C)</i>																					
³ H libre	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7,1 (1/1)	3,9-6,9 (2/2)	5,5-9,5 (2/2)	6,6-8,6 (2/2)	n.a.	n.a.	n.a.										
³ H lié	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	4,4 (1/1)	4,1-4,2 (2/2)	4,9-5,5 (2/2)	5,09-7,5 (2/2)	6,04 (1/1)	3,75 (1/1)	9,0 (1/1)	7,88 (1/1)	11,3 (1/1)	4,7 (1/1)	2,3 (1/1)	5,2 (1/1)	4,2 (1/1)	4,0 (1/1)	3,8 (1/1)	3,9 (1/1)	
¹⁴ C	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	369 (1/1)	290-322 (2/2)	314-390 (2/2)	324-447,6 (2/2)	343 (1/1)	319 (1/1)	346 (1/1)	338 (1/1)	346 (1/1)	371 (1/1)	308 (1/1)	315 (1/1)	322 (1/1)	294 (1/1)	326 (1/1)	325 (1/1)	
<i>Emetteurs alpha (Bq.kg⁻¹ frais)</i>																					
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	0,000012 (1/1)	n.a.	n.a.											
²³⁸ Pu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	-	n.a.	n.a.											
²⁴¹ Am	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,0000104 (1/1)	0,000024 (1/1)	n.a.	n.a.											

Espèces concernées : Bar ou Loup, Sole, Vieille. n.a. : non analysé. - : inférieur au seuil de décision.

Tableau 42 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sol collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Date de mesure	Qualité	Frais/sec	Fractions	%
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel	04/04/2022	Sols	Sol de pâturage ou de prairie	≤ 2 mm	12/12/2022	sec	1,31	Matière organique	5,6±0,2
									Argile (< 2µm)	16,0±0,7
									Limons fins	9,5±0,5
									Limons grossiers	27,7±1,3
									Sables fins	31,9±1,1
									Sables grossiers	14,9±0,8

Dans les tableaux des pages suivantes, pour le milieu terrestre :

	Prélèvements hors vents dominants de l'installation (> 5km)
	Prélèvements sous les vents dominants de l'installation (< 5km)
	Prélèvement d'eau phréatique hors aval hydraulique

Tableau 43 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Qualité	Frais/Sec	Date de mesure	^{40}K	Famille du ^{232}Th	Famille de ^{238}U			^7Be	Unité
										^{228}Ac	^{234}Th	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	^{210}Pb		
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel	04/04/2022	Sols	Sol de pâturage ou de prairie	≤ 2 mm	Sec	1,31	14/10/2022	251 \pm 18	21,7 \pm 1,4	23,8 \pm 2	≤ 16	35 \pm 10	≤ 11	Bq.kg $^{-1}$ sec
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	02/08/2022	Légumes	Salades	Parties aériennes	Cendre	8,39	17/10/2022	1 890 \pm 150	0,78 \pm 0,27	$\leq 1,1$	≤ 15	4,40 \pm 0,96	35,6 \pm 3,1	Bq.kg $^{-1}$ sec
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel	04/04/2022	Herbes	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	Cendre	6,79	07/09/2022	740 \pm 56	1,29 \pm 0,25	$\leq 0,70$	≤ 14	32,0 \pm 4,1	333 \pm 27	Bq.kg $^{-1}$ sec
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Saint-Valery-en-Caux	04/04/2022	Mousses terrestres	Polytric	Entier	Frais	1,16	08/04/2022	168 \pm 12	$\leq 1,6$	n.a.	n.a.	n.a.	306 \pm 17	Bq.kg $^{-1}$ sec
Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	02/08/2022	Produits laitiers	Lait de vache	Entier	Cendre	7,66	01/12/2022	44,0 \pm 3,4	$\leq 0,025$	$\leq 0,053$	$\leq 0,91$	$\leq 0,061$	$\leq 0,14$	Bq.L $^{-1}$

n.a. : non analysé.

Tableau 44 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Qualité	Frais/Sec	Date de mesure	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	⁵⁴ Mn	¹²⁴ Sb	¹²⁵ Sb	^{123m} Te	¹³¹ I*	Unité
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel	04/04/2022	Sols	Sol de pâturage ou de prairie	≤ 2 mm	Sec	1,31	14/10/2022	≤ 0,14	4,50±0,34	≤ 0,70	≤ 0,15	≤ 0,25	≤ 0,23	≤ 1,0	≤ 0,39	≤ 0,30	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	02/08/2022	Légumes	Salades	Parties aériennes	Cendre	8,39	17/10/2022	≤ 0,094	≤ 0,092	≤ 0,21	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,11	≤ 0,19	≤ 0,23	≤ 0,069	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel	04/04/2022	Herbes	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	Cendre	6,79	07/09/2022	≤ 0,067	0,313±0,049	≤ 0,31	≤ 0,098	≤ 0,13	≤ 0,098	≤ 0,32	≤ 0,17	≤ 0,084	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Saint-Valery-en-Caux	04/04/2022	Mousses terrestres	Polytric	Entier	Frais	1,16	08/04/2022	≤ 0,30	0,91±0,45	≤ 0,35	≤ 0,45	≤ 0,30	≤ 0,35	≤ 0,31	≤ 0,81	n.a.	≤ 0,38	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	02/08/2022	Produits laitiers	Lait de vache	Entier	Cendre	7,66	01/12/2022	≤ 0,0053	0,0068±0,0029	≤ 0,018	≤ 0,0084	≤ 0,0091	≤ 0,0068	≤ 0,018	≤ 0,013	≤ 0,0046	n.a.	Bq.L ⁻¹

n.a. : non analysé. * Du fait de sa courte période radioactive, l'¹³¹I a été analysé sur des échantillons frais.

Tableau 45 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Frais/Sec	Date de mesure	³ H libre (Bq.L ⁻¹ d'eau de dessiccation)	³ H libre (Bq.kg ⁻¹ sec ou frais ou Bq.L ⁻¹)	Unité
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	02/08/2022	Légumes	Salades	Parties aériennes	8,08	05/10/2022	2,5±0,8	2,19±0,70	Frais
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel	04/04/2022	Herbes	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	6,22	23/05/2022	8,2±1,2	6,9±1,0	Frais
Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	02/08/2022	Produits laitiers	Lait de vache	Entier	7,44	20/12/2022	≤ 0,80	≤ 0,69	Liquide
Paluel - Eau phréatique hors aval hydraulique	Gueutteville-les-Grès	01/08/2022	Eaux de boisson	Eau de boisson	Filtrée 0,2µm	-	05/10/2022	≤ 0,70	≤ 0,70	Liquide

Tableau 46 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Frais/Sec	Date de mesure	TOL (Bq.L ⁻¹ d'eau de combustion)	TOL (Bq.kg ⁻¹ sec ou frais ou Bq.L ⁻¹)	Unité
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	02/08/2022	Légumes	Salades	Parties aériennes	8,08	22/11/2022	2,7±0,8	0,165±0,050	Frais
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Paluel	04/04/2022	Herbes	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	6,22	04/09/2022	5,8±1,0	0,501±0,090	Frais
Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	02/08/2022	Produits laitiers	Lait de vache	Entier	7,44	10/01/2023	1,5±0,8	0,156±0,083	Liquide

Tableau 47 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Frais/Sec	Date de mesure ^{14}C	^{14}C (Bq.kg ⁻¹ C)	^{14}C (Bq.kg ⁻¹ frais ou sec ou Bq.L ⁻¹ d'ECH)	C _{tot} (g.kg ⁻¹ frais ou sec ou g.L ⁻¹ d'ECH)	$\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (‰)	pMC (%)	Unité
Paluel - zone hors vents dominants (>5 km)	Gueutteville-les-Grès	02/08/2022	Produits laitiers	Lait de vache	Entier	7,44	25/06/2023	228±11	15,97±0,77	70	-25,77	101,0±4,9	Liquide
Paluel - zone sous les vents (<5 km)	Ingouville	02/08/2022	Légumes	Salades	Parties aériennes	8,08	25/06/2023	238±12	11,13±0,56	47	-30,08	106,4±5,4	Frais

Tableau 48 - Teneur en matière organique et caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiment collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Date de mesure	Qualité	Frais/sec	Fractions	%
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	12/12/2022	sec	2,03	Matiere organique	1,9±0,5
									Argiles (<2µm)	31,9±1,2
									Limons Fins	36,0±1,5
									Limons Grossiers	26,6±1,3
									Sables Fins	5,4±0,6
									Sables Grossiers	0,1±0,1
Paluel - champ proche	Veulettes-sur-Mer	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	12/12/2022	sec	1,33	Matiere organique	0,2±0,2
									Argiles (<2µm)	3,2±0,3
									Limons Fins	0,5±0,2
									Limons Grossiers	0,3±0,2
									Sables Fins	40,4±1,3
									Sables Grossiers	55,6±1,6
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	12/12/2022	sec	1,32	Matiere organique	0,3±0,3
									Argiles (<2µm)	3,6±0,3
									Limons Fins	0,1±0,1
									Limons Grossiers	0,5±0,2
									Sables Fins	20,4±0,9
									Sables Grossiers	75,4±0,2

Dans les tableaux des pages suivantes, pour le milieu marin :

Prélèvements en champ lointain et hors influence potentielle du dispositif de rejet des effluents liquides du CNPE

Prélèvements en champ proche et sous influence potentielle du dispositif de rejet des effluents liquides du CNPE

Tableau 49 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine naturelle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Qualité	Frais/Sec	Date de mesure	⁴⁰ K	Famille du ²³² Th	Famille de l' ²³⁸ U			⁷ Be	Unité
										²²⁸ Ac	²³⁴ Th	^{234m} Pa	²¹⁰ Pb		
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	Sec	2,03	12/10/2022	228±19	12,3±1,5	16,3±2,7	18±10	51±10	60±8	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Veulettes-sur-Mer	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	Sec	1,33	14/10/2022	86±6	3,15±0,25	6,6±0,7	≤ 8,0	10,5±2,4	≤ 6,0	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	Sec	1,32	14/10/2022	52,3±4,2	1,75±0,19	4,5±1	≤ 7,0	8,4±2	≤ 5,0	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Frais	5,59	06/04/2022	1 442±67	≤ 5,6	n.a.	n.a.	n.a.	≤ 8,4	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Cendre	5,59	08/07/2022	1 410±120	4,85±0,41	4,68±0,74	≤ 14	2,49±0,71	9,8±1,2	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Paluel	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Cendre	5,23	07/09/2022	1 333±100	5,06±0,42	4,46±0,76	≤ 12	2,20±0,73	9,4±2,1	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Frais	5,34	07/04/2022	1 410±64	≤ 5,9	n.a.	n.a.	n.a.	≤ 8,0	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Cendre	5,34	11/07/2022	1 430±110	5,53±0,46	5,6±1,1	≤ 17	2,10±0,98	10,4±2,0	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Paluel au large	13/03/2022	Crustacés aquatiques	Araignée de mer Maja brachydactyla	Entier	Cendre	2,35	01/12/2022	54,5±4,7	1,00±0,14	≤ 0,51	≤ 5,6	1,16±0,40	≤ 9,3	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	12/03/2022	Crustacés aquatiques	Araignée de mer Maja brachydactyla	Entier	Cendre	2,25	05/09/2022	54,7±4,4	1,16±0,18	0,56±0,18	≤ 3,9	0,85±0,26	2,2±1,0	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	05/07/2022	Mollusques aquatiques	Bulot Buccinum undatum	Chair	Cendre	3,83	28/11/2022	118,4±9,6	≤ 0,047	≤ 0,18	≤ 1,6	0,47±0,13	≤ 0,39	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	01/07/2022	Mollusques aquatiques	Bulot Buccinum undatum	Chair	Cendre	3,94	28/11/2022	112,7±8,8	≤ 0,044	0,168±0,067	≤ 1,6	0,43±0,11	≤ 0,36	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	26/03/2022	Poissons	Vieille Labrus bergylta	Muscle	Cendre	4,56	07/09/2022	121,3±9,5	≤ 0,027	≤ 0,068	≤ 0,95	≤ 0,095	≤ 0,29	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	27/03/2022	Poissons	Vieille Labrus bergylta	Muscle	Cendre	4,57	29/07/2022	121,4±9,5	≤ 0,023	≤ 0,065	≤ 0,68	≤ 0,082	≤ 0,15	Bq.kg ⁻¹ frais

n.a. : non analysé.

Tableau 50 - Activités en radionucléides émetteurs γ d'origine artificielle au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Qualité	Frais/Sec	Date de mesure	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	^{110m} Ag	⁵⁴ Mn	¹²⁴ Sb	¹²⁵ Sb	²⁴¹ Am	^{108m} Ag	^{123m} Te	¹³¹ I*	Unité
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	Sec	2,03	12/10/2022	≤ 0,12	2,7± 0,23	≤ 0,70	0,7± 0,1	≤ 0,21	≤ 0,16	≤ 0,80	≤ 0,34	1,17± 0,15	≤ 0,13	≤ 0,26	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Veulettes-sur-Mer	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	Sec	1,33	14/10/2022	≤ 0,080	0,112± 0,046	≤ 0,39	≤ 0,080	≤ 0,12	≤ 0,100	≤ 0,60	≤ 0,20	≤ 0,16	≤ 0,080	≤ 0,17	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Sédiments	Sable de plage	≤ 2 mm	Sec	1,32	14/10/2022	≤ 0,060	≤ 0,060	≤ 0,35	≤ 0,070	≤ 0,100	≤ 0,090	≤ 0,47	≤ 0,18	≤ 0,12	≤ 0,070	≤ 0,14	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Frais	5,59	06/04/2022	≤ 1,1	≤ 1,4	≤ 1,2	≤ 1,5	≤ 1,1	≤ 1,3	≤ 1,1	≤ 2,8	n.a.	n.a.	n.a.	≤ 0,95	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Cendre	5,59	08/07/2022	≤ 0,082	0,299± 0,052	≤ 0,22	0,222± 0,060	≤ 0,13	≤ 0,10	≤ 0,19	≤ 0,19	≤ 0,093	≤ 0,11	≤ 0,068	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Paluel	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Cendre	5,23	07/09/2022	≤ 0,084	0,173± 0,045	≤ 0,37	0,171 ±0,055	≤ 0,16	≤ 0,11	≤ 0,39	≤ 0,18	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,087	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Frais	5,34	07/04/2022	≤ 0,96	≤ 1,2	≤ 1,2	≤ 1,3	≤ 1,0	≤ 1,2	≤ 1,0	≤ 2,7	n.a.	n.a.	n.a.	≤ 1,0	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Cendre	5,34	11/07/2022	≤ 0,12	0,245± 0,072	≤ 0,32	≤ 0,17	≤ 0,20	≤ 0,14	≤ 0,29	≤ 0,29	≤ 0,14	≤ 0,17	≤ 0,092	n.a.	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ proche	Paluel au large	13/03/2022	Crustacés aquatiques	Araignée de mer Maja brachydactyla	Entier	Cendre	2,35	01/12/2022	≤ 0,054	≤ 0,051	≤ 0,51	≤ 0,068	≤ 0,12	≤ 0,077	≤ 0,84	≤ 0,14	≤ 0,051	≤ 0,065	≤ 0,12	n.a.	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	12/03/2022	Crustacés aquatiques	Araignée de mer Maja brachydactyla	Entier	Cendre	2,25	05/09/2022	≤ 0,033	0,031± 0,018	≤ 0,15	≤ 0,041	≤ 0,056	≤ 0,039	≤ 0,18	≤ 0,082	≤ 0,028	≤ 0,039	≤ 0,036	n.a.	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	05/07/2022	Mollusques aquatiques	Bulot Buccinum undatum	Chair	Cendre	3,83	28/11/2022	≤ 0,011	0,0181± 0,0057	≤ 0,041	≤ 0,016	≤ 0,018	≤ 0,013	≤ 0,047	≤ 0,026	≤ 0,016	0,0453± 0,0067	≤ 0,011	n.a.	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	01/07/2022	Mollusques aquatiques	Bulot Buccinum undatum	Chair	Cendre	3,94	28/11/2022	≤ 0,0098	0,0187± 0,0054	≤ 0,041	≤ 0,016	≤ 0,016	≤ 0,013	≤ 0,044	≤ 0,023	≤ 0,013	0,0417± 0,0057	≤ 0,0098	n.a.	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	26/03/2022	Poissons	Vieille Labrus bergylta	Muscle	Cendre	4,56	07/09/2022	≤ 0,0061	0,1158± 0,0095	≤ 0,030	≤ 0,0095	≤ 0,011	≤ 0,0082	≤ 0,033	≤ 0,015	≤ 0,0082	≤ 0,0082	≤ 0,0068	n.a.	Bq.kg ⁻¹ frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	27/03/2022	Poissons	Vieille Labrus bergylta	Muscle	Cendre	4,57	29/07/2022	≤ 0,0052	0,1241± 0,0095	≤ 0,018	≤ 0,0082	≤ 0,0082	≤ 0,0067	≤ 0,018	≤ 0,012	≤ 0,0068	≤ 0,0068	≤ 0,0052	n.a.	Bq.kg ⁻¹ frais

n.a. : non analysé. * Du fait de sa courte période radioactive, l'¹³¹I a été analysé sur des échantillons frais.

Tableau 51 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Frais/Sec	Date de mesure	³ H libre (Bq.L ⁻¹ d'eau de dessiccation)	³ H libre (Bq.kg ⁻¹ frais ⁻¹)
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	5,68	13/07/2022	6,9±1,1	5,69±0,91
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	5,30	13/07/2022	5,5±1,0	4,46±0,81

Tableau 52 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Frais/Sec	Date de mesure	TOL (Bq.L ⁻¹ d'eau de combustion)	TOL (Bq.kg ⁻¹ sec ou frais)	Unité
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	5,68	23/11/2022	8,1±1,0	0,645±0,088	Frais
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	5,30	23/11/2022	6,7±0,9	0,574±0,084	Frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	13/03/2022	Crustacés aquatiques	Araignée de mer Maja brachydactyla	Chair	3,83	22/11/2022	5,4±0,9	1,02±0,17	Frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	06/01/2021	Crustacés aquatiques	Araignée de mer Maja brachydactyla	Chair	3,71	11/04/2023	6,2±1,0	1,15±0,19	Frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	05/07/2022	Mollusques aquatiques	Bulot Buccinum undatum	Chair	3,76	10/01/2023	6,4±1,2	1,11±0,21	Frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	01/07/2022	Mollusques aquatiques	Bulot Buccinum undatum	Chair	3,62	17/01/2023	6,3±1,1	1,05±0,19	Frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	26/03/2022	Poissons	Vieille Labrus bergylta	Muscle	4,28	24/10/2022	3,9±0,8	0,64±0,13	Frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	27/03/2022	Poissons	Vieille Labrus bergylta	Muscle	4,37	24/10/2022	3,8±0,8	0,59±0,13	Frais

Tableau 53 - Activités en ^{14}C mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Frais/Sec	Date de mesure ^{14}C	^{14}C (Bq.kg ⁻¹ C)	^{14}C (Bq.kg ⁻¹ sec ou frais)	C _{tot} (g.kg ⁻¹ sec ou frais)	$\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (‰)	pMC (%)	Unité
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	5,68	16/11/2022	253,8±2,8	15,44±0,17	61	-19,88	111,2±1,2	Frais
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus <i>Fucus serratus</i>	Entier	5,30	16/11/2022	277,8±3,1	18,31±0,20	66	-19,7	121,6±1,4	Frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	05/07/2022	Mollusques aquatiques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	3,76	10/03/2023	336,6±3,7	39,06±0,43	120	-17,08	146,6±1,6	Frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	01/07/2022	Mollusques aquatiques	Bulot <i>Buccinum undatum</i>	Chair	3,62	08/11/2023	331±20	38,7±2,3	120	-17,13	144,2±8,7	Frais
Paluel - champ proche	Paluel au large	26/03/2022	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	4,28	26/08/2022	325±16	36,3±1,8	110	-17,4	141,6±7,0	Frais
Paluel - champ lointain	Saint-Pierre-en-Port au large	27/03/2022	Poissons	Vieille <i>Labrus bergylta</i>	Muscle	4,37	27/08/2022	326±16	35,0±1,7	110	-18,04	142,2±7,0	Frais

Tableau 54 - Activités en ⁶³Ni mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Frais/Sec	Qualité	Date de mesure ⁶³ Ni	⁶³ Ni (Bq.kg ⁻¹ sec ou frais ou Bq.L ⁻¹)	Ni (g.kg ⁻¹ sec ou frais ou g.L ⁻¹)	Unité
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	5,59	Cendre	29/05/2023	0,71±0,14	0,415	Sec
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	5,34	Cendre	29/05/2023	0,72±0,14	0,401	Sec

Tableau 55 - Activités en ⁵⁵Fe mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2022.

Chronique	Commune	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	Qualité	Frais/Sec	Date de mesure	⁵⁵ Fe	Unité
Paluel - champ proche	Saint-Valery-en-Caux	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Cendre	5,59	21/05/2023	≤ 6,8	Bq.kg ⁻¹ sec
Paluel - champ lointain	Sassetot-le-Mauconduit	05/04/2022	Algues	Fucus Fucus serratus	Entier	Cendre	5,34	21/05/2023	≤ 6,6	Bq.kg ⁻¹ sec

8. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DE LA MANCHE ET DE LA MER DU NORD

8.1. Radioécologie du milieu terrestre

Le ^{137}Cs est détecté dans la plupart des échantillons prélevés (17 fois sur 25). L'activité la plus élevée ($4,50\pm 0,34 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ sec}$) est observée dans le sol de pâturage de Paluel, sous les vents dominants du CNPE de Paluel. Son activité résulte essentiellement des retombées globales des essais aériens d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl (Figure 4 page 22). Du ^{60}Co et du $^{110\text{m}}\text{Ag}$ sont également détectés dans l'herbe échantillonnée en champ proche du CNPE de Gravelines ($0,641\pm 0,054$ et $0,076\pm 0,017 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ sec}$, respectivement).

En 2022, le ^3H libre a été recherché dans l'herbe et/ou le lierre, les salades, l'eau de boisson et le lait. L'activité en ^3H libre est inférieure (Flamanville et Paluel) ou proche du seuil de décision (Penly et Gravelines) dans les 4 eaux de boissons échantillonnées. Le ^3H libre est détecté dans deux des cinq échantillons de lait de vache récoltés ($1,8\pm 0,8$ et $2,0\pm 0,8 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ED}$). Le ^3H libre est détecté dans les cinq échantillons de salades récoltés ($1,9\pm 0,8$ à $2,7\pm 0,9 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ED}$), et reste comparable au bruit de fond attendu en milieu terrestre hors influence des rejets des INB ($0,5$ à $2 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ pour l'HTO d'après [3]). Dans l'herbe échantillonnée à proximité du CNPE de Penly et dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Flamanville, l'activité en ^3H libre ($1,5\pm 0,8$ et $1,8\pm 0,8 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ED}$, respectivement) est également comparable à ce bruit de fond. En revanche, l'activité en ^3H libre dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Gravelines et dans l'herbe échantillonnée à proximité du CNPE de Paluel ($3,2\pm 0,8$ et $8,2\pm 1,2 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ED}$, respectivement) est plus élevée que ce bruit de fond, et témoigne d'un apport local en tritium libre.

Depuis 2010, le ^3H organiquement lié est lui aussi quantifié dans le lait de vache ($0,7\pm 0,7$ à $1,5\pm 0,8 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \text{ EC}$), à un niveau d'activité généralement proche du bruit de fond attendu en milieu terrestre hors influence des rejets des INB ($0,39$ à $1,9 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \text{ EC}$ pour le TOL d'après [3]). En 2022, le ^3H organiquement lié a également été recherché dans la salade, l'herbe et/ou les feuilles de lierre, et son activité y est proche du bruit de fond ($1,8\pm 0,8$ à $2,9\pm 0,8 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \text{ EC}$, toutes matrices confondues), hormis dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Gravelines et dans l'herbe échantillonnée à proximité du CNPE de Paluel ($3,7\pm 0,9$ et $5,8\pm 1,0 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \text{ EC}$, respectivement), où les activités en ^3H organiquement lié témoignent d'un apport local.

Enfin, l'activité en ^{14}C dans la salade (dans l'environnement des CNPE de Flamanville, Penly et Gravelines, 219 ± 11 à $230\pm 11 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$) est comparable à la valeur du bruit de fond sur le territoire français hors influence industrielle ($222\pm 7 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$ d'après [3]), tandis qu'elle témoigne d'un apport local ($238\pm 12 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$) dans l'environnement du CNPE de Paluel, sans que la contribution des rejets du site ne soit démontrée (pas de mesure hors vents). L'activité en ^{14}C dans le lait est également proche de ce bruit de fond dans l'environnement des CNPE de Flamanville, Paluel, Penly et de Gravelines (220 ± 11 à $232\pm 11 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$). L'activité en ^{14}C mesurée trimestriellement dans l'herbe ou les feuilles de lierre échantillonnées à proximité des CNPE de Flamanville (lierre), Paluel (herbe), Penly et Gravelines (lierre) (à environ un kilomètre ou moins des différents CNPE) est dans la majorité des cas comparable au bruit de fond hors influence industrielle (activité comprise entre $225\pm 11 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$, dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Flamanville, et $235\pm 12 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$, dans l'herbe échantillonné à proximité du CNPE de Penly). Dans l'herbe échantillonnée à proximité du CNPE de Penly et dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Gravelines, certaines mesures témoignent d'un apport local probable en ^{14}C dans l'environnement immédiat de ces CNPE (237 ± 12 à $255\pm 13 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ C}$).

À la vue des résultats obtenus dans le cadre du suivi radioécologique 2022, il apparaît que les rejets d'effluents à l'atmosphère des CNPE français côtiers de la Manche et de la Mer du Nord ne donnent pas lieu à un marquage mesurable de l'environnement terrestre, hormis pour les échantillons d'herbe et de lierre échantillonnés à proximité immédiate des CNPE, pour lesquels le marquage par les rejets d'effluents atmosphériques des CNPE est visible pour le ^3H (libre et/ou organiquement lié), et/ou pour le ^{14}C .

8.2. Radioécologie du milieu marin

Les radionucléides artificiels détectés au sein des diverses matrices sédimentaires et biologiques échantillonnées dans l'environnement marin des CNPE côtiers de la Manche et de la Mer du Nord trouvent leur origine potentielle au niveau :

- des eaux de l'océan Atlantique, marquées par les retombées globales des essais atmosphériques d'armes nucléaires et par les rejets de l'usine de retraitement de Sellafield (Royaume-Uni), contribuant notamment à l'apport de ^{137}Cs et de ^3H . De plus, en 2011, le marquage fugace de l'environnement marin par les retombées du panache radioactif provenant de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi au Japon n'est pas à exclure ;
- des fleuves, en particulier la Seine qui draine un bassin versant fortement industrialisé, avec notamment la présence du CNPE de Nogent-sur-Seine ainsi que de nombreux hôpitaux et centres de recherche utilisant des traceurs radioactifs ;
- des rejets d'effluents liquides des CNPE de Flamanville, Paluel, Penly et Gravelines ;
- des rejets d'effluents liquides de l'usine de traitement du combustible usé ORANO La Hague.

Parmi ces diverses origines, les rejets d'effluents liquides de l'usine ORANO La Hague sont les plus à même de marquer l'environnement marin des CNPE côtiers de la Manche et de la Mer du Nord. Certains radionucléides émetteurs gamma (tels que le ^{137}Cs , le ^{134}Cs , le ^{60}Co , le ^{54}Mn et le $^{110\text{m}}\text{Ag}$), tout comme le ^3H libre, sont communs aux rejets d'effluents liquides des CNPE et de l'usine de retraitement du combustible usé. Cependant, les niveaux d'activité en radionucléides artificiels dans les effluents liquides rejetés en mer par l'usine ORANO La Hague sont de 2 à 4 ordres de grandeur supérieurs à ceux des CNPE, notamment dans le cas du ^3H libre. Ceci se traduit par un gradient décroissant des activités de ces radionucléides entre la presque-île du Cotentin et le détroit du Pas-de-Calais (Figure 30 page 203).

Le ^{137}Cs est le radionucléide artificiel le plus fréquemment détecté au sein des matrices échantillonnées (44 fois sur 50). Les activités en ^{137}Cs sont relativement homogènes de Flamanville à Gravelines (Figure 31 page 204). Néanmoins, les apports de l'usine ORANO La Hague contribuent à doubler les activités en ^{137}Cs sur cette zone comparativement aux niveaux mesurés au sein des eaux Atlantiques en entrée de Manche. D'un point de vue quantitatif, les niveaux d'activités en émetteurs gamma artificiels au sein des organismes consommés demeurent très faibles, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de $\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}$ de matière fraîche. L' ^{131}I recherché dans les algues n'est pas détecté à des niveaux supérieurs au seuil de décision.

Les activités en tritium libre et en tritium organiquement lié ($2,7\pm 0,8$ à $8,0\pm 1,2$ $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ED pour l'HTO et $2,0\pm 0,7$ à $12,5\pm 1,7$ $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ EC pour le TOL) dans les sédiments, les algues, les mollusques, les crustacés et les poissons échantillonnés dans l'environnement marin proche des CNPE côtiers de la Manche et de la Mer du Nord sont cohérentes avec les valeurs attendues du fait des niveaux d'activités mesurables dans l'eau de mer en Manche (de l'ordre de 5 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$, et comprises entre 3,7 et 5,9 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ à distance de l'usine ORANO [3, 25, 26]) et majoritairement imputables à la dispersion des rejets d'effluents liquides de l'usine ORANO La Hague. Elles témoignent toutefois d'un marquage par les rejets en tritium pour certains échantillons (16 des 32 activités mesurées sont supérieures à 5 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$, avec une activité maximale de $12,5\pm 1,7$ $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ EC dans les poissons pêchés à proximité du CNPE de Flamanville) dans l'environnement des CNPE de Flamanville, Paluel et Penly en 2022.

Les activités en ^{14}C quantifiées au sein des sédiments, des algues, des mollusques, des crustacés et des poissons échantillonnés dans l'environnement marin des CNPE (230 ± 11 à 450 ± 22 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ C) sont pour la plupart (26 des 28 activités mesurées, l'exception étant représentée par les bars d'aquaculture du Centre Aquacole de Gravelines, et les algues du port de Dieppe) supérieures au bruit de fond hors influence industrielle (233 ± 5 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ C en 2022 d'après nos mesures et d'après [3]), mais cohérentes avec les valeurs moyennes enregistrées par le passé du fait du marquage global par les INB de la Manche [27], et notamment de la proximité de l'usine ORANO

La Hague. Ce marquage en ^{14}C est plus prononcé au voisinage des points de rejet d'effluents liquides des CNPE pour les algues et les mollusques à proximité du CNPE de Flamanville, pour les algues à proximité du CNPE de Penly, et pour les algues et les mollusques à proximité de Gravelines (Figure 32 page 204). A Paluel, le marquage est plus prononcé en champ lointain pour les algues. A Penly, c'est également le cas pour les poissons. A Flamanville, c'est également le cas pour les crustacés. Les différences ne sont pas significatives pour les poissons et les mollusques à Paluel, pour les mollusques à Penly, et pour les sédiments à Flamanville. A Flamanville et Gravelines, les poissons n'ont été échantillonnés qu'en champ proche et la comparaison n'est pas possible.

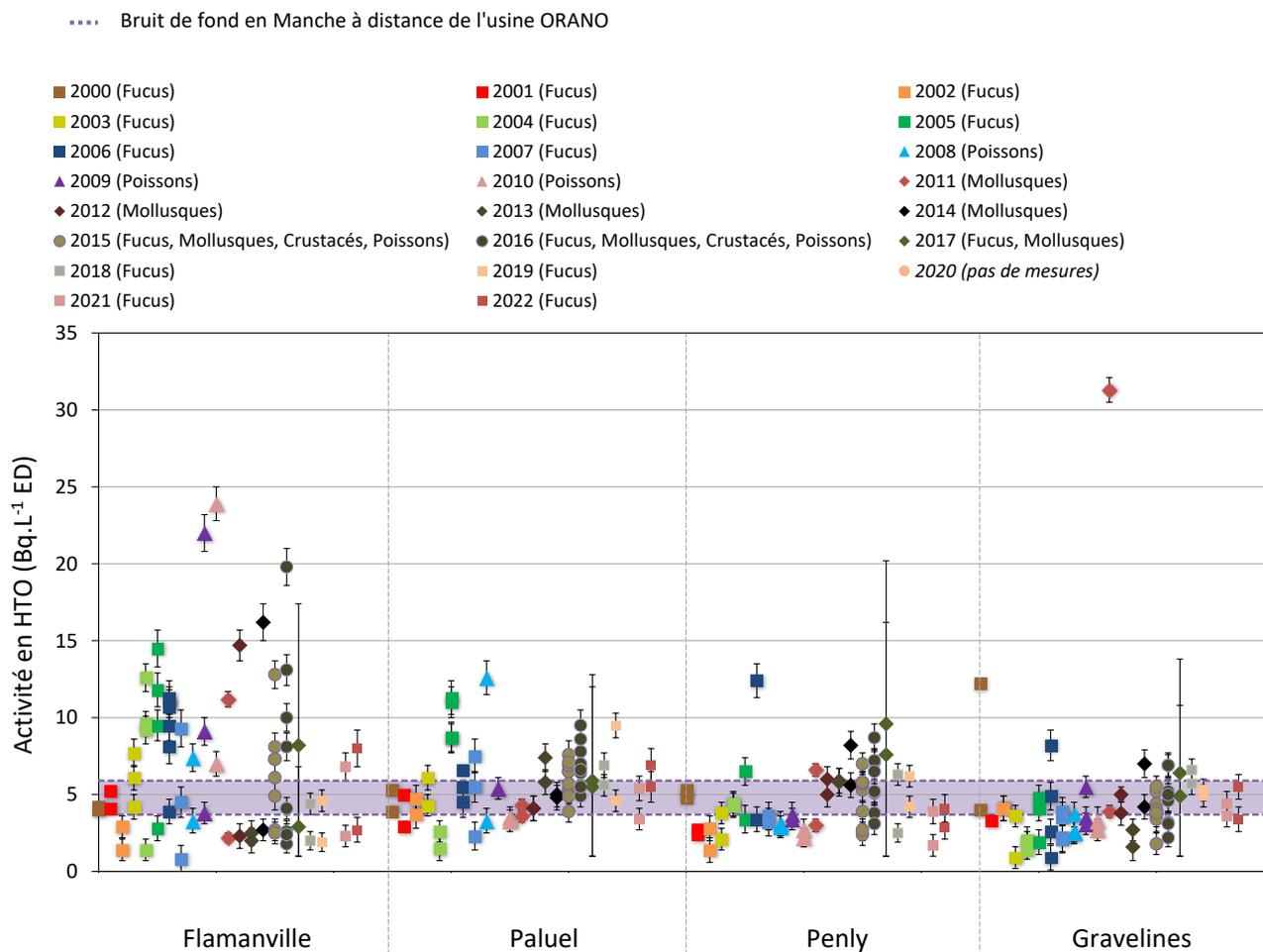


Figure 30 - Activités en tritium libre ($\text{Bq.L}^{-1}\text{ ED}$) mesurées dans les algues, les mollusques, les crustacés et les poissons échantillonnés dans l'environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord depuis 2000. La zone violette indique le bruit de fond attendu en entrée de Manche (i.e. entre $3,7$ et $5,9 \text{ Bq.L}^{-1}$ à distance de l'usine ORANO [3, 25, 26]).

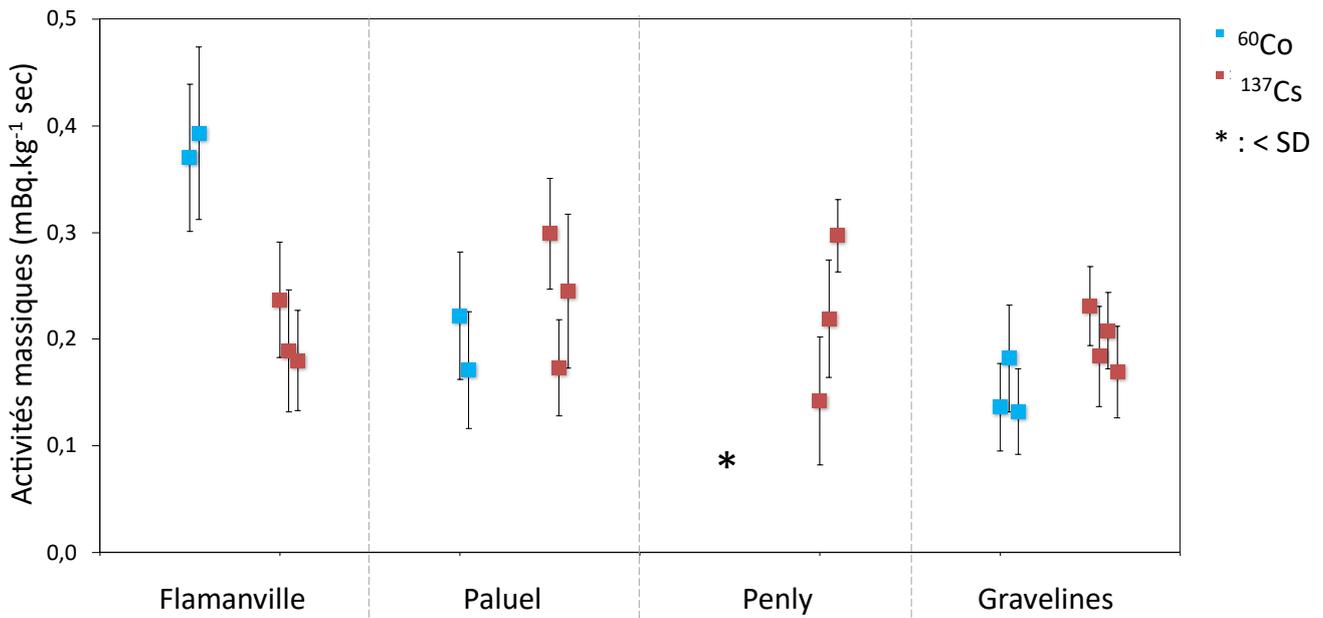


Figure 31 - Activités en ^{60}Co et en ^{137}Cs mesurées dans les algues échantillonnées en 2022 dans l'environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord.

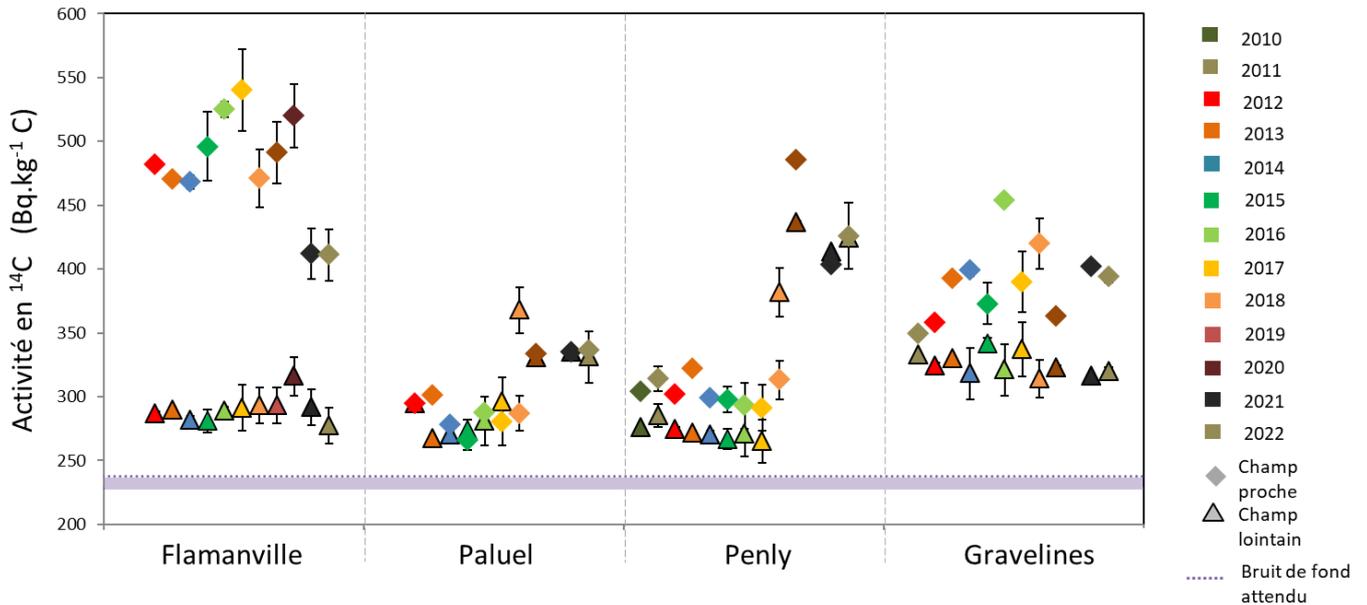


Figure 32 - Activités en ^{14}C ($\text{Bq.kg}^{-1}\text{C}$) dans les mollusques (patelles et moules) échantillonnés depuis 2010 dans l'environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord. Le graphique distingue les prélèvements fait en champ proche de chaque CNPE (losanges) de ceux effectués en champ lointain (triangles), et indique en violet le bruit de fond attendu hors influence industrielle (i.e., $233\pm 5\text{ Bq.kg}^{-1}\text{C}$ d'après [3]).

9. BIBLIOGRAPHIE

1. Bailly du Bois, P. et Dumas, F., *TRANSMER, hydrodynamic model for medium- and long-term simulation of radionuclides transfers in the English Channel and southern North Sea*. Radioprotection, 2005. 40: S575-S580 p.
2. IRSN, *TRANSMER : modèle de simulation des transferts de radionucléides en Manche et Mer du Nord. Choix des options, description, validation et fonctionnalités*. 2003, IRSN. Rapport Rapport DPRE/SERNAT/2003-04, p.
3. IRSN, *Bilan de l'état radioécologique de l'environnement français de 2018 à 2020*. 2021, IRSN. 408 p.
4. Bé, M., Chisté, V., Dulieu, C., Kellet, M.A., Mougeot, X., Arinc, A., Chechev, V.P., Kuzmenko, N.K., Kibédi, A., et Nichols, A.L. *Table of radionuclides*. Monographie BIPM-5 2016; Accessible à l'adresse: <https://www.bipm.org/en/publications/scientific-output/monographie-ri-5.html>.
5. IRSN, *Actualisation des connaissances acquises sur le tritium dans l'environnement*. 2017, IRSN. 76 p.
6. ASN, *Livre blanc du tritium*, 2010, ASN. 304 p.
7. IPSN, *Le tritium dans l'environnement proche du site de l'usine de retraitement de la Hague*. 1998, IPSN. 17 p.
8. IRSN, *Les essais atmosphériques d'armes nucléaires : des retombées radioactives à l'échelle planétaire. Fiche Information de l'Institut de radioprotection et de Sécurité Nucléaire*. 2008, IRSN. 24 p.
9. Renaud, P., Champion, D., et Brenot, J., *Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français: Conséquences environnementales et exposition des personnes*. Sciences et techniques, ed. E.T. Doc2008, Paris: Lavoisier. 190 p.
10. IAEA/WMO. *Global network of isotopes in precipitation. The GNIP database*. 2013. Accessible à l'adresse: <http://www.iaea.org/water>.
11. Olive, P., Hubert, P., et Ravailleau, S., *Estimation pratique de "l'âge" des eaux souterraines en Europe par le tritium*. Revue des sciences de l'eau, 1996. 4: 523-533 p.
12. IRSN, *Niveau d'activité du tritium dans l'environnement. Contribution à la synthèse de la DEI sur le tritium*. 2008, IRSN. Rapport Rapport DEI/SESURE n°2008-34, 57 p.
13. IRSN, *Le tritium dans l'environnement. Point de vue de l'IRSN sur les questions clés et les pistes de recherches et développement*. 2010, IRSN. Rapport Rapport DEI 2010-01, 23 p.
14. Bailly du Bois, P. et Dumas, F., *Fast hydrodynamic model for medium- and long-term dispersion in seawater in the English Channel and southern North Sea, qualitative and quantitative validation by radionuclide tracers*. Ocean Modelling, 2005. 9(2): 169-210 p.
15. Levin, I. et Hesshaimer, V., *A unique tracer of global carbon cycle dynamics*. Radiocarbon, 2000. 42(1): 69-80 p.
16. Fiévet, B., Voiseux, C., Rozet, M., Masson, M., et Bailly du Bois, P., *Transfer of radiocarbon liquid releases from the AREVA La Hague spent fuel reprocessing plant in the English Channel*. Journal of Environmental Radioactivity, 2006. 90(3): 173-196 p.
17. IRSN, *Tchernobyl, 25 ans après*. in *Collection thématique de l'IRSN2011*, IRSN. 48 p.
18. Renaud, P., Champion, D., et Brenot, J., *Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français. Conséquences environnementales et exposition des personnes*. 2007, Paris: Éditions Tec & Doc. Collection Sciences et techniques. Lavoisier.
19. IRSN, *Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France (métropole et DROM-COM) à partir des résultats de la surveillance renforcée de la radioactivité de l'environnement*. 2011, IRSN. Rapport Rapport DEI/2011-01, 90 p.
20. IRSN. *Expertise de l'IRSN en matière de rejets hospitaliers de médecine nucléaire*. 2018 [cited 2018; Accessible à l'adresse:

http://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiques_et_dossiers_de_presse/Pages/expertise_IRSN_en_matiere_de_rejets_hospitaliers_medecine_nucleaire.

21. IAEA, *Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment*. 2004, IAEA: Vienna. Rapport STI/DOC/010/422, 95 p p.
22. Douville, E., Fiévet, B., Germain, P., et Fournier, M., *Radiocarbon behaviour in seawater and the brown algae *Fucus serratus* in the vicinity of the COGEMA La Hague spent fuel reprocessing plant (Goury) - France*. Journal of Environmental Radioactivity, 2004. **77**(3): 355-368 p.
23. IRSN, *Radionucléides naturels en France*. 2007, IRSN. Rapport Rapport DEI/SESURE n°2007-21, 45 p.
24. Reimann, C., Filzmoserb, P., et Garrett, R.G., *Background and threshold: critical comparison of methods of determination*. Science of the Total Environment, 2005. **346**: 1-16 p.
25. IRSN, *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de juin 2011 à décembre 2014*. 2015, IRSN. 252 p.
26. Masson, M., Siclet, F., Fournier, M., Maigret, A., Gontier, G., et Bailly du Bois, P., *Tritium along the French coast of the English Channel*. Radioprotection, 2005. **40**(Suppl. 1): S621-S627 p.
27. IRSN, *Synthèse du suivi radioécologique 2013 des 19 centres nucléaires de production d'électricité en exploitation*. 2014, IRSN. 132 p.
28. IRSN, *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2015 à 2017*. 2018, IRSN. 353 p. p.
29. Direction des études et recherches EDF, *Données courantologiques concernant le site de Penly et conséquences thermiques possibles (avis B)*. 1977, Direction des études et recherches EDF. Rapport E 41/77.03, p.
30. Direction des études et recherches EDF, *Centrale de Penly (Avis C). Impact thermique*. 1978, Direction des études et recherches EDF. Rapport E 42/78-02, p.
31. Nord-Pas-de-Calais, D. *Conditions météo-océaniques*. 2013 [cited 2014; Accessible à l'adresse: http://www.nord-pas-de-calais.developpement-durable.gouv.fr/static/polmar59/Geographie/conditions_meteo_oceaniques.pdf.
32. EDF, *Dossier de demande de renouvellement des autorisations de prélèvement d'eau et de rejets de la centrale nucléaire de Gravelines*. 1998, EDF. p.
33. Blandin, P., *Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques*. Bulletin d'écologie, 1986. **17**(4) p.
34. Stuiver, M. et Polach, A., *Discussion reporting of ¹⁴C data*. Radiocarbon, 1977. **19**(3): 355-363 p.
35. Laboratoire national Henri Becquerel, *Arrondissement des résultats de mesure - Nombre de chiffres significatifs*. 2004, Laboratoire national Henri Becquerel. Rapport Note technique LNHB/04-13, 8 p.
36. Vray, F., Debayle, C., et Louvat, D., *Long-term flux of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs from soil to French rivers : a study on sediment and biological indicators*. Journal of Environmental Radioactivity. 2003. **68**: 93-114. p.
37. Renaud, P. et Louvat, D., *Magnitude of fission product depositions from atmospheric nuclear weapon test fallout in France*. Health Physics, 2004. **86**(4): 6 p.

10. ANNEXES

Annexe 1. Choix des stations de prélèvements	212
Annexe 2. Choix des matrices prélevées	212
2.1. Domaine terrestre	212
2.1.1. Les eaux	212
2.1.2. Les bryophytes	213
2.1.3. Les sols	213
2.1.4. L'herbe	213
2.1.5. Les végétaux cultivés	213
2.1.6. Le lait	213
2.2. Domaine aquatique marin	213
2.2.1. Les sédiments	213
2.2.2. Les algues	213
2.2.3. Les poissons, mollusques et crustacés	214
Annexe 3. Choix des fréquences d'analyses	214
Annexe 4. Choix des analyses	214
Annexe 5. Méthode de prélèvements sur le terrain	214
5.1. Domaine terrestre	214
5.1.1. Eaux (eau de boisson, eau de nappe)	214
5.1.2. Sols	214
5.1.3. Végétaux	215
5.1.4. Lait	215
5.2. Domaine aquatique marin	215
5.2.1. Sédiments	215
5.2.2. Végétaux	215
5.2.3. Poissons, crustacés, mollusques	215
Annexe 6. Préparation et conditionnement des échantillons	216
6.1. Domaine terrestre	216
6.1.1. Eau de boisson	216
6.1.1.1. Mesurage des émetteurs gamma	216
6.1.1.2. Mesurage du tritium	216
6.1.2. Sols	216
6.1.3. Végétaux	216
6.1.3.1. Mesurage des émetteurs gamma	216
6.1.3.2. Mesurage du tritium et du ¹⁴ C	217
6.1.4. Lait	217
6.1.4.1. Mesurage des émetteurs gamma	217
6.1.4.2. Mesurage du tritium et du ¹⁴ C	217
6.2. Domaine aquatique marin	217
6.2.1. Sédiments	217
6.2.2. Végétaux	218
6.2.2.1. Mesurage des émetteurs gamma	218
6.2.2.2. Mesurage du tritium et du ¹⁴ C	218
6.2.3. Poissons, crustacés, mollusques	218
6.2.3.1. Mesurage des émetteurs gamma	218
6.2.3.2. Mesurage du tritium et du ¹⁴ C	218
Annexe 7. Techniques d'analyses	219
7.1. Détermination de la teneur en matière organique et de la granulométrie des sols et des sédiments	219
7.1.1. Teneur en matière organique	219
7.1.2. Granulométrie	219
7.2. Identification des espèces vivantes	219
7.3. Mesure du tritium libre	219
7.4. Mesure du tritium organiquement lié	220
7.5. Mesure du ¹⁴ C	220
7.6. Spectrométrie γ	221

Annexe 8. Expression des résultats et unités utilisées.....	221
Annexe 9. Radionucléides dans l'environnement	223
9.1. Radioactivité d'origine naturelle	223
9.2. Radioactivité d'origine artificielle	224
9.2.1. Retombées atmosphériques des essais militaires	225
9.2.2. Retombées dues aux accidents d'installations nucléaires	225
9.2.3. Effluents liquides et atmosphériques des CNPE en fonctionnement normal	225
9.2.4. Effluents liquides et atmosphériques d'autres installations.....	225
9.3. Sources de ³ H	226
9.4. Sources de ¹⁴ C	226
Annexe 10. Laboratoires d'analyses	227

ANNEXES

Comme pour toute expertise radioécologique de site reposant sur des résultats de mesures, le choix et la mise en place de la stratégie d'échantillonnage sont primordiaux. Il est nécessaire de choisir des lieux de prélèvement et des matrices capables de rendre compte d'un éventuel marquage de l'environnement par les radionucléides émis lors des rejets d'effluents liquides ou atmosphériques des installations étudiées.

Les bryophytes, les phanérogames aquatiques ou les algues sont utilisés comme indicateur des activités présentes dans les vecteurs de diffusion des rejets (air et eau). Les sols et sédiments sont des matrices d'accumulation des radionucléides. Pour répondre à des besoins de radioprotection, des produits végétaux (légumes-feuilles essentiellement) ou animaux consommables localement (poissons, mollusques, crustacés, lait de vache ou de chèvre) font l'objet d'une surveillance. Les eaux destinées à l'irrigation ou à la consommation sont également intégrées aux plans d'échantillonnage. Afin de rendre les études autour des CNPE français homogènes et d'établir si besoin des comparaisons, les plans d'échantillonnage sont établis de manière standardisée et, autant que possible, reproduits d'un site à l'autre. La figure 33 page 211 présente de manière schématique le plan d'échantillonnage avec notamment le type de matrices prélevées. Des prélèvements supplémentaires ou des prélèvements de matrices différentes peuvent être réalisés, en particulier dans le cadre des prescriptions techniques formulées par l'ASN, en matière de surveillance de l'environnement. La stratégie d'échantillonnages et d'analyses, fournie par EDF, est mise à jour annuellement par EDF en fonction du retour d'expérience et de l'évolution de la réglementation.

La localisation des prélèvements est définie en fonction du contexte géographique et environnemental de chaque site. Les prélèvements dans l'environnement terrestre sont répartis en fonction de la direction des vents, en distinguant notamment les zones potentiellement influencées par les rejets d'effluents atmosphériques des zones hors vents dominants. Dans l'environnement aquatique continental, on distingue les prélèvements effectués en amont ou en aval des points de rejets des effluents liquides des CNPE, en tenant compte de la présence possible d'une autre installation en amont sur le fleuve. Bien que souvent complexes à définir, les conditions hydrodynamiques locales sont également des facteurs importants à prendre en considération lors des choix des lieux de prélèvements en milieu marin.

La mesure gamma permet de quantifier les activités d'un large spectre de radionucléides naturels et artificiels. C'est la raison pour laquelle elle a été retenue lors des premiers suivis radioécologiques annuels. Une recherche spécifique de ^{131}I par spectrométrie gamma a été entreprise depuis 1997 sur quelques végétaux terrestres et aquatiques. Outre les mesures des niveaux d'activités des radionucléides émetteurs gamma, les activités en tritium libre (HTO) ont été quantifiées annuellement depuis l'année 2000. L'amélioration des limites de détection et des capacités métrologiques font que, depuis 2009, la quantification des activités en tritium organiquement lié (TOL) et carbone-14 (^{14}C) est introduite dans la stratégie d'étude.

Toutes les informations concernant l'identification, la localisation, puis les traitements et les mesures effectués sur les échantillons prélevés, sont enregistrées dans la base de données exploitée par l'IRSN. La traçabilité et la qualité des différentes opérations sont ainsi garanties et vérifiables. De plus, cela permet l'archivage et l'exploitation de séries chronologiques ou spatiales de données. Leur exhaustivité et leur homogénéité depuis 1991 permet leur utilisation à tout moment pour une expertise ou une étude particulière. Les étapes détaillées suivies par un échantillon depuis le prélèvement jusqu'à la mesure sont décrites dans « l'appendice méthodologique ».

L'exploitation des résultats repose sur la connaissance nécessaire des différentes sources de radioactivité gamma, tritium et ^{14}C dans l'environnement.

Sur le territoire français métropolitain, des radionucléides d'origine naturelle tellurique (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th et leurs descendants) ou cosmogénique (^3H , ^7Be et ^{14}C) ainsi que des radionucléides d'origine artificielle (^{137}Cs) sont présents dans l'environnement terrestre. Les activités en radionucléides naturellement présents (^3H , ^{14}C) peuvent être augmentées par les rejets d'effluents de l'industrie nucléaire ou les activités militaires. Les dépôts

globaux de ces radionucléides (^3H , ^{14}C et ^{137}Cs) sont liés aux retombées atmosphériques des essais aériens d'armes nucléaires pratiqués entre 1945 et 1980, et, pour le ^{137}Cs , au passage en mai 1986 du panache radioactif consécutif à l'accident de Tchernobyl. Les retombées de l'accident de Fukushima Daiichi ont été décelées ponctuellement et à l'état de trace, en France, essentiellement en 2011 et jusqu'en 2013.

Localement, les rejets d'effluents effectués par les installations peuvent conduire à un marquage de certains compartiments de l'environnement en radionucléides artificiels. Les radionucléides émetteurs gamma présents dans les effluents radioactifs peuvent être des produits d'activation neutronique ou des produits de fission. Dans les CNPE, ^{14}C , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ et ^{124}Sb sont par exemple générés par l'activation des matériaux de structure des installations ; ^{134}Cs , ^{137}Cs , et ^{131}I , sont des produits de fission. Le ^3H provient principalement de l'activation neutronique du bore contenu dans le circuit primaire. Il est cependant important de tenir compte des possibles influences liées aux rejets de ces mêmes radionucléides par d'autres installations. Cela concerne par exemple les rejets d'effluents liquides des centres hospitaliers (rejets de ^{131}I). L'industrie horlogère en France et en Suisse a utilisé du tritium jusque dans les années 1990. Les résidus sont encore présents dans le Rhône et le Rhin aujourd'hui. Des centres d'études ou de recherche (CEA, instituts, CERN, etc.) contribuent au marquage des écosystèmes aquatiques. Par exemple, les eaux du Rhin, au niveau du CNPE de Fessenheim, peuvent apporter des radionucléides rejetés par les sites nucléaires suisses situés en amont. Les rejets des installations d'ORANO La Hague en Manche sont en partie responsables d'un marquage de l'environnement marin à proximité des CNPE de Flamanville, Paluel, Penly et Gravelines. Les rejets atmosphériques des installations d'ORANO à Marcoule contribuent au marquage de la partie sud de la zone d'étude autour du Tricastin.

L'identification de radionucléides « traceurs » des rejets des différentes installations permet de rechercher les contributions des différentes sources de rejet au marquage de l'environnement. Les produits d'activation hormis les ^3H et ^{14}C (^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$) sont caractéristiques de rejets issus d'activité nucléaire. Leur présence dans les matrices de l'environnement traduit donc un marquage par des rejets d'effluents locaux. Pour déterminer les marquages éventuels en ^3H et ^{14}C , il est indispensable d'avoir une référence hors influence.

L'ensemble des techniques utilisées est décrit dans les documents de l'Assurance de la Qualité de l'IRSN. Les principales d'entre elles sont résumées ci-après.

En début de ce chapitre, il paraît nécessaire de donner la définition du terme de bio-indicateur. Blandin [33] donnait du bio-indicateur la définition suivante : « Un indicateur biologique (ou bio-indicateur) est un organisme ou un ensemble d'organismes qui - par référence à des variables biochimiques, cytologiques, physiologiques, éthologiques ou écologiques - permet, de façon pratique et sûre, de caractériser l'état d'un écosystème ou d'un écosystème et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications, naturelles ou provoquées ».

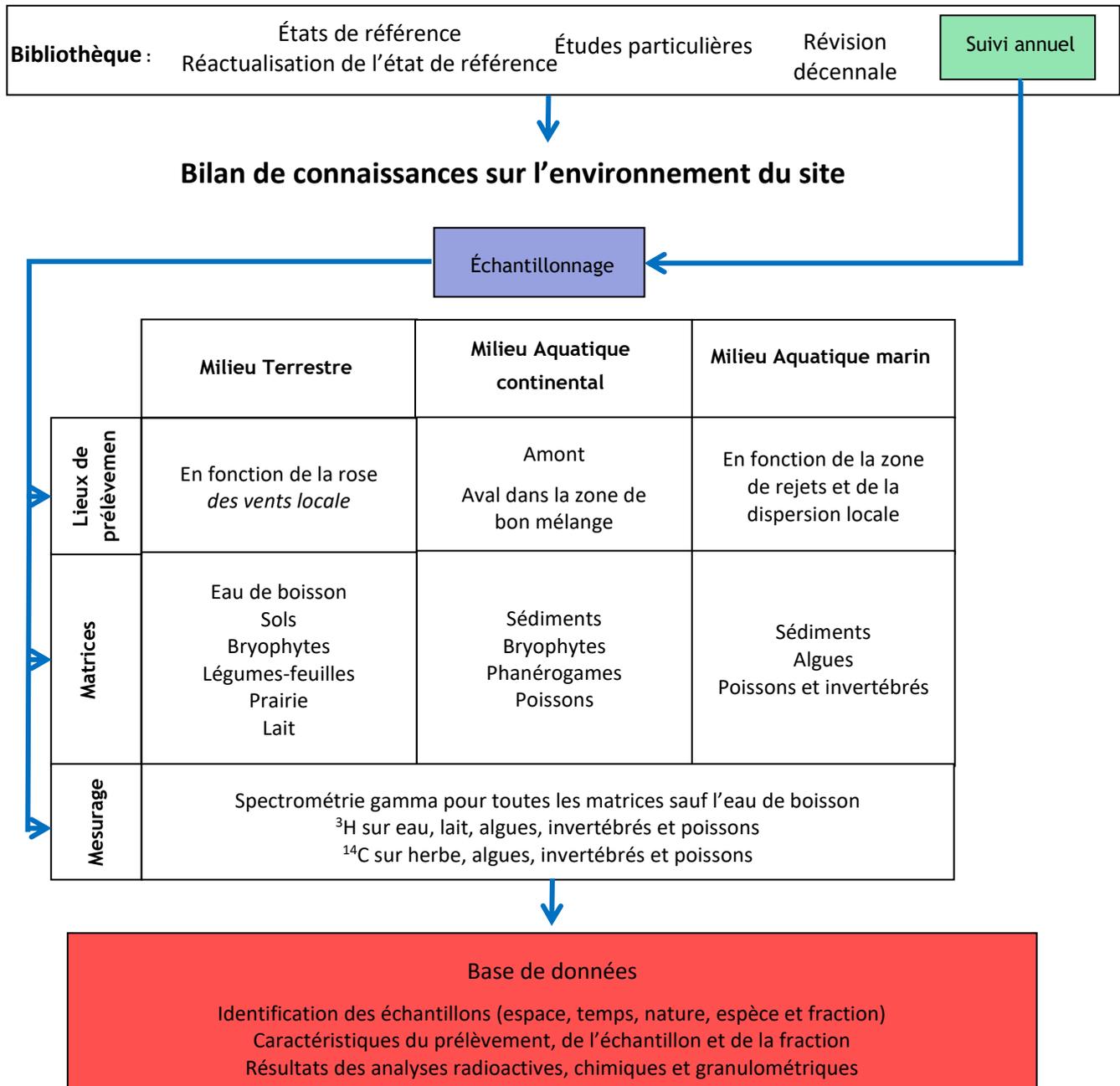


Figure 33 - Démarche utilisée pour la réalisation du suivi radioécologique annuel de chaque site.

Annexe 1. Choix des stations de prélèvements

La localisation des stations de prélèvements suit les demandes EDF exprimées dans le cahier des charges du marché.

Annexe 2. Choix des matrices prélevées

Comme indiqué dans le cahier des charges, « EDF a défini une stratégie de surveillance basée sur la complémentarité des mesures réglementaires et des études radioécologiques d'expertise. Cette stratégie se traduit par un plan de prélèvements et d'analyses tenant compte de nombreux paramètres de façon à obtenir des résultats aussi représentatifs que possible du milieu étudié. Cette représentativité porte sur :

- les échantillons prélevés, dont la représentativité dépend notamment du radionucléide recherché, de la disponibilité dans l'environnement de la matrice échantillonnée, de la fréquence de prélèvement, de la zone de prélèvement, des méthodes de prélèvement et de conservation de l'échantillon...
- les mesures réalisées, dont la représentativité dépend des traitements subis par l'échantillon, du protocole et des contraintes analytiques, de l'appareillage utilisé...

Le choix du type de matrices échantillonnées (bioindicateurs, compartiments d'accumulation, produits de consommation, vecteurs de la radioactivité...) et de la fréquence d'échantillonnage impose des zones de prélèvements dans lesquelles une matrice de ce type est présente et disponible en quantités suffisantes pour supporter la périodicité des prélèvements. Ce critère de disponibilité conditionne le choix d'une espèce en particulier, à laquelle des critères spécifiques en termes d'échantillonnage peuvent être associés, notamment des critères relatifs à la zone de prélèvement (ex. zone dégagée de tout obstacle).

Qu'il s'agisse du milieu terrestre ou des milieux aquatiques (dulçaquicoles ou marins), le choix des points de prélèvement est basé sur une prise d'échantillon double permettant de collecter une matrice, sous et hors influence potentielle des rejets d'effluents atmosphériques ou liquides de chaque installation, et ainsi disposer de valeurs permettant de mettre en évidence et de quantifier une éventuelle influence des rejets des installations. Les études de dispersion et de dilution dans le milieu des rejets d'effluents atmosphériques et liquides permettent d'identifier les zones sous influence potentielle et hors influence des rejets des sites.

Le choix d'une zone de prélèvement pour chaque matrice correspond donc au meilleur compromis possible permettant de répondre au mieux à l'ensemble de ces critères génériques et spécifiques. Une fois la zone de prélèvement déterminée, le choix des points de prélèvement doit tenir compte des aspects liés à la sécurité : les points retenus doivent être aisément accessibles et permettre les prélèvements en toute sécurité.

De plus, le choix des stations de prélèvements est effectué sur la base du retour d'expérience acquis dans le cadre de la surveillance radioécologique des sites et dans l'objectif de pouvoir comparer les résultats obtenus sur le long terme. Ainsi, dans la mesure du possible, les prélèvements seront réalisés aux mêmes points de prélèvements et aux mêmes périodes d'une année sur l'autre de manière à assurer une continuité géographique et temporelle. »

2.1. Domaine terrestre

2.1.1. Les eaux

Les prélèvements sont réalisés préférentiellement dans les réseaux de distribution d'eau potable, sinon dans le réseau de distribution d'eau d'irrigation. Les radionucléides sont recherchés dans la phase dissoute.

2.1.2. Les bryophytes

Les bryophytes terrestres constituent d'excellents indicateurs des apports atmosphériques. En effet, ne disposant pas de racines, leur principale voie d'absorption est aérienne. Des processus actifs de conduction d'eau par capillarité et d'échanges d'ions par voie extracellulaire permettent aux mousses de piéger les éléments nécessaires à leur croissance. En plus de ce mode d'intégration actif, les phénomènes passifs d'accumulation des poussières atmosphériques par piégeage mécanique contribuent à concentrer la radioactivité du fait d'un important rapport surface/volume. Leur cycle de vie pluriannuel en fait un indicateur pertinent pour l'observation des apports atmosphériques à long terme.

2.1.3. Les sols

On distingue les sols cultivés pour lesquels des labours sont réalisés des sols non cultivés sur lesquels les cultures pluriannuelles ne demandent aucun remaniement (pâturages). Les sols non cultivés sont des intégrateurs pluriannuels des retombées atmosphériques. N'ayant pas subi de labourage récent, les radionucléides déposés à leur surface ne sont pas dilués dans la couche de labour.

2.1.4. L'herbe

Les prairies naturelles, non cultivées, sont privilégiées afin de rendre compte des transferts de radionucléides à partir d'un sol non remanié depuis plusieurs décennies. La mesure dans l'herbe permet d'évaluer l'activité des radionucléides déposés par voie atmosphérique au cours du cycle végétatif de la prairie échantillonnée (quelques mois) et ceux incorporés par voie racinaire.

2.1.5. Les végétaux cultivés

Parmi les végétaux cultivés, les salades sont privilégiées. Elles représentent la catégorie de légumes à feuilles, largement consommée. Seules les parties aériennes, sans contact avec le sol, sont échantillonnées. Leur grande surface d'interception en fait d'assez bons indicateurs des retombées atmosphériques de l'année.

2.1.6. Le lait

Les mesures dans le lait permettent de disposer d'échantillons intéressants en matière de radioprotection. La mesure du lait est pertinente pour rendre compte d'un éventuel marquage par les retombées atmosphériques, même très faibles, du fait des grandes surfaces d'herbe consommées pour produire ce lait. En effet la surface d'herbe consommée par une vache pour produire 1 litre de lait est nettement supérieure à la surface d'un prélèvement d'herbe.

2.2. Domaine aquatique marin

2.2.1. Les sédiments

Les sédiments de surface intègrent les dernières phases de dépôt du système aquatique et les résultats de mesures sont donc représentatifs des activités rejetées au cours des derniers mois. D'une manière générale, plus les particules sont fines plus elles développent, à masse identique, une surface d'échange importante susceptible de retenir des radionucléides tels que les produits de fission ou d'activation. Les zones de sédimentation des particules fines sont privilégiées, dans la mesure du possible, afin d'optimiser la détection des radionucléides. Les analyses portent sur la fraction inférieure à 2 mm.

2.2.2. Les algues

Les macroalgues peuvent concentrer jusqu'à 10 000 fois les radionucléides dissous dans l'eau de mer [21]. Les algues brunes du genre *Fucus* sont parmi les meilleurs bioindicateurs de la diversité et des niveaux d'activité des

radionucléides naturels et artificiels en milieu marin. Des échantillons de Fucus de la même espèce, dans la mesure du possible, ont été collectés manuellement et rincés sur place dans l'eau de mer pour éliminer d'éventuelles particules sédimentaires, ainsi que la majeure partie de l'épiflore et de l'épifaune.

2.2.3. Les poissons, mollusques et crustacés

Seule la partie consommée est analysée dans la majeure partie des cas. Cette fraction est en outre représentative des radionucléides assimilés.

Annexe 3. Choix des fréquences d'analyses

La fréquence des analyses suit les demandes EDF exprimées dans le cahier des charges du marché. Dans le rapport du suivi radioécologique annuel sont exploités les résultats d'analyses sur les prélèvements collectés annuellement et spécifiquement pour le suivi radioécologique annuel. En complément, sont intégrés des résultats d'analyses acquis par l'IRSN pour EDF dans le cadre de la réglementation. Il s'agit en particulier des analyses de ^{14}C sur les végétaux collectés trimestriellement sous les vents des CNPE.

Annexe 4. Choix des analyses

Les analyses réalisées suivent les demandes EDF exprimées dans le cahier des charges du marché. Elles portent sur les radionucléides les plus rejetés par les CNPE : tritium, ^{14}C , produits d'activation ou de fission présents dans les rejets d'effluents liquides (émetteurs gamma comme les ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{63}Ni , $^{123\text{m}}\text{Te}$, ^{124}Sb , ^{125}Sb , ^{134}Cs ou ^{137}Cs) ou atmosphériques (émetteurs gamma comme les ^{58}Co , ^{60}Co , ^{134}Cs ou ^{137}Cs). Les rejets atmosphériques comprennent aussi des gaz rares et des iodes.

Annexe 5. Méthode de prélèvements sur le terrain

5.1. Domaine terrestre

5.1.1. Eaux (eau de boisson, eau de nappe)

La réalisation d'une spectrométrie gamma nécessite la collecte de 90 litres d'eau, stockés en bidons plastiques référencés, et acidifiés à l'acide nitrique molaire à raison de 1 mL par litre. Cette acidification est destinée à éviter le développement des micro-algues et à limiter la fixation de radionucléides sur les parois des récipients. La mesure du tritium nécessite la collecte de 80 mL d'eau filtrée à 0,22 μm puis répartie dans deux flacons en verre fermés hermétiquement. Tous les prélèvements d'eau de boisson sont réalisés après avoir fait couler de l'eau durant plusieurs minutes afin de purger la canalisation. Les eaux de nappe sont prélevées à l'aide de pompes pour piézomètres. Ces échantillons sont conservés au frais jusqu'à leur envoi au service de métrologie.

5.1.2. Sols

Les sols non caillouteux sont prélevés avec une tarière racinaire de 8 cm de diamètre.

Pour les sols cultivés, le prélèvement est effectué sur une profondeur de 20 cm. Dans le cas des sols non cultivés, le prélèvement est réalisé dans l'horizon superficiel entre 0 et 5 cm ; dans le cas des bilans radioécologiques décennaux, trois prélèvements sont effectués entre 0-5 cm, 5-15 cm et 15-30 cm.

Plusieurs points de prélèvement proches les uns des autres sont réalisés afin d'obtenir un échantillon de 2 à 3 kg qui est placé dans un sac plastique, préalablement référencé.

5.1.3. Végétaux

La quantité de végétal (ou de fraction de végétal) à prélever est déterminée en fonction du rapport de poids frais / poids sec de l'échantillon (estimé a priori) et de la quantité nécessaire pour faire la mesure. L'échantillon est récolté à la main ou à l'aide d'outils tranchants, puis placé dans un sac plastique préalablement référencé et immédiatement fermé. Si l'échantillon doit être soumis à un mesurage du ^{14}C , il est immédiatement mis au frais.

5.1.4. Lait

Le lait est prélevé directement à la ferme, chez le producteur. Les 6 à 18 litres nécessaires pour la réalisation d'une spectrométrie gamma, sont stockés dans des flacons référencés. Pour le mesurage du ^3H libre, lié et ^{14}C 1 à 2 litre est conservé au frais.

5.2. Domaine aquatique marin

5.2.1. Sédiments

Les sédiments marins sont prélevés soit avec une pelle à marée basse, soit au cône de Berthois pour les vases de port. Les stations de prélèvement sont choisies en fonction de la sédimentologie propre à chaque site, dans la mesure du possible dans les zones de sédiments les plus fins. Environ 5 kg de sédiments sont prélevés, conditionnés en double sac plastique, référencés puis acheminés et conservés en chambre froide à 4°C en attente du traitement.

5.2.2. Végétaux

Les algues sont prélevées à la main dans la zone de balancement des marées. Après avoir localisé les différentes espèces d'algues présentes, un prélèvement de 5 à 10 kg est effectué sur trois à cinq points dans une population algale monospécifique. Ceci permet d'obtenir un échantillon intégrant les variations des activités des divers radionucléides en fonction de l'étagement. Les algues sont débarrassées de la faune et de la flore épiphytes et lavées dans une mare d'eau de mer ou directement dans la mer, selon la configuration du site. Après étiquetage, les sacs d'algues sont acheminés et conservés en chambre froide à 4°C en attente du traitement.

5.2.3. Poissons, crustacés, mollusques

Les pêches sont réalisées selon les techniques locales propres à chaque site et en fonction des espèces. En général, les poissons et les crevettes sont prélevés au filet, les crustacés au casier (tourteaux, homards) ou à la nasse. Les mollusques sont soit prélevés sur l'estran à la main (moules, patelles), soit au large au casier (bulots) ou à la drague. 5 à 20 kg de produits frais sont prélevés et congelés avant préparation. Chaque lot de poissons ou de crustacés est constitué, dans la mesure du possible, d'individus de même taille et de poids similaire.

Les pêches sont réalisées en fonction de la présence des espèces, dans un rayon de 5 à 40 km autour du site. La pêche en mer, souvent aléatoire, ne permet pas, notamment pour les poissons, de garantir des prises de chaque espèce, chaque année.

Les supports logistiques des laboratoires maritimes ou des pêcheurs locaux sont sollicités pour réaliser certains prélèvements. Après étiquetage, les échantillons sont acheminés et conservés en congélateur avant traitement.

Annexe 6. Préparation et conditionnement des échantillons

6.1. Domaine terrestre

6.1.1. Eau de boisson

6.1.1.1. Mesurage des émetteurs gamma

Pour le mesurage des émetteurs gamma, chaque échantillon de 90 litres environ est ramené à un volume de 500 mL par évaporation à 70 °C. L'échantillon concentré est transvasé dans un conteneur pour échantillons liquides (SG500), équivalent de la géométrie 380 mL. Il est alors expédié au laboratoire de métrologie de l'IRSN.

6.1.1.2. Mesurage du tritium

La préparation pour le mesurage du ^3H se fait sur le terrain par filtration sur filtre plan de porosité 0,22 μm de deux échantillons de 40 ml, puis expédiés au laboratoire de métrologie dans des sachets aluminés sous vide.

6.1.2. Sols

Après émottage et quartage, 300 g environ sont séchés à l'étuve à une température inférieure à 40 °C, placés dans un sachet, référencés et expédiés, pour l'analyse granulométrique et la détermination de la teneur en matière organique, à la Société du Canal de Provence ou à l'INRA d'Arras. En ce qui concerne les analyses par spectrométrie gamma, 1,5 kg d'échantillon est séché et tamisé à 2 mm. 350 à 500 g de la fraction de terre fine (< 2 mm) ainsi séparés sont broyés puis conditionnés dans une boîte cylindrique en matière plastique (géométrie solide 380 mL), dont les dimensions sont spécifiques aux comptages en spectrométrie γ . Référencée, cette boîte est expédiée au laboratoire de métrologie de l'IRSN.

6.1.3. Végétaux

6.1.3.1. Mesurage des émetteurs gamma

De retour au laboratoire, les échantillons sont immédiatement nettoyés et pesés frais. Ils sont ensuite placés en étuve à moins de 105 °C jusqu'à dessiccation complète (24 à 48 h). Le poids sec de l'échantillon est noté, puis le résidu sec est mis au four. La montée en température s'effectue par paliers successifs afin d'éviter l'inflammation des échantillons (Figure 34 page 217). À la sortie du four, les cendres sont pesées puis broyées jusqu'à obtention d'une poudre, afin de concentrer le maximum de matière dans le minimum de volume. Le conditionnement est réalisé dans des boîtes en matière plastique (géométries) de 17 mL ou de 60 mL, référencées. Le poids du contenu est noté puis la géométrie est expédiée au service de métrologie de l'IRSN afin d'effectuer une spectrométrie γ . Le rapport poids frais / poids sec est déterminé sur chaque aliquote de façon à exprimer l'ensemble des résultats dans la même unité ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{sec}$).

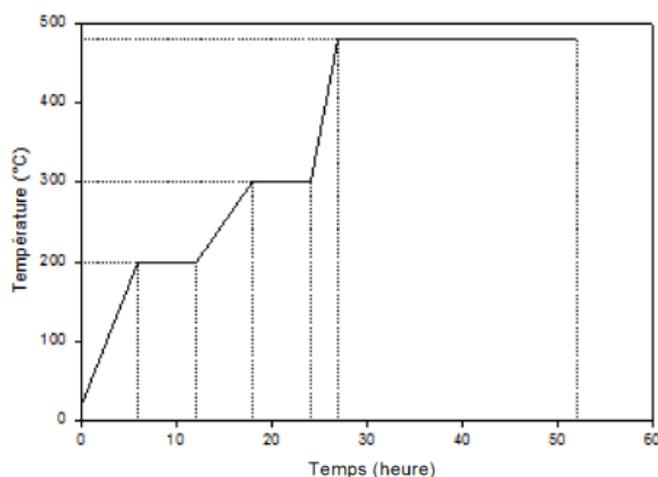


Figure 34 - Chronique d'une incinération : montée en température et paliers en fonction du temps.

Les analyses destinées à la mesure de l'¹³¹I sont effectuées rapidement, idéalement dans les 8 jours qui suivent le prélèvement. Les échantillons peuvent être mesurés frais (mousses, herbe) ou sec (lait).

6.1.3.2. Mesurage du tritium et du ¹⁴C

L'aliquote mise au frais sur le terrain est immédiatement lyophilisée ou à défaut entreposée au congélateur. Le rapport de poids est calculé et noté, pour s'assurer de la qualité du traitement. Le conditionnement de la matière sèche est réalisé dans des sachets aluminisés sous vide. Le poids du contenu est noté puis la boîte référencée est expédiée au service de métrologie. L'eau de lyophilisation est filtrée sur filtre plan à 0,22 µm puis 40 mL sont conditionnés dans un flacon en verre brun et expédiés au service de métrologie dans des sachets aluminisés sous vide.

6.1.4. Lait

6.1.4.1. Mesurage des émetteurs gamma

De retour au laboratoire, 6 à 18 litres de lait sont évaporés dans une étuve à moins de 105 °C. Le résidu sec est ensuite incinéré selon le protocole cité précédemment. À la sortie du four, les cendres sont pesées puis broyées jusqu'à obtention d'une poudre. Le conditionnement est réalisé dans des boîtes en plastique (géométries) de 17 mL ou de 60 mL. Le poids du contenu est noté puis la boîte référencée est expédiée au service de métrologie afin d'effectuer une spectrométrie γ.

6.1.4.2. Mesurage du tritium et du ¹⁴C

Un litre de lait est lyophilisé de manière à extraire l'eau contenue dans l'échantillon. L'extrait sec est destiné à mesurer le tritium organiquement lié et du ¹⁴C. Le conditionnement de la matière sèche est réalisé dans des sachets aluminisés sous vide. Le poids du contenu est noté puis la boîte référencée est expédiée au service de métrologie. L'eau de lyophilisation est filtrée sur filtre plan à 0,22 µm puis 40 mL sont conditionnés dans un flacon en verre brun et expédiés au service de métrologie dans des sachets aluminisés sous vide.

6.2. Domaine aquatique marin

6.2.1. Sédiments

Les sédiments sont émottés à la main et tamisés à 2 mm puis séchés à 40°C. La fraction supérieure à 2 mm est écartée. Une fraction est réservée pour la granulométrie et la détermination de la teneur en matière organique. Une géométrie de comptage de 380 mL est remplie pour effectuer une spectrométrie γ .

6.2.2. Végétaux

6.2.2.1. Mesurage des émetteurs gamma

Les algues sont triées et les thalles (appareil végétatif des végétaux inférieurs) présentant une épifaune et une épiflore sont éliminés. Pesées fraîches, elles sont séchées à moins de 105 °C jusqu'à poids constant et pesées sèches. Elles sont ensuite incinérées à 480 °C dans un four à moufle (cf. chronique d'une incinération, Figure 34 page 217). Les cendres sont pesées puis broyées. En fonction du volume de matières préparé, un conteneur 380 mL (sec) ou 60 ou 17 mL (cendres) est utilisé. Le protocole de préparation et de mesurage de ^{131}I pour les végétaux terrestres est appliqué sur une partie des algues. Référencées, ces boîtes sont expédiées au laboratoire de métrologie.

6.2.2.2. Mesurage du tritium et du ^{14}C

L'aliquote mise au frais sur le terrain est immédiatement lyophilisée ou à défaut entreposée au congélateur. Le rapport de poids est calculé et noté, pour s'assurer de la qualité du traitement. Le conditionnement de la matière sèche est réalisé dans des sachets aluminisés sous vide. Le poids du contenu est noté puis la boîte référencée est expédiée au service de métrologie. L'eau de lyophilisation est filtrée sur filtre plan à 0,22 μm puis 40 mL sont conditionnés dans un flacon en verre brun et expédiés au service de métrologie dans des sachets aluminés sous vide.

6.2.3. Poissons, crustacés, mollusques

6.2.3.1. Mesurage des émetteurs gamma

Les préparations consistent à séparer les parties comestibles des parties non comestibles. Pour les poissons, les filets (muscles) sont levés après décongélation éventuelle ; la tête, la peau, les viscères et les arêtes sont éliminées. Les chairs de certains crustacés (homards) sont disséquées, tandis que d'autres sont préparés entiers (crevettes et tourteaux). En effet, il n'est pas raisonnable de collecter suffisamment d'individus sur de petites zones de pêche pour permettre la réalisation des mesures sur les chairs. Pour les mollusques, l'ensemble des parties molles est retenu après séparation et élimination des coquilles. Les mêmes traitements que pour les végétaux (cf. ci-dessus) sont réalisés par la suite.

6.2.3.2. Mesurage du tritium et ^{14}C

Une aliquote est lyophilisée de manière à extraire l'eau contenue dans l'échantillon. L'extrait sec est destiné à mesurer le tritium organiquement lié et le ^{14}C . Le conditionnement de la matière sèche est réalisé dans des sachets aluminisés sous vide. Le poids du contenu est noté puis la boîte référencée est expédiée au laboratoire de métrologie. L'eau de lyophilisation est filtrée sur filtre plan à 0,22 μm puis 40 mL sont conditionnés dans un flacon en verre brun et expédiés au laboratoire de métrologie dans des sachets aluminés sous vide.

Annexe 7. Techniques d'analyses

7.1. Détermination de la teneur en matière organique et de la granulométrie des sols et des sédiments

Ces analyses sont réalisées par le Laboratoire d'Analyses des Eaux de la Société du Canal de Provence ou par le laboratoire d'analyse des sols de l'INRA d'Arras.

7.1.1. Teneur en matière organique

La matière organique des sédiments et des sols est dosée par calcination. Les échantillons, préalablement séchés à 105 ± 2 °C jusqu'à poids constant, sont calcinés dans un four à moufle porté progressivement jusqu'à une température de 480 °C. La perte de masse permet de connaître directement le pourcentage de matière organique.

7.1.2. Granulométrie

La technique d'analyse granulométrique consiste tout d'abord en une attaque de la matière organique par l'eau oxygénée à 20 volumes, qui permet d'éliminer ce liant des particules. Une agitation mécanique dans l'hexamétaphosphate de sodium va disperser les particules dans un flacon à sédimentation.

La séparation des argiles, limons fins et grossiers est réalisée au moyen de prélèvements de 20 ml de cette suspension, en se basant sur la loi de Stokes qui régit la sédimentation des particules dans un liquide à température constante. Des abaques permettent en effet de connaître la profondeur de sédimentation de chacune de ces fractions en un temps donné. Les aliquotes prélevées sont déposées dans des capsules et desséchées à 103 ± 2 °C jusqu'à poids constant.

Le fractionnement des sables se fait par la superposition de tamis de 200 μm et de 50 μm . Le sédiment est tamisé sous un jet d'eau pour éliminer les particules de diamètre inférieur à 50 μm .

7.2. Identification des espèces vivantes

Une fraction des échantillons de mousses prélevées est mise à sécher à l'air libre. Leur identification est réalisée selon le besoin. Notamment, les mousses aquatiques qui peuvent être identifiées par le Laboratoire AgroCampus Ouest de Rennes.

Les phanérogames terrestres, aquatiques et semi-aquatiques sont identifiées par nos soins.

La détermination des espèces de poissons est effectuée après capture, lors des mesures de biométrie, par un pêcheur professionnel.

7.3. Mesure du tritium libre

La mesure du tritium libre est réalisée par le service de métrologie de l'IRSN Orsay (Essonne).

Il est entendu par « tritium libre » le tritium de la molécule d'eau ou pouvant être recouvré sous forme d'eau par déshydratation d'un échantillon solide (eau interstitielle, eau tissulaire).

Les échantillons d'eau, excepté les eaux de lyophilisation, sont distillés à sec. Les échantillons solides frais sont lyophilisés à froid sous vide, permettant de séparer la fraction eau et la fraction sèche. Dans le cas des produits alcoolisés, une distillation partielle est effectuée sur la fraction liquide recueillie pour isoler l'eau de l'alcool.

7.4. Mesure du tritium organiquement lié

Deux méthodes sont utilisées, par scintillation ou par spectrométrie de masse. La mesure par spectrométrie de masse est privilégiée pour les échantillons à faible teneur en matière organique, notamment les sols et sédiments.

Par scintillation, l'échantillon déshydraté subit une combustion en flux d'oxygène et d'argon. Le système de combustion est constitué d'un tube de quartz glissé dans deux fours annulaires. Le premier four est réglable en température, de la température ambiante à 1000°C. Le second four est réglé à une température de 1000 °C. Les vapeurs d'eau de combustion sont récupérées en sortie de four par un piège froid. L'eau de combustion recueillie est distillée à sec.

Le tritium organiquement lié peut être également déterminé en mesurant par spectrométrie de masse, la quantité d'hélium 3 (^3He), descendant du tritium. L'échantillon est lyophilisé, puis conditionné dans un conteneur, garantissant une étanchéité totale. L'isolement est maintenu le temps nécessaire à la formation de la quantité d' ^3He nécessaire. Ce délai varie généralement entre 3 et 6 mois et dépend de la masse d'échantillon introduite, des performances du spectromètre de masse, de la quantité de tritium attendue et de l'incertitude souhaitée. A l'issue de la période de stockage, le conteneur est monté sur la ligne d'introduction du spectromètre de masse pour la mesure de l'hélium. L'activité en tritium est déterminée par calcul de décroissance.

Les mesures sont effectuées sur un spectromètre VG-3000 de chez Micromass.

7.5. Mesure du ^{14}C

Deux méthodes sont utilisées, par scintillation ou par spectrométrie de masse. La mesure par accélérateur est privilégiée sur les échantillons présentant un faible taux de matière organique, les sols et les sédiments notamment.

Avant la mesure par scintillation, le carbone des échantillons est oxydé en dioxyde de carbone dans une bombe à combustion. Le dioxyde de carbone est ensuite transformé en carbure de lithium, qui, par hydrolyse, donne de l'acétylène. Ce dernier est trimérisé en benzène. La multiplication par le rapport 78/72 de l'activité mesurée en benzène par scintillation permet d'exprimer l'activité en Bq.kg^{-1} de carbone.

Avant la mesure par spectrométrie, les sédiments et les sols à traiter sont totalement décarbonatés durant plusieurs jours dans de l'acide dilué, puis rincés à l'eau ultrapure jusqu'à un pH neutre. Les échantillons sont brûlés pendant 4 heures à 900 °C. La quantité de carbone contenu dans le gaz est mesurée. Le CO_2 obtenu est ensuite réduit par H_2 en présence de poudre de fer à 575°C. Le carbone se dépose sur la poudre de fer et le mélange est pressé dans une cible afin d'être mesuré.

L'activité en ^{14}C de l'échantillon est calculée en comparant les intensités mesurées séquentiellement des faisceaux de ^{14}C , ^{13}C et ^{12}C de chaque échantillon avec ceux de standards de CO_2 préparés à partir de l'acide oxalique de référence HOxI.

La mesure des rapports isotopiques $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et du carbone total s'effectuent sur un couplage d'un analyseur élémentaire relié à un spectromètre de masse isotopique par combustion totale du prélèvement analytique à 1050°C sous courant d'un mélange d'oxygène et d'hélium. Le carbone des échantillons est transformé en CO_2 et quantifié par des détecteurs spécifiques infrarouge CO_2 . Ces analyses sont réalisées par l'Institut des Science Analytique (CNRS) de Villeurbanne.

7.6. Spectrométrie γ

L'essentiel des mesures par spectrométrie γ est réalisé par le service de métrologie de l'IRSN accrédité COFRAC pour les matrices exploitées dans cette étude. La mesure de l' ^{131}I des échantillons collectés en Manche et mer du Nord est effectuée au laboratoire d'Octeville (LRC) de l'IRSN.

L'IRSN dispose d'installations de mesure spécifiques lui permettant de détecter et de quantifier les radionucléides naturels ou artificiels émetteurs γ dans des échantillons de très faibles niveaux de radioactivité comme c'est le cas des échantillons issus de l'environnement.

L'un des objectifs du service de métrologie est de détecter les niveaux de radioactivité les plus bas en jouant sur l'efficacité de la détection, le mouvement propre et le bruit de fond radioactif de l'installation. Un autre objectif est d'assurer que la qualité des résultats reste constante au cours du temps à l'aide d'un programme d'assurance qualité.

Afin de protéger les détecteurs du rayonnement cosmique secondaire, la salle de mesure blindée est en sous-sol, à 6 m de profondeur. Pour augmenter la protection contre ce type de rayonnement, sous-sol et rez-de-chaussée sont séparés par une dalle de béton de 3 m d'épaisseur. Le blindage de la salle est constitué d'un mur de 10 cm de plomb (115 tonnes de plomb) de faible radioactivité. Cependant, les rayonnements cosmiques induisent une fluorescence X du plomb qui fait apparaître des raies parasites jusqu'à 90 keV. Le mur de la salle blindée a donc été doublé d'une couche interne de 10 mm de cuivre électrolytique qui neutralise cette fluorescence X. De plus, les matériaux utilisés dans la chambre blindée, en particulier les aciers entrant dans les supports des détecteurs, ont été sélectionnés pour leurs faibles niveaux radioactifs. Ces précautions réduisent les sources de radioactivité liées à l'introduction du matériel de mesure. De même, des précautions sont prises pour limiter les effets des sources potentielles de radioactivité naturelle, tels les radionucléides appartenant aux familles radioactives de l'uranium et du thorium comme le ^{40}K , ou artificielles, comme les radionucléides issus des essais nucléaires aériens ou d'accidents nucléaires.

Les détecteurs sont de type Gamma-X Ge System, d'efficacité comprise entre 10 et 23 %, et d'une résolution de 850 eV à 100 keV. Les spectrométries sont réalisées dans la bande d'énergie allant de 20 keV à 3 MeV. La méthode de mesure (acquisition et traitement des spectres) est celle développée par la société Silena et utilisée dans les logiciels Emca Plus et Silgamma.

Annexe 8. Expression des résultats et unités utilisées

Les résultats d'analyse de radioactivité sont rapportés à la date de prélèvement.

Les activités en émetteurs gamma sont reportées en Bq.kg^{-1} de matière sèche pour les résultats dans la plupart des matrices, en Bq.kg^{-1} frais pour les poissons, mollusques et crustacés et en Bq.L^{-1} dans le lait et l'eau. Le ^{137}Cs , émetteur β^- , donne naissance avec un rendement de 94,6 % au $^{137\text{m}}\text{Ba}$ de période 2,55 minutes et avec un rendement de 5,4 % au ^{137}Ba , stable. Le $^{137\text{m}}\text{Ba}$ conduit au ^{137}Ba , avec émission gamma (rendement de 85 %). Dans le rapport, l'activité gamma mesurée du $^{137\text{m}}\text{Ba}$, sera reportée sous l'intitulé ^{137}Cs usuellement utilisé.

Les activités en tritium sont reportées en Bq.L^{-1} d'eau de cryodessiccation pour le tritium libre mesuré dans le lait et les poissons, en Bq.L^{-1} d'eau filtrée pour les résultats dans les prélèvements d'eau de boisson ou d'irrigation. Les activités en tritium organiquement lié sont reportées en Bq.L^{-1} d'eau de combustion et en Bq.kg^{-1} de matière sèche.

Les activités en ^{14}C sont reportées en Bq.kg^{-1} de carbone ainsi qu'en pMC (pourcentage de carbone moderne). Le pMC est calculé à partir du résultat en Bq.kg^{-1} de carbone (A ci-dessous) et du résultat de la mesure du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}$ ci-dessous) :

$$pMC = A \left\{ 1 - \frac{2 \times (25 + \delta^{13}\text{C})}{1000} \right\} \times \frac{100}{226}$$

d'après [34]

Chacun des résultats de mesure du ^{14}C en Bq.kg^{-1} de carbone (BqC ci-dessous) est assorti du résultat de la mesure du carbone total en g.kg^{-1} sec (C ci-dessous) pour permettre l'expression du résultat en Bq.kg^{-1} de matière sèche (BqS ci-dessous) :

$$\text{BqS} = \text{BqC} (C / 1000)$$

Dans les tableaux récapitulatifs concernant les données antérieures relatives à un site, une vision synthétique de l'ensemble des résultats disponibles est donnée par l'utilisation de leur gamme de variation. Ces tableaux comprennent les valeurs minimales et maximales mesurées pour chaque radionucléide décelé, ainsi que leur fréquence de détection (égale au nombre d'échantillons où le radionucléide est détecté de manière significative divisé par le nombre d'échantillons analysés). Lorsqu'aucune valeur significative n'a été obtenue, les données chiffrées sont remplacées par un tiret (-).

Dans les tableaux des résultats de l'année ainsi que dans le texte, les résultats sont accompagnés de l'incertitude statistique, calculée pour un intervalle de confiance de 95 %, et sont présentés dans les tableaux par : « valeur \pm incertitude » ($\pm 2 \sigma$). De 1996 à 2010, ces tableaux indiquaient, en outre, la Limite de Détection (LD) associée à la mesure des radionucléides non détectés. Depuis 2011, cette LD fait place au Seuil de Décision (SD = LD/2). En outre, le couple « valeur \pm incertitude » ainsi que les SD sont arrondis depuis 2011 selon les règles du Laboratoire National Henri Becquerel [35].

Les graphiques présentent les valeurs significatives (rond coloré) accompagnées de leurs incertitudes (barres verticales colorées hautes et basses) ou le seuil de décision (barre colorée depuis l'abscisse) dans le cas de valeurs non significatives (Figure ci-dessous).

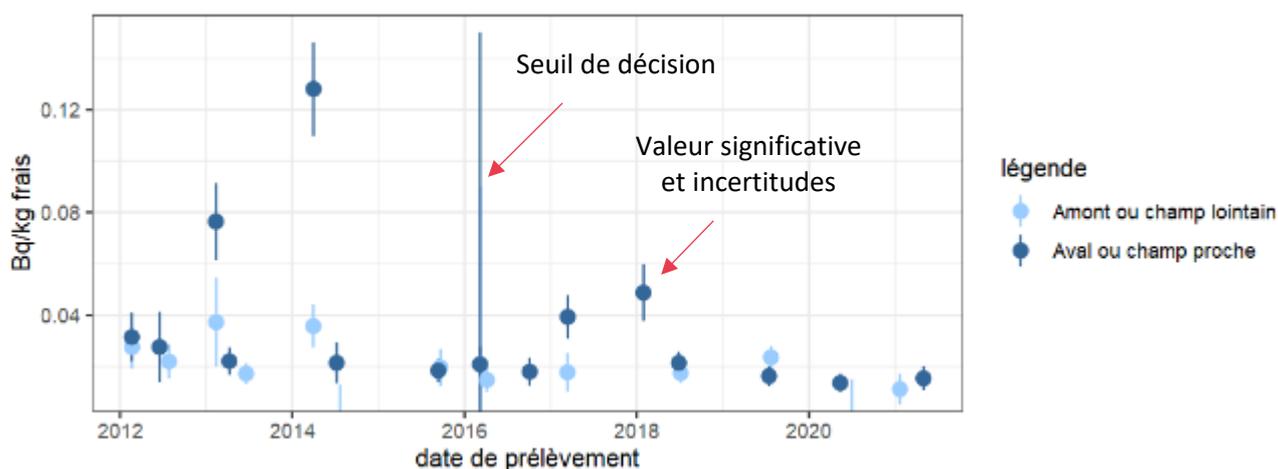


Figure 35 - Valeurs significatives et seuils de décision dans les graphiques.

Dans le milieu aquatique continental, les résultats de mesure du ^{137}Cs peuvent être normalisés par la granulométrie pour baisser la variabilité naturelle [36]. Ainsi les résultats de chacun des deux prélèvements en aval sont normalisés selon leur granulométrie pour être ramenés à la granulométrie du prélèvement en amont selon la formule :

$$^{137}\text{C}_{S_{ref}} = ^{137}\text{C}_{S_{meas}} \cdot \frac{(1.15 \pm 0.20) \cdot \text{CC}_{ref} + (0.43 \pm 0.16) \cdot \text{FSC}_{ref}}{(1.15 \pm 0.20) \cdot \text{CC}_{meas} + (0.43 \pm 0.16) \cdot \text{FSC}_{meas}}$$

Où :

$^{137}\text{C}_{S_{ref}}$ = activité massique en ^{137}Cs normalisée (une station aval dans ce document) ;

$^{137}\text{C}_{S_{meas}}$ = activité massique en ^{137}Cs mesurée (une station aval dans ce document) ;

CC_{ref} = teneur en argile du sédiment de référence (station amont dans ce document) ;

CC_{meas} = teneur en argile du sédiment mesuré ;

FSC_{ref} = teneur en limon fin du sédiment de référence (station amont dans ce document) ;

FSC_{meas} = teneur en limon fin du sédiment mesuré.

Cette équation ne doit être utilisée que si la teneur en matière organique est supérieure à 1 %.

Annexe 9. Radionucléides dans l'environnement

9.1. Radioactivité d'origine naturelle

La radioactivité naturelle est essentiellement due au ^{40}K , à la famille de ^{238}U comprenant 14 descendants, et à celle du ^{232}Th en comprenant 10. Le ^7Be est parfois détecté.

Dans le cas des deux familles du ^{232}Th et de ^{238}U , le mesurage est le plus souvent réalisé à l'aide de raies d'émission de plusieurs éléments fils de chacune de ces deux chaînes naturelles :

- pour la famille du ^{232}Th : ^{228}Ac , ^{212}Pb - ^{212}Bi - ^{208}Tl
- pour la famille de ^{238}U : ^{234}Pa , ^{234}Th , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb

En fonction de l'énergie d'émission, de l'activité dans l'échantillon et de l'éventuel déséquilibre au sein de la chaîne, le dosage ne s'effectue pas toujours sur les raies d'énergie du même élément fils.

Si les éléments fils du thorium et de l'uranium sont à l'équilibre avec l'élément père, et uniquement dans ce cas précis, alors la radioactivité naturelle peut être calculée selon la formule : $^{40}\text{K} + (14 \times ^{238}\text{U}) + (10 \times ^{232}\text{Th}) + ^7\text{Be}$. L'équilibre dans une chaîne de filiation peut ne pas être respecté en raison d'un apport supplémentaire d'origine naturelle (apport atmosphérique, métabolisme favorisant la concentration d'un élément donné chez les organismes vivants...) et/ou anthropique de l'un des éléments de la chaîne.

Les activités en radionucléides naturels dans les sols et sédiments métropolitains ont fait l'objet de publications dont un rapport IRSN [23].

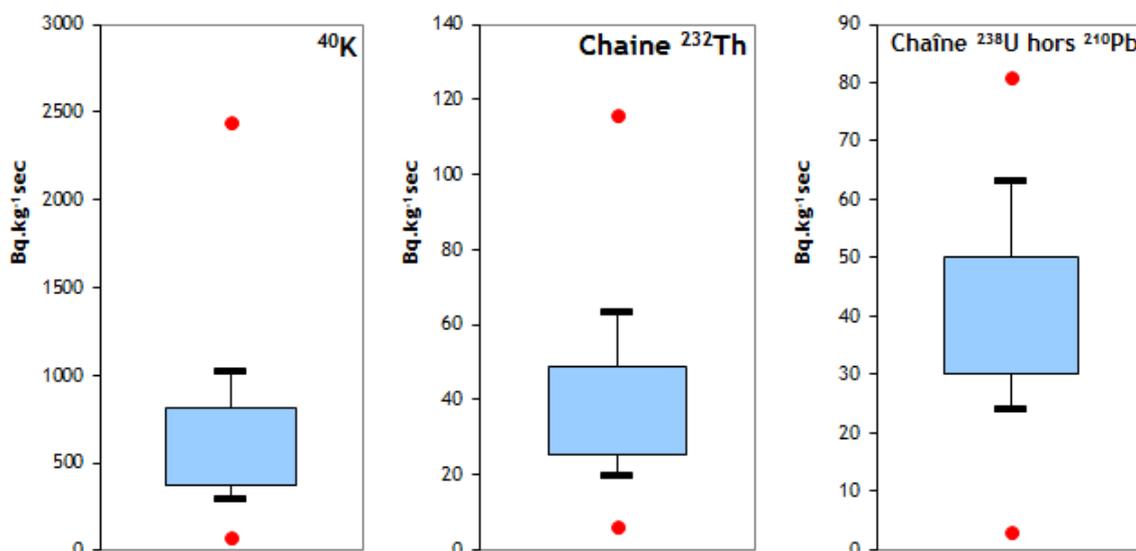


Figure 36 – Teneur en ^{40}K et en radionucléides des familles du ^{232}Th et du ^{238}U dans les sols métropolitains (1er et 3ème quartiles, 1er et 9ème déciles, minimum et maximum).

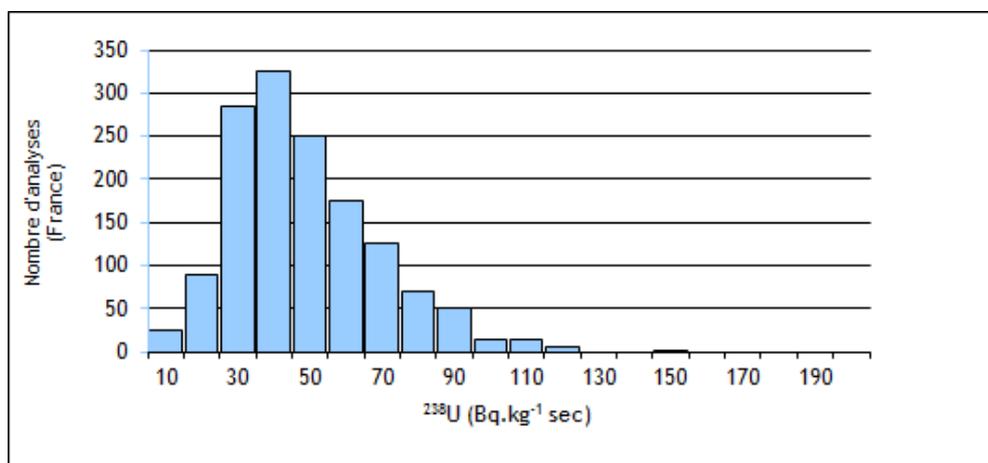


Figure 37 – Teneur en ^{238}U dans les sédiments métropolitains.

9.2. Radioactivité d'origine artificielle

La présence dans la biosphère de radio-isotopes artificiels résulte des apports anthropiques liés à l'utilisation militaire du combustible nucléaire, à son utilisation civile dans les installations nucléaires en fonctionnement normal et aux accidents qui se sont produits.

9.2.1. Retombées atmosphériques des essais militaires

Les essais nucléaires atmosphériques, qui se sont déroulés essentiellement de 1945 à 1962, ont libéré en majorité des produits de fission, tels que le ^{134}Cs , le ^{90}Sr et les radio-isotopes 238, 239 et 240 du plutonium. Les retombées ont conduit à un marquage chronique de l'environnement qui perdure depuis l'arrêt des essais américains et soviétiques en août 1963.

Jusqu'au 16 octobre 1980, la Chine a continué à effectuer des essais atmosphériques d'armes nucléaires à Lop Nor (40°N , 90°O). Les mesures réalisées consécutivement à ces tirs dans des échantillons d'air ou des échantillons biologiques ont montré la présence de $^{144}\text{Ce/Pr}$, ^{141}Ce , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{103}Ru , $^{106}\text{Ru/Rh}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb et ^{125}Sb [37].

9.2.2. Retombées dues aux accidents d'installations nucléaires

L'accident ayant entraîné l'émission radioactive quantitativement la plus importante est celui de Tchernobyl, survenu le 26 avril 1986. Cet accident a libéré dans l'atmosphère des radionucléides divers représentatifs du cœur du réacteur, dont les plus abondants sont les $^{134+137}\text{Cs}$, ^{131}I , le ^{132}Te , le ^{140}Ba et les $^{103+106}\text{Ru}$. La progression du nuage a conduit, surtout dans l'est et le sud-est de la France, à partir du 29 avril, à une montée nette de la radioactivité des aérosols. Les dépôts, essentiellement sous forme humide, ont affecté directement et par lessivage des sols, les bassins versants français, tout comme les écosystèmes aquatiques de l'est et du nord de l'Europe.

Les retombées de l'accident de Fukushima Daiichi survenu au Japon au cours de la seconde moitié du mois de mars 2011 ont occasionné en France des détections faibles et fugaces dans les matrices terrestres de ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I et ^{132}Te . Le rapport $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ est proche de 1 [19]. Il semblerait que les retombées en France aient été assez homogènes, sans fluctuations spatiales ou temporelles.

9.2.3. Effluents liquides et atmosphériques des CNPE en fonctionnement normal

L'exploitation d'un réacteur électronucléaire implique la génération d'isotopes stables et radioactifs issus de la fission des noyaux du combustible (produits de fission), et de l'activation des différents matériaux de structure (produits d'activation). Après traitement, contrôle et dilution, les effluents liquides faiblement radioactifs sont rejetés dans les cours d'eau ou la mer conformément à la législation en vigueur.

Globalement, les principaux radionucléides émetteurs γ émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal sont : ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{123\text{m}}\text{Te}$, ^{124}Sb , ^{125}Sb , ^{131}I , ^{54}Mn , ^{134}Cs et ^{137}Cs . Dans l'ensemble, parmi ces dix radionucléides, les réacteurs à eau pressurisée rejettent principalement les ^{58}Co , ^{60}Co et $^{110\text{m}}\text{Ag}$. Les quantités rejetées au cours des années 90 ont diminué d'environ un facteur dix. Cependant, la composition des effluents liquides est variable d'un CNPE à l'autre, en fonction de sa conception, de son mode d'exploitation, de son âge et de l'historique d'exploitation de la tranche.

Les effluents atmosphériques radioactifs sont rejetés dans l'environnement, après traitement des effluents atmosphériques hydrogénés et stockage durant trente jours au minimum.

9.2.4. Effluents liquides et atmosphériques d'autres installations

Des centres d'études, des centres militaires ainsi que des centres de traitements ou de stockage du combustible utilisé peuvent occasionner des marquages avec des signatures plus ou moins proches de celui des CNPE.

Les services de médecine nucléaire rejettent du ^{131}I dans les cours d'eau, au travers des stations d'épuration des agglomérations sur lesquelles ils sont implantés.

9.3. Sources de ^3H

En dehors des rejets de ^3H liquides et dans l'atmosphère par les CNPE, le ^3H est déjà présent dans l'environnement. Sur l'ensemble du globe, la plus grande part provient très majoritairement des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Localement, les sites CEA de Marcoule, ORANO La-Hague, Saclay, Bruyères-le-Châtel et Valduc sont aussi à l'origine d'un net marquage de l'environnement. Les résidus de l'industrie horlogère peuvent augmenter sensiblement les niveaux de radioactivité des systèmes aquatiques.

Avant l'ère nucléaire, les valeurs en ^3H de l'eau de pluie étaient inférieures à 2 Bq.L^{-1} . Le ^3H a été massivement produit lors des essais atmosphériques d'armes nucléaires. De plus de 500 Bq.L^{-1} dans l'eau de pluie dans les années soixante, l'activité volumique à proximité de la zone d'étude est descendue à 10 Bq.L^{-1} en 1980 après le dernier essai aérien. Aujourd'hui, l'activité volumique de l'eau de pluie est inférieure à 2 Bq.L^{-1} .

9.4. Sources de ^{14}C

En dehors des rejets autorisés de ^{14}C liquides et atmosphériques par les CNPE, le ^{14}C est déjà présent dans l'environnement.

Les essais atmosphériques d'armes nucléaires ont massivement apporté du ^{14}C dans l'atmosphère. L'activité spécifique atmosphérique en ^{14}C est montée jusqu'à 400 Bq.kg^{-1} de carbone. Depuis, l'activité moyenne atmosphérique a décru. Elle est, en 2022, de $222 \pm 7 \text{ Bq.kg}^{-1}$ de C [3].

Annexe 10. Laboratoires d'analyses

ANALYSES	LABORATOIRE
Radionucléides émetteurs alpha Radionucléides émetteurs gamma (+ Iode-129) Strontium-90 Carbone-14 (méthode benzène) Tritium libre et lié Technétium-99 Nickel-63	IRSN/PSE-ENV/SAME Laboratoire de Métrologie de la Radioactivité dans l'Environnement (LMRE) Le bois des Rames - Bâtiment 501 91400 Orsay
Carbone-14 (méthode benzène) Fer-55	IRSN/PSE-ENV/SAME Laboratoire de Mesures Nucléaires (LMN) 31 rue de l'écluse 78116 Le Vésinet
Carbone-14 (méthode AMS)	Laboratoire de mesure du carbone-14 Bâtiment 450 porte 4E CEA Saclay 91191 Gif-sur-Yvette Cedex Isotopech Zrt. P.O. Box 390 Debrecen, H-4001 Hongrie
Iode-131	IRSN/PSE-ENV/SRTE Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville (LRC) Rue Max-Pol Fouchet – BP 10 – Cherbourg-Octeville 50130 Cherbourg-en-Cotentin
Iode-127 Calcium Carbone et rapport ¹³C/¹²C Hydrogène	Centre National de la Recherche Scientifique Service central d'analyses 5 rue de la Doua 69100 Villeurbanne
Granulométrie 5 fractions Teneurs en matière organique, calcium et aluminium Capacité d'échange cationique	Institut national de la recherche agronomique Laboratoire d'analyse des sols d'Arras (LAS) 273 rue de Cambrai 62000 Arras