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

# PALUEL

**2021**

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 2021* ____ *4*

I. Contexte ____ 4

II. Le CNPE de Paluel ____ 4

III. Modifications apportées au voisinage du CNPE de Paluel ____ 6

IV. Évolutions scientifiques susceptibles de modifier l'étude d'impact ____ 6

V. Bilan des incidents de fonctionnement et des évènements significatifs pour l'environnement ____ 6

*Partie II - Prélèvements d'eau* ____ *8*

I. Prélèvement d'eau destinée au refroidissement ____ 10

II. Prélèvement d'eau destinée à l'usage industriel ____ 10

III. Prélèvement d'eau destinée à l'usage domestique ____ 11

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 ____ 24

III. Rejets thermiques ____ 42

*Partie VI - Surveillance de l'environnement* ____ *45*

I. Surveillance de la radioactivité dans l'environnement ____ 45

II. Physico-chimie des eaux souterraines ____ 52

III. Chimie et physico-chimie des eaux de surface ____ 53

IV. Surveillance écologique et halieutique ____ 54

V. Acoustique environnementale ____ 59

*Partie VII - Évaluation de l'impact environnemental et sanitaire des rejets de l'installation_ 60*

*Partie VIII - Gestion des déchets_____ 64*

I. Les déchets radioactifs_____ 64

II. Les déchets non radioactifs _____ 68

*ABREVIATIONS _____ 70*

*ANNEXE 1 : Suivi radioécologique annuel du CNPE de Paluel Année 2020 _____ 71*

# Partie I - Le Centre Nucléaire de Production d'Electricité de Paluel en 2021

## 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 2021 du CNPE de Paluel en matière d'environnement.

## II. Le CNPE de Paluel

Située en bordure du littoral du 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 valleuse 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 1 365 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 : 1er décembre 1985
- Réacteur 2 : 1er décembre 1985
- Réacteur 3 : 1er février 1986
- Réacteur 4 : 1er 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 2021, la centrale nucléaire de Paluel a produit 30,36 TWh de la production nucléaire française tout en menant à bien la maintenance annuelle de ses installations.

**Localisation du site :**

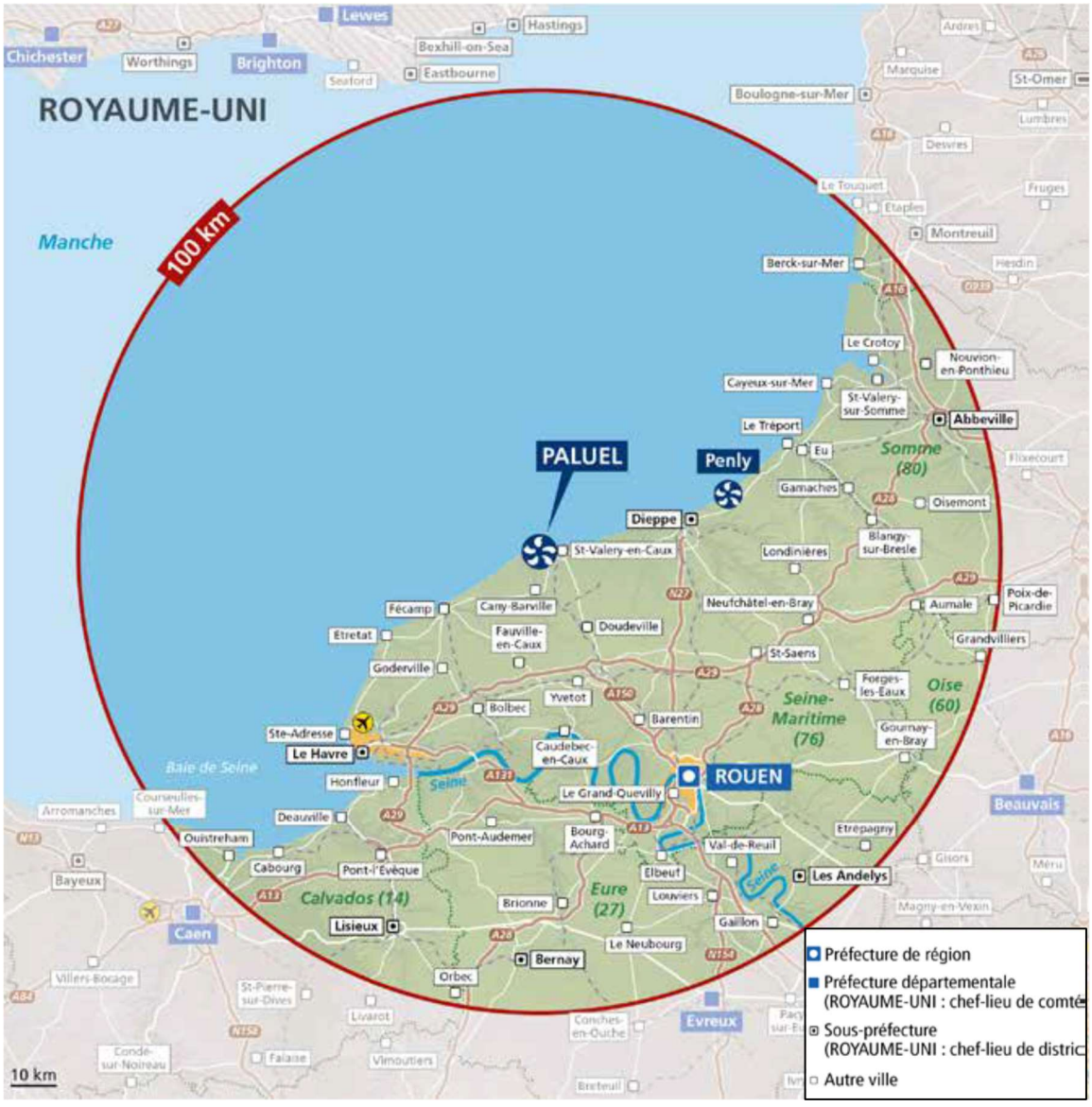



**Figure 1 : Implantation du CNPE de Paluel**

## III. Modifications apportées au voisinage du CNPE de Paluel

La surveillance de l'environnement industriel est réalisée en application d'une prescription interne d'EDF. Lors de l'année 2021, aucune modification notable au voisinage du CNPE de Paluel n'a été identifiée.

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

Pour l'année 2021, aucune évolution scientifique susceptible de modifier les conclusions de l'étude d'impact n'a eu lieu.

## 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 2021.

| Typologie | Date de déclaration | Description de l'évènement | Principales actions correctives |
|---|---|---|---|
| ESE 6 | 29/04/2021 | Cumul annuel d'émission de gaz frigorigènes supérieur à 100 kg en 2021 | Poursuite du développement de nouvelles garnitures mécaniques afin de remplacer les garnitures actuelles. |
| ESE 7 | 28/05/2021 | Remise en cause des modalités de gestion des boues de la station d'épuration | Classement temporaire de la station d'épuration en zone à production possible de déchets nucléaires. |

## 2. Bilan des incidents de fonctionnement

Le CNPE de Paluel a rencontré, durant l'année 2021, des indisponibilités fortuites de certains matériels de prélèvement d'effluents liquides ou gazeux (KRT ou KRS). Ces indisponibilités n'ont pas eu d'incidence sur la qualité de la surveillance environnementale compte tenu de la redondance de nos matériels, de la remise en état rapide des matériels et de la mise en œuvre de moyens palliatifs durant le délai de réparation des matériels.

# 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 :
    - 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 $m^3$ 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.

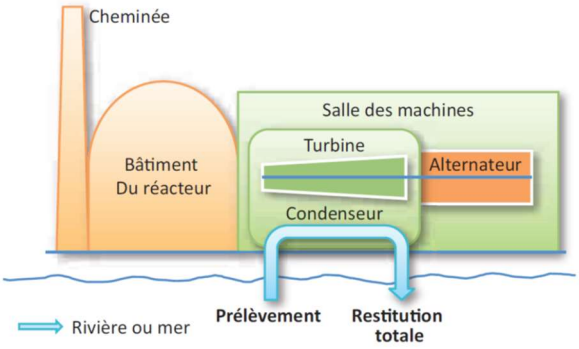



**Figure 2 : Schéma d'un CNPE avec un circuit de refroidissement ouvert (Source : EDF)**

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. Plus précisément, quasiment 100% de l'eau prélevée est restituée à la mer pour les installations en circuit ouvert.

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 elles sont implantées.

## I. Prélèvement d'eau destinée au refroidissement

Le tableau ci-dessous détaille le cumul mensuel du prélèvement **d'eau de mer (Manche)** destinée au refroidissement de l'année 2021.

| | Prélèvement d'eau (en millions de $m^3$) |
|---|---|
| **Janvier** | 408 |
| **Février** | 352 |
| **Mars** | 469 |
| **Avril** | 370 |
| **Mai** | 353 |
| **Juin** | 341 |
| **Juillet** | 347 |
| **Août** | 431 |
| **Septembre** | 441 |
| **Octobre** | 471 |
| **Novembre** | 371 |
| **Décembre** | 419 |
| **TOTAL** | 4 774 |

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

Le tableau ci-dessous détaille le cumul mensuel du prélèvement **d'eau du fleuve Durdent** destinée à l'usage industriel de l'année 2021.

| | Prélèvement d'eau (en milliers de $m^3$) |
|---|---|
| **Janvier** | 97.6 |
| **Février** | 45.3 |
| **Mars** | 71.5 |
| **Avril** | 75.2 |
| **Mai** | 34.1 |
| **Juin** | 32.8 |
| **Juillet** | 61.4 |
| **Août** | 78.9 |
| **Septembre** | 72.4 |
| **Octobre** | 45.3 |
| **Novembre** | 39.9 |
| **Décembre** | 70.4 |
| **TOTAL** | 725 |

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

Le tableau ci-dessous détaille le cumul mensuel du prélèvement **d'eau potable** destinée à l'usage domestique de l'année 2021.

| | Prélèvement d'eau (en $m^3$) |
|---|---|
| **Janvier** | 2 856 |
| **Février** | 3 909 |
| **Mars** | 1 698 |
| **Avril** | 5 542 |
| **Mai** | 4 654 |
| **Juin** | 3 166 |
| **Juillet** | 3 993 |
| **Août** | 3 439 |
| **Septembre** | 3 871 |
| **Octobre** | 2 169 |
| **Novembre** | 2 777 |
| **Décembre** | 2 647 |
| **TOTAL** | 40 721 |

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

### 1. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel des prélèvements d'eau pour 2021

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de prélèvement des années 2019 à 2021 avec la valeur du prévisionnel 2021.

| Année | Milieu | Volume (millions de $m^3$) |
|---|---|---|
| 2019 | Eau de mer | 3 889 |
| 2020 | | 4 094 |
| 2021 | | 4 774 |
| Prévisionnel 2021 | | 5 200 |
| **Année** | **Milieu** | **Volume (milliers de $m^3$)** |
| 2019 | Durdent | 653 |
| 2020 | | 599 |
| 2021 | | 725 |
| Prévisionnel 2021 | | 720 |
| **Année** | **Milieu** | **Volume (en m3)** |
| 2019 | Eau potable | 38 205 |
| 2020 | | 32 572 |
| 2021 | | 40 721 |

**Commentaires :** Le volume annuel d'eau prélevé est cohérent avec le prévisionnel qui avait été défini pour l'année 2021, compte tenu du temps effectif de fonctionnement des tranches.

Pour ce qui concerne le prélèvement d'eau de la Durdent, un faible dépassement du prévisionnel annoncé a toutefois été observé. En effet, le volume global annuel prélevé s'élève à 724 712 m3 pour un prévisionnel de 720 000 m3. Le dépassement de 4 712 m3 a été occasionné par la remise en eau après travaux du bassin de stockage Nord des eaux brutes situé sur le CNPE.
Pour ce qui est du prélèvement d'eau de mer, le volume global prélevé est toutefois resté en dessous du prévisionnel annoncé en raison de la prolongation de la durée des arrêts de tranches réalisés durant l'année.

### 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 | 356 | 339 | $m^3$/ h |
| | Volume journalier | 14 500 | 8 390 | 2 163 | $m^3$ |
| | Volume annuel | 1 500 000 | 724 712* | 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

En 2021, un tambour CFI de la tranche 1 a fait l'objet d'une opération de renforcement. Il n'y a pas eu d'autre opération de maintenance significative ayant un impact sur les équipements et les ouvrages de prélèvements en 2021 au-delà des opérations classiques de maintenance sur ces matériels.
Durant l'année 2021, une bathymétrie du chenal d'amenée (14/06/2021) a été réalisée. Les résultats n'ont pas amené à la réalisation de dragage.

### 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 2021.

# Partie III – Restitution et consommation d'eau

## I. Restitution d'eau

La restitution d'eau du CNPE de Paluel pour l'année 2021 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 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Eau de refroidissement | Rejets radioactifs | Rejets industriels | Unités |
| Restitution mensuelle | Janvier | 408.215 | 0.030945 | 2.395264 | millions de $m^3$ |
| | Février | 352.134 | 0.018907 | 1.832151 | |
| | Mars | 469.251 | 0.019093 | 2.379467 | |
| | Avril | 370.103 | 0.017489 | 2.088633 | |
| | Mai | 352.522 | 0.014799 | 1.847175 | |
| | Juin | 340.723 | 0.009860 | 1.828026 | |
| | Juillet | 346.923 | 0.019340 | 2.041058 | |
| | Août | 431.127 | 0.021779 | 2.226743 | |
| | Septembre | 440.638 | 0.023091 | 2.285845 | |
| | Octobre | 471.317 | 0.014561 | 2.466339 | |
| | Novembre | 371.093 | 0.017629 | 1.968182 | |
| | Décembre | 419.484 | 0.026601 | 2.452434 | |
| TOTAL | Restitution au milieu aquatique | Total prélevé : 4 799.575<br>Total restitué : 4 799.923 | | | millions 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 (eau de mer à usage de refroidissement, eau de mer à usage industriel, eau de la Durdent et eau potable) et la quantité d'eau restituée au milieu aquatique (eau de mer à usage de refroidissement, eau de mer à usage industriel, eau rejetée en sortie de la station d'épuration des eaux usées, eau rejetée en sortie de la station de production d'eau déminéralisée et les vidanges des réservoirs SEK (Ex), KER (T) et TER (S)).

Le tableau ci-dessous détaille le cumul mensuel de consommation d'eau de l'année 2021.

| | Consommation d'eau (en milliers de m3) |
|---|---|
| **Janvier** | 47.794 |
| **Février** | 16.242 |
| **Mars** | 36.817 |
| **Avril** | 47.563 |
| **Mai** | 11.792 |
| **Juin** | 14.909 |
| **Juillet** | 32.744 |
| **Août** | 42.648 |
| **Septembre** | 34.124 |
| **Octobre** | 19.320 |
| **Novembre** | 11.903 |
| **Décembre** | 31.499 |
| **TOTAL** | 347.355 |

# 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 :
  - Tritium,
  - Carbone 14,
  - Iode,
  - Autres produits de fission ou d'activation,
  - Gaz rares.
- les rejets chimiques liquides classés en deux catégories :
  - les rejets de substances chimiques associées aux effluents radioactifs liquides ou eaux non radioactives issues des salles des machines,
  - 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

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 évents 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 métastable. 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 $\beta$ ou $\gamma$, 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 décision[1] 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 | $^{58}Co$ |
| | $^{60}Co$ |
| | $^{134}Cs$ |
| | $^{137}Cs$ |

### c. Cumul mensuel

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

[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 métrologiste 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.* »

| | $^{41}Ar$ (GBq) | $^{85}Kr$ (GBq) | $^{131m}Xe$ (GBq) | $^{133}Xe$ (GBq) | $^{135}Xe$ (GBq) | $^{133m}Xe$ (GBq) | $^{131}I$ (GBq) | $^{133}I$ (GBq) | $^{58}Co$ (GBq) | $^{60}Co$ (GBq) | $^{134}Cs$ (GBq) | $^{137}Cs$ (GBq) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Janvier** | 2.699 E+00 | 8.262 E+00 | 6.564 E-03 | 2.831 E+01 | 1.025 E+01 | 1.305 E-02 | 3.209 E-04 | 1.611 E-03 | 7.817 E-05 | 9.688 E-05 | 7.733 E-05 | 8.029 E-05 |
| **Février** | 2.255 E+00 | 2.882 E+01 | 1.295 E-02 | 2.396 E+01 | 9.319 E+00 | 0.000 E+00 | 2.867 E-04 | 1.649 E-03 | 2.147 E-04 | 1.203 E-04 | 8.558 E-05 | 8.274 E-05 |
| **Mars** | 3.101 E+00 | 9.298 E-01 | 1.555 E-03 | 2.900 E+01 | 1.025 E+01 | 0.000 E+00 | 9.215 E-04 | 2.085 E-03 | 8.084 E-05 | 1.154 E-04 | 8.865 E-05 | 8.387 E-05 |
| **Avril** | 2.692 E+00 | 2.399 E+01 | 9.756 E-03 | 2.510 E+01 | 9.427 E+00 | 0.000 E+00 | 4.613 E-04 | 1.666 E-03 | 1.125 E-04 | 1.242 E-04 | 9.141 E-05 | 8.429 E-05 |
| **Mai** | 2.925 E+00 | 1.171 E+00 | 4.916 E-03 | 2.733 E+01 | 1.025 E+01 | 0.000 E+00 | 3.622 E-04 | 1.756 E-03 | 8.738 E-05 | 1.244 E-04 | 8.829 E-05 | 8.712 E-05 |
| **Juin** | 1.854 E+00 | 1.099 E+00 | 2.627 E-03 | 2.563 E+01 | 9.066 E+00 | 0.000 E+00 | 2.836 E-04 | 1.803 E-03 | 8.626 E-05 | 1.163 E-04 | 8.568 E-05 | 8.809 E-05 |
| **Juillet** | 2.285 E+00 | 1.942 E+00 | 1.948 E-03 | 3.087 E+01 | 1.006 E+01 | 0.000 E+00 | 3.087 E-04 | 1.875 E-03 | 8.647 E-05 | 1.217 E-04 | 8.762 E-05 | 8.907 E-05 |
| **Août** | 3.042 E+00 | 3.810 E-01 | 1.360 E-03 | 2.727 E+01 | 1.040 E+01 | 0.000 E+00 | 3.273 E-04 | 1.876 E-03 | 2.188 E-04 | 1.236 E-04 | 9.429 E-05 | 9.418 E-05 |
| **Septembre** | 2.808 E+00 | 1.252 E+00 | 9.829 E-04 | 2.662 E+01 | 1.003 E+01 | 0.000 E+00 | 5.459 E-04 | 1.864 E-03 | 8.863 E-05 | 1.338 E-04 | 8.727 E-05 | 8.262 E-05 |
| **Octobre** | 3.212 E+00 | 1.148 E-01 | 5.362 E-03 | 3.133 E+01 | 1.156 E+01 | 0.000 E+00 | 1.057 E-03 | 2.369 E-03 | 8.745 E-05 | 1.249 E-04 | 8.867 E-05 | 8.483 E-05 |
| **Novembre** | 3.155 E+00 | 1.307 E-02 | 7.360 E-04 | 3.240 E+01 | 1.156 E+01 | 0.000 E+00 | 3.343 E-04 | 1.920 E-03 | 1.747 E-04 | 1.426 E-04 | 9.226 E-05 | 9.990 E-05 |
| **Décembre** | 2.134 E+00 | 6.305 E-02 | 1.162 E-02 | 3.259 E+01 | 1.146 E+01 | 0.000 E+00 | 4.162 E-04 | 2.574 E-03 | 9.974 E-05 | 1.412 E-04 | 8.302 E-05 | 9.445 E-05 |
| **TOTAL ANNUEL** | **3.22 E+01** | **6.80 E+01** | **6.04 E-02** | **3.40 E+02** | **1.24 E+02** | **1.30 E-02** | **5.63 E-03** | **2.30 E-02** | **1.42 E-03** | **1.49 E-03** | **1.05 E-03** | **1.05 E-03** |

| | Volumes rejetés ($m^3$) | Activités gaz rares (GBq) | Activité Tritium (GBq) | Activité Carbone 14 (GBq) | Activités Iodes (GBq) | Activités Autres PF et PA (GBq) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Janvier** | 7.93 E+08 | 4.955 E+01 | 8.899 E+01 | | 1.932 E-03 | 3.327 E-04 |
| **Février** | 7.32 E+08 | 6.437 E+01 | 9.512 E+01 | 2.541 E+02 | 1.936 E-03 | 5.033 E-04 |
| **Mars** | 8.28 E+08 | 4.328 E+01 | 1.117 E+02 | | 3.007 E-03 | 3.688 E-04 |
| **Avril** | 8.00 E+08 | 6.122 E+01 | 1.588 E+02 | | 2.127 E-03 | 4.124 E-04 |
| **Mai** | 8.71 E+08 | 4.168 E+01 | 2.053 E+02 | 3.152 E+02 | 2.118 E-03 | 3.872 E-04 |
| **Juin** | 8.02 E+08 | 3.766 E+01 | 2.061 E+02 | | 2.087 E-03 | 3.763 E-04 |
| **Juillet** | 8.49 E+08 | 4.515 E+01 | 2.304 E+02 | | 2.183 E-03 | 3.848 E-04 |
| **Août** | 8.12 E+08 | 4.109 E+01 | 2.003 E+02 | 1.711 E+02 | 2.203 E-03 | 5.309 E-04 |
| **Septembre** | 7.99 E+08 | 4.072 E+01 | 1.943 E+02 | | 2.410 E-03 | 3.923 E-04 |
| **Octobre** | 8.69 E+08 | 4.623 E+01 | 1.955 E+02 | | 3.425 E-03 | 3.858 E-04 |
| **Novembre** | 8.21 E+08 | 4.714 E+01 | 2.125 E+02 | 1.946 E+02 | 2.254 E-03 | 5.095 E-04 |
| **Décembre** | 8.58 E+08 | 4.626 E+01 | 1.854 E+02 | | 2.990 E-03 | 4.184 E-04 |
| **TOTAL ANNUEL** | **9.83 E+09** | **5.64 E+02** | **2.08 E+03** | **9.35 E02** | **2.87 E-02** | **5.00 E-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 ne présentent pas d'activité volumique bêta globale d'origine artificielle supérieure à 1 E-3 Bq/m3.

### d. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2021 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2021.

| Année | Rejets par catégorie de radionucléides (GBq) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Gaz rares | Tritium | Carbone 14 | Iodes | Autres produits de fission et d'activation |
| 2019 | 7,94 E+02 | 1,910 E+03 | 8,06 E+02 | 4,01 E-02 | 6,73 E-03 |
| 2020 | 9,51 E+02 | 1,58 E+03 | 6,52 E+02 | 3,15 E-02 | 5,95 E-03 |
| 2021 | **5.64 E+02** | **2.08 E+03** | **9.35 E +02** | **2.87 E-02** | **5.00 E-03** |
| Prévisionnel 2021 | 8.00 E+02 | 2.000 E+03 | 9.00 E+02 | 4.00E-02 | 8.00 E-03 |

**Commentaires :** Les rejets radioactifs à l'atmosphère sont cohérents avec les valeurs du prévisionnel 2021. Le faible dépassement observé pour les rejets de Carbone 14 et de Tritium sont en lien avec la gestion du traitement des effluents et notamment la répartition des rejets

sous forme liquide et gazeuse. Il est à noter également une influence des variations de puissance des installations de production liées aux contraintes du réseau de distribution d'électricité.

### e. Comparaison aux valeurs limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2021 avec les valeurs limites de rejets fixées par la décision ASN n° 2019-DC-0676.

| | | Limites annuelles de rejet | | Rejet |
|---|---|---|---|---|
| **Paramètres** | **Localisation prélèvement** | **Prescriptions** | **Valeur** | **Valeur maximale** |
| Gaz rares | Installation | Activité annuelle rejetée (GBq) | 4,800 E+04 | 5.64 E+02 (*) |
| | Cheminée n° 1 | Débit instantané (Bq/s) | 4,50 E+06(2) | 2,25 E+05 |
| | Cheminée n° 2 | Débit instantané (Bq/s) | 4,50 E+06(2) | 1.56 E+05 |
| | Cheminée n° 3 | Débit instantané (Bq/s) | 4,50 E+06(2) | 4.52 E+05 |
| | Cheminée n° 4 | Débit instantané (Bq/s) | 4,50 E+06(2) | 2.39 E+05 |
| Carbone 14 | Installation | Activité annuelle rejetée (GBq) | 2,80 E+03 | 9,35 E+02 (*) |
| Tritium | Installation | Activité annuelle rejetée (GBq) | 8,00 E+03 | 2,08 E+03 (*) |
| | Cheminée n° 1 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+05(1) | 2.57E+04 |
| | Cheminée n° 2 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+05(1) | 3.19 E+04 |
| | Cheminée n° 3 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+05(1) | 2.26 E+04 |
| | Cheminée n° 4 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+05(1) | 3.33 E+04 |
| Iodes | Installation | Activité annuelle rejetée (GBq) | 1,20 E+00 | 2,87 E-02 (*) |
| | Cheminée n° 1 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+01(3) | 7.76 E-01 |
| | Cheminée n° 2 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+01(3) | 3.63 E-01 |
| | Cheminée n° 3 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+01(3) | 4.98 E-01 |
| | Cheminée n° 4 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+01(3) | 9.51 E-01 |
| Autres produits de fission et produits d'activation | Installation | Activité annuelle rejetée (GBq) | 2,00 E-01 | 5,00 E-03 (*) |
| | Cheminée n° 1 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+01(3) | 1.74 E-01 |
| | Cheminée n° 2 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+01(3) | 1.00 E-01 |
| | Cheminée n° 3 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+01(3) | 2.10 E-01 |
| | Cheminée n° 4 | Débit instantané (Bq/s) | 5,00 E+01(3) | 1.52 E-01 |

(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 2021.

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

Les rejets radioactifs diffus ont notamment pour origine :

- les évents de réservoirs d'entreposage des effluents radioactifs (KER(T), TER(S)) et les réservoirs destinés à l'entreposage des effluents issus des salles des machines (SEK(Ex)),
- 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 est donnée dans le tableau suivant.

| | Volume ($m^3$) | Rejets de vapeur du circuit secondaire | | Rejets au niveau des évents des réservoirs d'eau de refroidissement des piscines et d'entreposage des effluents liquides | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Tritium (Bq) | Iodes (Bq) | Tritium (Bq) | Iodes (Bq) |
| **Janvier** | 5.10 E+04 | 1.495 E+09 | 0.000 E+00 | 7.555 E+07 | 0 |
| **Février** | 2.39 E+04 | 6.000 E+09 | 0.000 E+00 | 6.916 E+07 | 0 |
| **Mars** | 1.84 E+04 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 3.961 E+07 | 0 |
| **Avril** | 3.25 E+04 | 5.700 E+09 | 0.000 E+00 | 1.059 E+08 | 0 |
| **Mai** | 1.48 E+04 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 6.420 E+07 | 0 |
| **Juin** | 9.86 E+03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 9.478 E+07 | 0 |
| **Juillet** | 3.93 E+04 | 1.007 E+10 | 0.000 E+00 | 1.698 E+08 | 0 |
| **Août** | 4.18 E+04 | 2.220 E+09 | 0.000 E+00 | 1.195 E+08 | 0 |
| **Septembre** | 2.80 E+04 | 2.000 E+08 | 0.000 E+00 | 7.419 E+07 | 0 |
| **Octobre** | 1.46 E+04 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 9.521 E+07 | 0 |
| **Novembre** | 2.26 E+04 | 4.550 E+09 | 0.000 E+00 | 9.444 E+07 | 0 |
| **Décembre** | 3.66 E+04 | 9.500 E+08 | 0.000 E+00 | 7.625 E+07 | 0 |
| **TOTAL ANNUEL** | **3.33 E+05** | **3.12 E+10** | **0.00 E+00** | **1.08 E+09** | **0** |

### 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, NOX) 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 équipé de groupes frigorifiques pour assurer la production d'eau glacée et pour la réfrigération des locaux techniques et administratifs. Le fonctionnement de ces matériels et les opérations de maintenance peuvent conduire à des émissions de fluides frigorigènes. 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 (SOx) et d'azote (NOx) rejetée dans l'atmosphère lors du fonctionnement périodique des groupes électrogènes de secours (moteurs Diesels) ayant fonctionné pendant environ 780 heures, de la turbine à combustion (TAC) ayant fonctionné pendant environ 50 heures et des diesels d'ultime secours (DUS) ayant fonctionné pendant environ 160 heures au total sur les 4 tranches pour 2021 est de :

| Paramètre | Unité | Groupes électrogènes | TAC DUS | TOTAL |
|---|---|---|---|---|
| SOx | kg | 5 | 2 | 7 |
| NOx | kg | 158 168 | 53 790 | 211 958 |

### b. Rejets de formaldéhyde et de monoxyde de carbone

En 2021, 160 $m^3$ de calorifuges 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 | 2.65 E-02 | 5.98 E-04 |
| | | Monoxyde de carbone | 2.47 E-02 | 5.58 E-04 |

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

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

| Paramètre | Unité | TOTAL |
|---|---|---|
| Ammoniac | kg | 175,7 |

### 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 |
| Hydrogéno-chloro-fluor-carbone (HCFC) | 0 | 0 |
| Hydrogéno-fluoro-carbone (HFC) | 304,6 | 462,9 |
| Hexafluorure de soufre (SF6) | 292,2 | 6 866,7 |
| Total des émissions de GES en tonne équivalent CO2 | | 7329,6 |

Dans le respect de la règlementation relative aux systèmes d'échanges de quota d'émissions de gaz à effet de serre, le CNPE déclare chaque année les émissions de $CO_2$ provenant de l'activité de combustion dans les installations dont la puissance thermique totale de combustion est supérieure à 20 MW. Pour l'année 2021, les émissions liées à cette activité représentent 882,22 tonnes équivalent $CO_2$.

L'équivalent $CO_2$ total des émissions de GES du CNPE constituées des pertes de fluides frigorigène et SF6 et de la combustion des diesels de secours, représente 2,70 $10^{-1}$ gCO2 / kWh électrique produit, la production annuelle nette d'électricité ayant été de 30,36 TWh sur l'année 2021.

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

L'année 2021 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 2021.

## 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 (xénons, 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 liquides 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 (résiduaires, 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 décision[1] 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 pour les tranches en fonctionnement.

[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 métrologiste 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.* »

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

### c. Cumul mensuel

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

| | $^{131}$I (GBq) | $^{54}$Mn (GBq) | $^{63}$Ni (GBq) | $^{58}$Co (GBq) | $^{60}$Co (GBq) | $^{110m}$Ag (GBq) | $^{123m}$Te (GBq) | $^{124}$Sb (GBq) | $^{125}$Sb (GBq) | $^{134}$Cs (GBq) | $^{137}$Cs (GBq) | $^{51}$Cr (GBq) | $^{95}$Zr (GBq) | $^{95}$Nb (GBq) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Janvier** | 9.367 E-04 | 1.180 E-03 | 1.702 E-02 | 3.420 E-02 | 2.370 E-02 | 1.011 E-03 | 6.004 E-04 | 1.023 E-03 | 2.783 E-03 | 6.495 E-03 | 7.803 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Février** | 9.637 E-04 | 1.587 E-03 | 1.269 E-02 | 1.471 E-02 | 3.510 E-02 | 1.026 E-03 | 8.026 E-04 | 1.048 E-03 | 2.880 E-03 | 1.069 E-03 | 1.227 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Mars** | 7.966 E-04 | 1.110 E-03 | 1.851 E-02 | 5.041 E-02 | 3.077 E-02 | 2.132 E-03 | 9.038 E-04 | 9.108 E-04 | 2.344 E-03 | 2.558 E-03 | 3.396 E-03 | 4.172 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Avril** | 6.843 E-04 | 1.220 E-03 | 2.194 E-02 | 1.483 E-02 | 2.934 E-02 | 7.720 E-04 | 5.077 E-04 | 7.957 E-04 | 4.111 E-03 | 1.956 E-03 | 3.012 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Mai** | 7.950 E-04 | 1.052 E-03 | 2.638 E-02 | 1.697 E-02 | 2.269 E-02 | 8.565 E-04 | 5.273 E-04 | 8.477 E-04 | 6.956 E-03 | 8.784 E-04 | 1.926 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Juin** | 5.589 E-04 | 7.091 E-04 | 1.986 E-02 | 1.254 E-02 | 2.760 E-02 | 1.121 E-03 | 5.199 E-04 | 6.518 E-04 | 2.862 E-03 | 6.656 E-04 | 1.398 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Juillet** | 7.876 E-04 | 8.754 E-04 | 4.013 E-02 | 1.591 E-02 | 2.486 E-02 | 1.574 E-03 | 4.994 E-03 | 8.148 E-04 | 7.910 E-03 | 8.584 E-04 | 1.356 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Août** | 7.526 E-04 | 1.259 E-03 | 2.567 E-02 | 1.018 E-02 | 5.287 E-02 | 3.693 E-03 | 5.236 E-04 | 8.052 E-04 | 5.771 E-03 | 8.465 E-04 | 1.631 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Septembre** | 9.467 E-04 | 1.075 E-03 | 1.933 E-02 | 3.618 E-02 | 2.209 E-02 | 4.017 E-03 | 1.200 E-03 | 1.029 E-03 | 2.845 E-03 | 1.062 E-03 | 2.355 E-03 | 6.487 E-03 | 5.895 E-4 | 6.135 E-04 |
| **Octobre** | 8.995 E-04 | 1.643 E-03 | 1.873 E-02 | 4.177 E-02 | 3.958 E-02 | 1.859 E-03 | 1.972 E-03 | 1.024 E-03 | 2.644 E-03 | 1.309 E-03 | 1.804 E-03 | 5.166 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Novembre** | 1.245 E-03 | 1.446 E-03 | 2.516 E-02 | 1.117 E-02 | 6.128 E-02 | 4.112 E-03 | 1.169 E-03 | 1.271 E-03 | 4.238 E-03 | 1.529 E-03 | 2.054 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **Décembre** | 8.705 E-04 | 1.027 E-03 | 2.025 E-02 | 1.470 E-02 | 4.443 E-02 | 3.886 E-03 | 1.664 E-03 | 9.208 E-04 | 3.939 E-03 | 1.067 E-03 | 1.479 E-03 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| **TOTAL ANNUEL** | **1.02 E-02** | **1.42 E-02** | **2.66 E-01** | **2.74 E-01** | **4.14 E-01** | **2.61 E-02** | **1.54 E-02** | **1.11 E-02** | **4.93 E-02** | **2.03 E-02** | **2.94 E-02** | **1.58 E-02** | **5.89 E-04** | **6.13 E-04** |

| | Volumes rejetés ($m^3$) | Activité Tritium (GBq) | Activité Carbone 14 (GBq) | Activités Iodes (GBq) | Activités Autres PF et PA 63Ni inclus (GBq) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Janvier** | 3.09 E+04 | 7.059 E+03 | 4.767 E+00 | 9.367 E-04 | 9.581 E-02 |
| **Février** | 1.89 E+04 | 6.383 E+03 | 4.875 E+00 | 9.637 E-04 | 7.214 E-02 |
| **Mars** | 1.91 E+04 | 3.582 E+03 | 1.979 E+00 | 7.966 E-04 | 1.172 E-01 |
| **Avril** | 1.75 E+04 | 9.491 E+03 | 2.039 E+00 | 6.843 E-04 | 7.848 E-02 |
| **Mai** | 1.48 E+04 | 5.834 E+03 | 1.213 E+00 | 7.950 E-04 | 7.909 E-02 |
| **Juin** | 9.86 E+03 | 8.416 E+03 | 2.126 E+00 | 5.589 E-04 | 6.794 E-02 |
| **Juillet** | 1.93 E+04 | 1.445 E+04 | 3.095 E+00 | 7.876 E-04 | 9.928 E-02 |
| **Août** | 2.18 E+04 | 9.019 E+03 | 3.300 E+00 | 7.526 E-04 | 1.032 E-01 |
| **Septembre** | 2.31 E+04 | 6.636 E+03 | 1.882 E+00 | 9.467 E-04 | 9.888 E-02 |
| **Octobre** | 1.46 E+04 | 8.537 E+03 | 2.152 E+00 | 8.995 E-04 | 1.175 E-01 |
| **Novembre** | 1.76 E+04 | 8.032 E+03 | 2.219 E+00 | 1.245 E-03 | 1.134 E-01 |
| **Décembre** | 2.66 E+04 | 6.137 E+03 | 1.633 E+00 | 8.705 E-04 | 9.336 E-02 |
| **TOTAL ANNUEL** | **2.34 E+05** | **9.36 E+04** | **3.13 E+01** | **1.02 E-02** | **1.14 E+00** |

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

**Commentaires :**

Trois réservoirs Ex vidangés respectivement les 15, 20 et 28 juin 2021 ont révélé une activité en tritium supérieure au seuil de 4.00 E+02 Bq/l, respectivement de 4.40E+02 Bq/l, 4.48E+02 Bq/l et de 4.56E+02 Bq/l.

Le dépassement identifié a pour principale origine l'activité en tritium présente dans la partie secondaire de l'installation du réacteur N°3. Des déconcentrations en tritium du fluide contenu dans le circuit primaire de l'installation ont permis de limiter la présence de tritium dans le circuit secondaire à un niveau d'activité voisin de 3.00 E+03 Bq/l. Une diffusion du tritium via les générateurs de vapeur du réacteur n°3 est à l'origine de cette présence de tritium quantifiée dans la partie secondaire de l'installation.

Cinq réservoirs Ex vidangés respectivement les 1er, 2, 3 et 4 juillet 2021 ont révélé une activité en tritium supérieure au seuil de 4.00 E+02 Bq/l, respectivement de 6.28E+02 Bq/l, 1.59E+03 Bq/l, 7.47E+02 Bq/l, 7.74E+02 Bq/l et de 4.68E+02 Bq/l.

Le dépassement observé a la même origine que précédemment, à savoir l'activité en tritium présente dans la partie secondaire de l'installation du réacteur N°3. Des déconcentrations en tritium du fluide contenu dans le circuit primaire de l'installation ont permis de limiter la présence de tritium dans le circuit secondaire à un niveau d'activité voisin de 3.00 E+03 Bq/l.

Une diffusion du tritium via les générateurs de vapeur du réacteur n°3 est à l'origine de cette présence de tritium quantifiée dans la partie secondaire de l'installation.

Un arrêt automatique réacteur survenu sur la tranche 3 le 30 juin 2021 a nécessité la mise en œuvre de mouvements d'eau sur la partie secondaire de l'installation. Ces mouvements d'eau réalisés jusqu'au redémarrage de la tranche 3 ont permis de diminuer l'activité en tritium transférée dans les réservoirs Ex à partir du 4 juillet 2021.

Le réservoir Ex vidangé le 8 novembre 2021 a révélé une activité en tritium de 4,36E+02 Bq/l.

Le dépassement du seuil de 4.00 E+02 Bq/l en tritium identifié dans le réservoir précité a pour origine l'activité en tritium présente dans la partie secondaire de l'installation du réacteur N°3. En effet, la période de remplissage du réservoir Ex3 coïncide avec la phase de mise à l'arrêt de la tranche 3 qui a induit la mise en œuvre de mouvements d'eau conséquents sur la partie secondaire de l'installation. Il est à noter que l'activité en tritium du poste de la tranche 3 était lors de la mise à l'arrêt de la tranche de 8.90 E+02 Bq/l. Durant la phase de remplissage du réservoir, la production d'effluents provenait majoritairement de la tranche 3.

### d. Comparaison pluriannuelle et au prévisionnel

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejet de l'année 2021 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2021.

| | Rejets par catégorie de radionucléides (GBq) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Tritium** | **Carbone 14** | **Iodes (MBq)** | **Autres PA et PF (MBq)** |
| 2019 | 8,63 E+04 | 3,11 E+01 | 8,96 E-03 | 2,27 E+00 |
| 2020 | 7,43 E+04 | 3,64 E+01 | 8,71 E-03 | 1,31 E+00 |
| 2021 | **9.36 E+04** | **3.13 E+01** | **1.02 E-02** | **1.14 E+00** |
| Prévisionnel 2021 | 1.20 E+05 | 5.0 E+01 | 1.0 E-02 | 1.4 E+00 |

**Commentaires :** Les rejets radioactifs liquides sont cohérents avec les valeurs du prévisionnel 2021. La diminution de l'activité rejetée en PF/PA, 63Ni inclus, observée en 2020 est consécutive à la fin de vidange du réservoir (T3) 0KER003BA. Ce réservoir vidangé sur 4 années, de 2016 à 2019 à hauteur d'une fraction de 50 m3 / trimestre avait la particularité de contenir une présence inhabituelle de Nickel 63 et de Cobalt 60 qui avait influencé à la hausse le bilan rejet des 4 années concernées par la période de rejet.

### e. Comparaison aux limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2021 avec les valeurs limites de rejets fixées par la décision ASN n°2019-DC-676.

| | Limites annuelles de rejet | | Rejet |
|---|---|---|---|
| **Paramètres** | **Prescriptions** | **Valeur** | **Valeur maximale** |
| Tritium | Activité annuelle rejetée (GBq) | 1,60 E+05 | 9.36 E+04 |
| | Débit instantané (Bq/s) | 800 x D | 1,54 E+07 |
| Carbone 14 | Activité annuelle rejetée (GBq) | 3,80 E+02 | 3.13 E+01 |
| Iodes | Activité annuelle rejetée (GBq) | 2.0 E-01 | 1.02 E-02 |
| | Débit instantané (Bq/s) | 1 x D | 2,35 E+00 |
| Autres PA et PF | Activité annuelle rejetée (GBq) | 2,0 E+01 | 1.14 E+00 |
| | Débit instantané (Bq/s) | 7 x D | 2,71 E+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.

[1] 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 2021 sont donnés dans le tableau suivant (valeurs moyennes et maximales).

| | | Activité volumique horaire à mi-rejet | | | Activité volumique : moyenne journalière | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Paramètre analysé** | **Valeur moyenne mesurée en 2021** | **Valeur maximale mesurée en 2021** | **Limite réglementaire** | **Valeur moyenne mesurée en 2021** | **Valeur maximale mesurée en 2021** | **Limite réglementaire** |
| Eau filtrée | Activité bêta globale | 1.16 E+01 Bq/L | 1.29 E+01 Bq/L | 2 Bq/L | - | - | - |
| | Tritium | 2.84 E+02 Bq/L | 5.57 E+02 Bq/L | 280 Bq/L | 8.46 E+01 Bq/L | 6.01 E+02 (1) / 1.65 E+01 (2) Bq/L | 9.00 E+02 (1) /1.00 E+02 (2) Bq/L |
| | Potassium | 4.05 E+02 mg/L | 4.40 E+02 mg/L | - | - | - | - |
| Matières en suspension | Activité bêta globale | 8.80 E-02 Bq/L | 2.31 E-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 2021 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 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 la morpholine / de l'éthanolamine et de leurs produits dérivés

Le CNPE n'a, à ce jour, pas basculé sur le conditionnement à la morpholine ou l'éthanolamine. Actuellement le CNPE est conditionné à l'ammoniaque.

### 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'émissaire 1 »

#### 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) | MES (Ex, T et S) (kg)) | Hydrazine (kg) | Détergents (kg) | Azote total (kg) | Phosphates (kg) | Métaux Totaux (kg) * | DCO (kg) | Sulfates (1) (kg) | MES (1) (kg) | Fer (1) (kg) | Cuivre (1) (2) (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Janvier | 7.011 E+02 | 7.052 E+01 | 1.675 E-01 | 3.078 E+00 | 2.770 E+02 | 8.087 E+01 | 3.230 E+00 | 1.551 E+02 | 2.010 E+04 | 2.730 E+04 | 4.270 E+02 | 0.000 E+00 |
| Février | 1.070 E+03 | 4.880 E+01 | 4.730 E-02 | 5.120 E+00 | 2.048 E+02 | 1.790 E+02 | 2.570 E+00 | 9.720 E+01 | 1.099 E+04 | 1.416 E+04 | 2.939 E+02 | 0.000 E+00 |
| Mars | 8.395 E+02 | 4.533 E+01 | 4.774 E-02 | 4.023 E+00 | 2.702 E+02 | 2.094 E+02 | 2.880 E+00 | 1.250 E+02 | 1.394 E+04 | 1.183 E+04 | 2.546 E+02 | 0.000 E+00 |
| Avril | 9.140 E+02 | 1.574 E+02 | 5.199 E-02 | 3.989 E+00 | 2.434 E+02 | 1.080 E+02 | 2.890 E+00 | 7.710 E+01 | 1.169 E+04 | 1.608 E+04 | 2.636 E+02 | 0.000 E+00 |
| Mai | 4.733 E+02 | 1.285 E+02 | 5.301 E-02 | 4.059 E+00 | 3.175 E+02 | 2.353 E+02 | 3.597 E+00 | 7.890 E+01 | 7.337 E+03 | 2.522 E+03 | 7.538 E+01 | 0.000 E+00 |
| Juin | 1.141 E+03 | 8.252 E+01 | 2.465 E-02 | 3.143 E+00 | 3.007 E+02 | 1.449 E+02 | 1.747 E+00 | 1.066 E+02 | 5.760 E+03 | 1.075 E+04 | 2.080 E+02 | 0.000 E+00 |
| Juillet | 1.753 E+03 | 3.085 E+02 | 5.423 E-02 | 3.703 E+00 | 3.942 E+02 | 1.020 E+02 | 3.310 E+00 | 9.431 E+01 | 1.035 E+04 | 9.340 E+03 | 1.471 E+02 | 0.000 E+00 |
| Août | 9.436 E+02 | 3.487 E+02 | 2.015 E-01 | 4.075 E+00 | 3.543 E+02 | 1.517 E+02 | 7.310 E+00 | 1.028 E+02 | 1.857 E+04 | 6.649 E+03 | 1.158 E+02 | 0.000 E+00 |
| Septembre | 1.688 E+03 | 3.576 E+02 | 6.050 E-02 | 4.944 E+00 | 4.911 E+02 | 1.958 E+02 | 3.340 E+00 | 2.544 E+02 | 2.212 E+04 | 1.438 E+04 | 1.527 E+02 | 3.082 E+00 |
| Octobre | 2.348 E+03 | 3.294 E+02 | 4.067 E-02 | 4.741 E+00 | 4.217 E+02 | 6.557 E+01 | 3.247 E+00 | 8.542 E+01 | 9.982 E+03 | 1.041 E+04 | 1.234 E+02 | 4.846 E+00 |
| Novembre | 1.340 E+03 | 3.854 E+02 | 5.712 E -02 | 6.137 E+00 | 3.666 E+02 | 1.717 E+02 | 3.995 E+00 | 5.289 E+01 | 1.181 E+04 | 9.776 E+03 | 2.071 E+02 | 3.698 E+00 |
| Décembre | 1.434 E+03 | 7.246 E+02 | 9.123 E-02 | 4.327 E+00 | 3.191 E+02 | 9.377 E+01 | 3.692 E+00 | 1.499 E+02 | 1.915 E+04 | 1.461 E+04 | 2.266 E+02 | 3.076 E+00 |
| TOTAL ANNUEL | **1.46 E+04** | **2.99 E+03** | **8.98 E-01** | **5.13 E+01** | **3.96 E+03** | **1.74 E+03** | **4.18 E+01** | **1.38 E+03** | **1.62 E+05** | **1.48 E+05** | **2.50 E+03** | **1.47 E+01** |

*Flux mensuel limite en métaux totaux : 3,8 E1 kg ;

(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** | 7.74 E-02 | 8.64 E-01 | 7.74 E-02 | 4.33 E-02 | 3.91 E-01 | 9.14 E-02 | 3.09 E-01 | 1.38 E+00 | 3.230 E+00 |
| **Février** | 4.73 E-02 | 3.06 E-01 | 4.73 E-02 | 1.89 E-02 | 2.79 E-01 | 1.19 E-01 | 4.63 E-01 | 1.29 E+00 | 2.570 E+00 |
| **Mars** | 4.77 E-02 | 3.44 E-01 | 4.77 E-02 | 4.47 E-02 | 5.09 E-01 | 1.27 E-01 | 1.91 E-01 | 1.57 E+00 | 2.880 E+00 |
| **Avril** | 4.37 E-02 | 2.78 E-01 | 8.42 E-02 | 1.75 E-02 | 3.65 E-01 | 9.10 E-02 | 5.60 E-01 | 1.45 E+00 | 2.890 E+00 |
| **Mai** | 3.70E-02 | 2.79 E-01 | 6.49 E-02 | 6.38 E-01 | 5.46 E-01 | 9.07 E-02 | 4.56 E-01 | 1.49 E+00 | 3.597 E+00 |
| **Juin** | 2.47 E-02 | 2.43 E -01 | 2.47 E-02 | 7.70 E-02 | 2.91 E-01 | 4.55 E-02 | 3.07 E-01 | 7.34 E-01 | 1.747 E+00 |
| **Juillet** | 4.84 E-02 | 3.22 E-01 | 4.84 E-02 | 8.12 E-02 | 7.26 E-01 | 9.21 E-02 | 7.35 E-01 | 1.57 E+00 | 3.310 E+00 |
| **Août** | 5.44 E-02 | 1.06 E+00 | 5.44 E-02 | 2.70 E-02 | 1.03 E+00 | 2.63 E-01 | 8.78 E-01 | 3.70 E+00 | 7.310 E+00 |
| **Septembre** | 5.78 E-02 | 7.02 E-01 | 5.77 E-02 | 8.47 E-02 | 3.99 E-01 | 1.30 E-01 | 4.85 E-01 | 1.42 E+00 | 3.340 E+00 |
| **Octobre** | 3.65 E-02 | 7.19 E-01 | 3.64 E-02 | 7.41 E-02 | 6.78 E-01 | 1.04 E-01 | 3.22 E-01 | 1.28 E+00 | 3.247 E+00 |
| **Novembre** | 4.41 E-02 | 1.00 E+00 | 4.41 E-02 | 5.45 E-02 | 5.47 E-01 | 1.14 E-01 | 6.13 E-01 | 1.57 E+00 | 3.995 E+00 |
| **Décembre** | 6.65 E-02 | 7.24 E-01 | 6.65 E-02 | 3.44 E-02 | 3.55 E-01 | 6.65 E-02 | 6.89 E-01 | 1.69 E+00 | 3.692 E+00 |
| **TOTAL ANNUEL** | **5.85 E-01** | **6.85 E+00** | **6.54 E-01** | **1.44 E+00** | **6.11 E+00** | **1.33 E+00** | **6.01 E+00** | **1.88 E+01** | **4.18 E+01** |

Le détail du cumul mensuel des composants de la famille Azote total est présenté dans le tableau ci-dessous. Ces données sont ensuite exprimées en équivalent Azote puis sommées pour la détermination de l'Azote total.

| | Nitrates (kg) | Nitrites (kg) | Ammonium (kg) | Azote total calculé (kg) |
|---|---|---|---|---|
| **Janvier** | 1.020 E+02 | 1.450 E+02 | 2.698 E+02 | 2.770 E+02 |
| **Février** | 7.258 E+01 | 1.270 E+02 | 1.926 E+02 | 2.048 E+02 |
| **Mars** | 6.982 E+01 | 1.491 E+02 | 2.688 E+02 | 2.702 E+02 |
| **Avril** | 1.001 E+02 | 9.068 E+01 | 2.483 E+02 | 2.434 E+02 |
| **Mai** | 6.686 E+01 | 9.619 E+01 | 3.516 E+02 | 3.175 E+02 |
| **Juin** | 4.952 E+01 | 1.048 E+02 | 3.312 E+02 | 3.007 E+02 |
| **Juillet** | 1.459 E+02 | 1.853 E+02 | 3.920 E+02 | 3.942 E+02 |
| **Août** | 9.635 E+01 | 2.080 E+02 | 3.461 E+02 | 3.543 E+02 |
| **Septembre** | 1.405 E+02 | 1.701 E+02 | 5.240 E+02 | 4.911 E+02 |
| **Octobre** | 7.211 E+01 | 1.698 E+02 | 4.548 E+02 | 4.217 E+02 |
| **Novembre** | 1.129 E+02 | 1.724 E+02 | 3.727 E+02 | 3.666 E+02 |
| **Décembre** | 1.018 E+02 | 1.619 E+02 | 3.173 E+02 | 3.191 E+02 |
| **Total Annuel** | **1.13 E+03** | **1.780 E+03** | **4.069 E+03** | / |
| **Total Annuel exprimé en Azote** | **2.57 E+02** | **5.45 E+02** | **3.17 E+03** | **3.96 E+03** |

### 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 2021 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2021.

| Substances | Unité | 2019 | 2020 | 2021 | Prévisionnel 2021 |
|---|---|---|---|---|---|
| Acide borique | kg | 8.54 E+03 | 7.00 E+03 | 1.46 E+04 | 1.20 E+04 |
| Hydrazine | kg | 6.87 E-01 | 1.13 E+00 | 8.97 E-01 | 9.00 E-01 |
| Détergents | kg | 7.50 E+01 | 3.93 E+01 | 5.13 E+01 | 5.00 E+01 |
| Azote total | kg | 8.62 E+02 | 3.45 E+03 | 3.96 E+03 | 4.20 E+03 |
| Phosphates | kg | 1.91 E+03 | 1.30 E+03 | 1.74 E+03 | 2.00 E+03 |
| Fer (Station de déminéralisation) | kg | 3,00 E+03 | 2,77 E+03 | 2.50 E+03 | 3,30 E+03 |
| Métaux totaux | kg | 4.8 E+01 | 3.58 E+01 | 4.18 E+01 | 5,00 E+01 |
| Sulfates (Station de déminéralisation) | kg | 1.10 E+05 | 1.26 E+05 | 1.62 E+05 | 1,40 E+05 |
| Cuivre (Station de déminéralisation) | kg | - | - | 1.47 E+01 | - |
| MES (Station de déminéralisation) | kg | 1.30 E+05 | 1.27 E+05 | 1.48 E+05 | - |
| MES (T,S et Ex) | kg | 2.53 E+03 | 2.10 E+03 | 2.99 E+03 | - |
| DCO | kg | 4.11 E+03 | 2.41 E+03 | 1.38 E+03 | - |

**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 2021. Nous observons cependant un dépassement du prévisionnel annoncé pour les rejets d'acide borique issus des réservoirs T ainsi que pour les rejets de sulfates issus de la station de déminéralisation et d'azote global issus de la station d'épuration.

Pour ce qui concerne les rejets d'acide borique, le dépassement a pour origine un transfert d'effluent excédentaire préparé sur la tranche 4 durant l'été 2021. Par ailleurs, une inétanchéité apparue sur le circuit de régulation chimique de la tranche 2 a également occasionné un transfert complémentaire d'effluents contenant de l'acide borique sur les quatre derniers mois de l'année 2021. La quantité d'acide borique rejetée en 2021 a ainsi atteint la valeur de 1.46 E+04 kg pour un prévisionnel annoncé de 1,20 E+04 kg.

En raison de travaux liés au futur appoint en eau ultime des 4 tranches de Paluel, un seul bassin de stockage de l'eau brute prélevée dans la Durdent a été exploité en 2021 sur les deux bassins habituellement disponibles. Cette situation a occasionné une baisse de la qualité de l'eau brute stockée dans l'unique bassin en exploitation. En conséquence, les cycles de régénération des chaines de production d'eau déminéralisée ont dû être plus fréquents en 2021. Cette évolution a occasionné une augmentation de la quantité d'acide sulfurique

consommée et par conséquent de la quantité de sulfates rejetée qui a atteint la valeur de 1.62 E5 kg pour un prévisionnel de 1.40 E+05 kg.

Pour ce qui concerne la station d'épuration, le recyclage des eaux d'épuration issues des lits de roseaux utilisés pour le traitement des boues avant évacuation a occasionné sur l'année 2021 un léger dépassement du prévisionnel annoncé pour les rejets d'azote global. En effet, la quantité rejetée à fin 2021 est de 1.11 E+03 kg pour un prévisionnel de 1.00 E+03 kg.

### iii. Comparaison aux limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2021 avec les valeurs limites de rejets fixées par la décision ASN n° 2019-DC-676.

| | Limite | Rejet | Limite | Rejet | Limite | Rejet | Limite | Rejet |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Substances** | **Concentration maximale ajoutée dans l'ouvrage de rejet (mg/L)** | **Valeur maximale calculée dans l'ouvrage de rejet (mg/L)** | **Flux 24h (kg)** | **Valeur maximal calculée Flux 24h (kg)** | **Flux 2h (kg)** | **Valeur maximale calculée Flux 2h (kg)** | **Flux annuel ajouté (kg)** | **Flux annuel calculé (kg)** |
| Acide borique | 3.10 E+00 | 2.89 E-01 | 2.50 E+03 | 6.43 E+02 | 5.00 E+02 | 6.76 E+01 | 2,000 E+04 | 1.46 E+04 |
| Hydrazine | 6.0 E-03 | 1.25 E-04 | 1.5 E+00 | 7.03 E-02 | / | / | 1.80 E+02 | 8.97 E-01 |
| Détergents | 9.9 E-01 | 5.05 E-04 | 2.0 E+02 | 8,47 E-01 | 1.60 E+02 | 1.44 E-01 | 3.150 E+03 | 5.13 E+01 |
| Azote total | 4.0 E-01 | 1.62 E-01 | 1.00 E+02 | 7.73 E+01 | / | / | 1.726 E+03 | 3,96 E+03 |
| Phosphates | 7.400 E-01 | 1.66 E-01 | 2.00 E+02 | 5.13 E+01 | 1.20 E+02 | 7.76 E+01 | / | 1.74E+03 |
| DCO | 7,40 E-1 | 3.67 E-02 | 1.50 E+02 | 2.41 E+01 | / | / | 3,200 E+03 | 1.38 E+03 |
| Métaux totaux | 1,00 E-2 | 1.09 E-03 | / | / | / | / | / | 4.18 E+01 |
| MES (T, S et Ex) | 8,65 E+00 | 8.13 E+00 | 1.20 E+02 | 4.68 E+01 | / | / | 2.863 E+04 | 2,99 E+03 |
| MES (station de déminéralisation) | | | 5.20 E+03 | 4.70 E+03 | / | / | 4.897 E+05 | 1.48 E+05 |
| Sulfates (Déminé) | 9,64 E+00 | 2.79 E+00 | 2,40 E+03 | 2.20 E+03 | / | / | 2.500 E+05 | 1.62 E+05 |
| Fer (Station de déminéralisation) | 1,90 E-01 | 1.36 E-01 | 3.00 E+02 | 8.00 E+01 | / | / | 8.400 E+03 | 2,50 E+03 |
| Cuivre (Station de déminéralisation) | 2,00 E-03 | 6.69 E-04 | 3.00 E+00 | 7.53 E-01 | / | / | 1.00 E+02 | 1,47 E+01 |

L'article 5.3.1 de la décision ASN n°2017-DC-0588 demande une évaluation de la quantité annuelle de lithine rejetée. En 2021, la quantité de lithine rejetée par le CNPE de Paluel est évaluée à 179 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.

La quantité mensuelle maximale rejetée en métaux totaux s'élève pour l'année 2021 à 7.31 Kg avec une limite mensuelle de 38kg.

Il est à noter que 61 réservoirs Ex et 9 réservoirs T ont fait l'objet en 2021 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 23,604 kg d'hydrazine. Une injection de 5,82 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 3.51 kg pour les sulfates et à 2,31 kg pour le cuivre.

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

### d. Rejets d'effluents liquides chimiques via « l'émissaire 2 »

Ce paragraphe présente les rejets de substances chimiques liées au traitement biocide du CNPE de Paluel pour l'année 2021.

#### i. Cumul mensuel

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

| | AOX (kg) | Bromoformes (kg) |
|---|---|---|
| Janvier | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| Février | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| Mars | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| Avril | 0.000 E+00 | 0.000 E+00 |
| Mai | 5.308 E+03 | 1.280 E+03 |
| Juin | 7.066 E+03 | 2.392 E+03 |
| Juillet | 6.126 E+03 | 1.993 E+03 |
| Août | 3.271 E+03 | 6.648 E+02 |
| Septembre | 8.093 E+03 | 2.062 E+03 |
| Octobre | 7.289 E+03 | 2.882 E+03 |
| Novembre | 4.245 E+03 | 1.165 E+03 |
| Décembre | 1.860 E+02 | 6.100 E+01 |
| TOTAL ANNUEL | **4.16 E+04** | **1.25 E+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 2021 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2021.

| Paramètres | Unité | 2019 | 2020 | 2021 | Prévisionnel 2021 |
|---|---|---|---|---|---|
| AOX | kg | 1,57 E+04 | 2,39 E+04 | **4.16 E+04** | 3,20 E+04 |
| Bromoformes | kg | 3,90 E+03 | 7,17 E+03 | **1.25 E+04** | 3,00 E+04 |

**Commentaires :**

Les rejets sont cohérents avec les valeurs du prévisionnel 2021. Cependant, les quantités de Bromoformes rejetées ont été plus basses que celles initialement prévues en raison de la faible disponibilité des unités d'électrochloration sujettes en 2021 à de nombreuses activités de maintenance.

Un dépassement de la quantité prévue pour les rejets d'oxydants résiduels est toutefois constaté. Ce dépassement d'origine comptable est uniquement lié au changement courant 2021 de la limite de quantification (LQ) liée à la méthode de dosage du chlore qui est passée de 0.03 à 0.05 mg/l. En effet, la règle de comptabilisation spécifique aux INB consiste à comptabiliser une quantité rejetée égale à la LQ divisée par deux quand la mesure est en

dessous de la limite de quantification des moyens métrologiques employés. La quantité d'oxydants résiduels comptabilisée a ainsi atteint la valeur de 4,16 E+04 kg pour un prévisionnel annoncé de 3.20 E+04 kg.

#### iii. Comparaison aux limites

Le tableau ci-dessous présente un comparatif des valeurs de rejets relatifs au traitement biocide de l'année 2021 avec les valeurs limites de rejets fixées par la Décision ASN n°2019-DC-0676 pour chaque type de substance chimique.

| | Limite | Rejet | Limite | Rejet |
|---|---|---|---|---|
| **Paramètres** | **Concentration maximale ajoutée (mg/L)** | **Valeur maximale calculée (mg/L)** | **Flux 24h (kg)** | **Valeur maximal calculée** |
| Oxydants résiduels | 3.22 E+00 | 5.00 E-02 | 5.70 E+03 | 4.10 E+02 |
| Bromoformes | 4.00 E-01 | 1,45 E-02 | 7.15 E+02 | 1.50 E+02 |

**Commentaires** : RAS

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

#### i. Cumul mensuel

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

| | Azote global (kg) | DBO5 (kg) | DCO (kg) | MES (kg) | Phosphore total (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Janvier** | 1.463 E+02 | 1.347 E+01 | 9.709 E+01 | 5.011 E01 | 4.886 E+00 |
| **Février** | 9.498 E+01 | 6.265 E+00 | 6.014 E+01 | 1.804 E+01 | 3.183 E+00 |
| **Mars** | 7.772 E+01 | 5.960 E-01 | 4.291 E+01 | 8.582 E+00 | 1.192 E+00 |
| **Avril** | 9.767 E+01 | 2.158 E+01 | 5.126 E+01 | 1.052 E+01 | 3.669 E+00 |
| **Mai** | 9.614 E+01 | 9.244 E+00 | 9.706 E+01 | 1.918 E+01 | 5.523 E+00 |
| **Juin** | 7.009 E+01 | 6.205 E+00 | 5.285 E+01 | 1.517 E+01 | 2.413 E+00 |
| **Juillet** | 9.731 E+01 | 5.294 E+00 | 6.555 E+01 | 2.471 E+01 | 3.731 E+00 |
| **Août** | 7.782 E+01 | 3.547 E+00 | 4.434 E+01 | 1.530 E+01 | 2.483 E+00 |
| **Septembre** | 6.297 E+01 | 2.844 E+00 | 4.653 E+01 | 1.939 E+01 | 2.249 E+00 |
| **Octobre** | 4.537 E+01 | 6.848 E+00 | 1.061 E+02 | 1.352 E+02 | 4.640 E+00 |
| **Novembre** | 9.652 E+01 | 1.109 E+01 | 5.177 E+01 | 4.068 E+01 | 3.643 E+00 |
| **Décembre** | 1.495 E+02 | 7.400 E+00 | 9.250 E+01 | 5.920 E+01 | 3.515 E+00 |
| **TOTAL ANNUEL** | **1.11 E+03** | **9.44 E+01** | **8.08 E+02** | **4.16 E+02** | **4.11 E+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 2021 avec les valeurs des années précédentes et celles du prévisionnel 2021.

| Paramètres | Unité | 2019 | 2020 | 2021 | Prévisionnel 2021 |
|---|---|---|---|---|---|
| Azote global | kg | 2,26 E+03 | 8,06 E+02 | 1.11 E+03 | 1.0 E+03 |
| DBO5 | kg | 2,80 E+02 | 6,73 E+01 | 9.44 E+01 | / |
| DCO | kg | 2,88E+03 | 6,15 E+02 | 8.08 E+02 | / |
| MES | kg | 1,70 E+03 | 2,29 E+02 | 4.16 E+02 | / |
| Phosphore total | kg | 1,31E+02 | 3,54 E+01 | 4.11 E+01 | 4.5 E+01 |

**Commentaires :** Les rejets sont cohérents avec les valeurs du prévisionnel 2021. Nous observons toutefois que le recyclage des eaux d'épuration issues des lits de roseaux utilisés pour le traitement des boues avant évacuation a occasionné sur l'année 2021 un léger dépassement du prévisionnel annoncé pour les rejets d'azote global. En effet, la quantité rejetée à fin 2021 est de 1.11 E+03 kg pour un prévisionnel de 1.00 E3 kg

### iii. Comparaison aux limites

Le tableau ci-dessous permet un comparatif des valeurs de rejets de l'année 2021 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 effectif Valeur maximale mesurée (mg/l) | Limites de rejet Flux 24h (kg) | Rejet effectif Valeur maximal calculée Flux 24h (kg) | Limites de rejet Flux annuel ajouté (kg) | Rejet effectif Flux annuel ajouté (kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Azote global | / | / | 4,00 E+01 | 6,22 E+00 | / | 1,11 E+03 |
| DBO5 | 1,00 E+02 | 8,00 E+00 | 9,40 E+00 | 7,16 E-01 | / | 9,44 E+01 |
| DCO | 3,00 E+02 | 6,20 E+01 | 2,83 E+01 | 4,71 E+00 | / | 8,08 E+02 |
| MES | 1,00 E+02 | 7,90 E+01 | 9,40 E+00 | 1,23 E+00 | / | 4,16 E+02 |
| Phosphore total | / | / | 1,26 E+00 | 2,32 E-01 | / | 4,11 E+01 |

**Commentaires :** RAS

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

L'année 2021 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 2021.

## 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 : ΔT°C) est lié à la puissance thermique (Pth) à évacuer au condenseur et du 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 les décisions 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 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 suivis pour l'année 2021 est présenté dans le tableau suivant :

| | Température moyenne mesurée à la prise d'eau (entrée condenseur) (°C) | Echauffement Moyen mesuré dans les puits de rejet (°C) | Echauffement Maximum mesuré dans les puits de rejet (°C) | Température Moyenne mesurée dans les puits de rejet (°C) | Température Maximum mesuré dans les puits de rejet (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Janvier** | 8,9 | 10,9 | 14,3 | 15,3 | 23,6 |
| **Février** | 7,6 | 12,0 | 14,1 | 16,0 | 22,4 |
| **Mars** | 8,7 | 12,7 | 14,5 | 17,8 | 24,5 |
| **Avril** | 10,0 | 12,7 | 15,1 | 16,1 | 24,6 |
| **Mai** | 12,7 | 12,0 | 14,8 | 21,5 | 27,5 |
| **Juin** | 16,4 | 11,8 | 13,0 | 26,3 | 29,4 |
| **Juillet** | 18,9 | 11,6 | 13,2 | 24,8 | 33,1 |
| **Août** | 19,1 | 10,6 | 12,1 | 24,4 | 31,4 |
| **Septembre** | 19,6 | 11,2 | 12,0 | 28,0 | 31,9 |
| **Octobre** | 17,3 | 10,9 | 11,5 | 26,4 | 29,4 |
| **Novembre** | 13,7 | 10,6 | 11,4 | 22,4 | 26,3 |
| **Décembre** | 10,2 | 10,5 | 11,6 | 16,6 | 22,2 |

### 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 du rejet [1] | °C | 35 | 33,1 |
| Echauffement [2] | °C | 15 | 15,1 |

[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. Un échauffement de 15.1 °C a été mesuré dans le puits de rejet de la tranche 4 le 9 avril 2021 lors de la phase de remontée en puissance du réacteur N° 4. L'échauffement supérieur à 15°C et inférieur à 21°C d'une durée de 33 minutes est consécutif à l'arrêt de l'une des deux pompes de circulation d'eau de mer de la tranche 4. La durée de cet échauffement s'inscrit dans le respect des situations exceptionnelles d'exploitation limitées à 20 jours par an par la réglementation applicable au CNPE de Paluel (nota ci-dessus).

### 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 2021 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 programmés ou inopinés 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 complétés 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 radiamétriques (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.

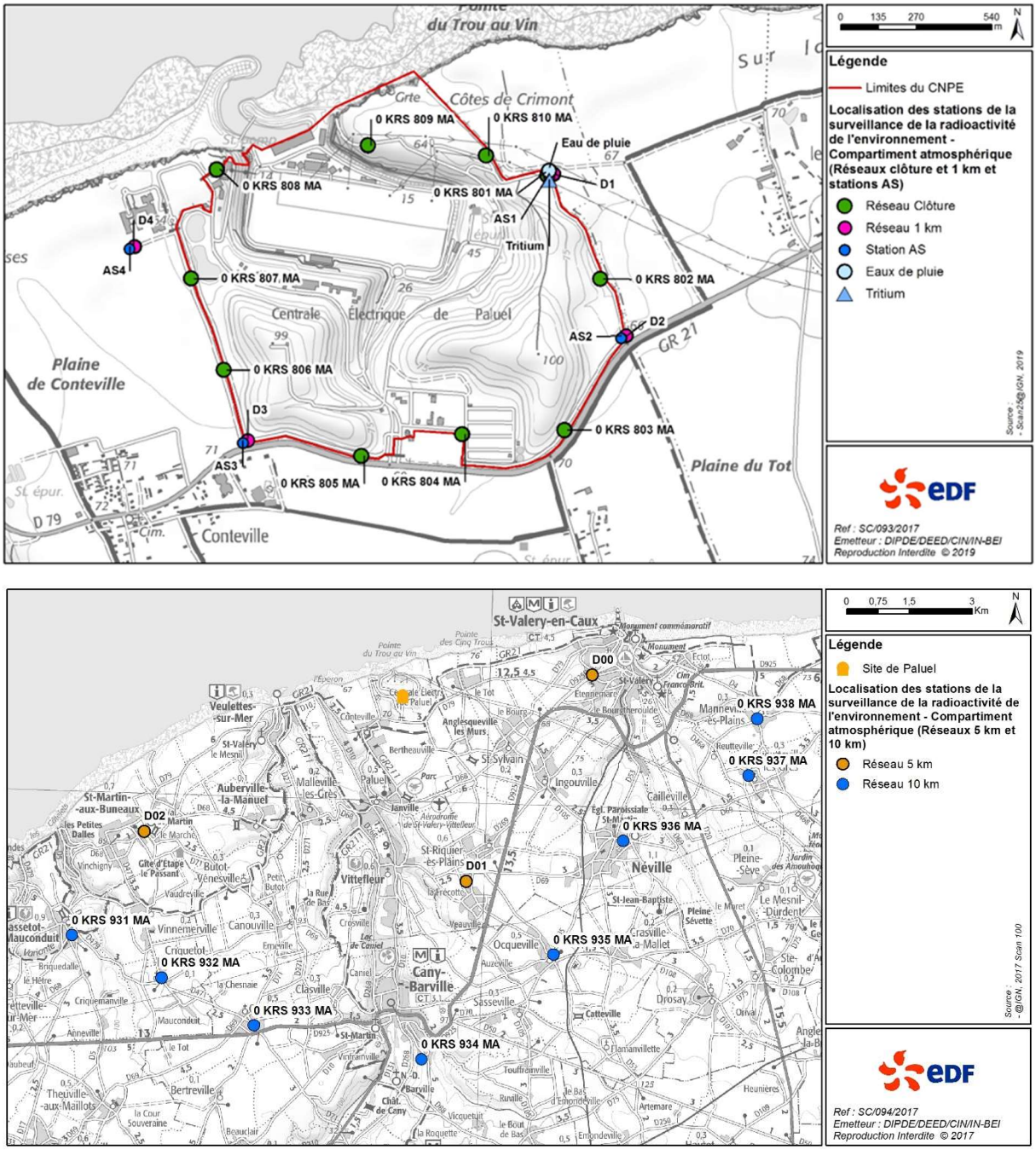



**Figure 3 : Cartes de répartition des balises radiamétriques du CNPE de Paluel**

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 2021 sont présentés dans le tableau suivant. Les débits de dose maximaux et les données relatives à l'année antérieure sont également présentés à titre de comparaison.

| Réseau de mesure | Débit de dose moyen année 2021 (nSv/h) | Débit de dose max année 2021 (nSv/h) | Débit de dose moyen année 2020 (nSv/h) | Débit de dose moyen année 2019 (nSv/h) |
|---|---|---|---|---|
| Clôture | 8,36 E+01 | 2,38 E+02 | 8,49 E+01 | 8,22 E+01 |
| 1 km | 8,19 E+01 | 7,45 E+02 | 8,61 E+01 | 8,18 E+01 |
| 5 km | 8,98 E+01 | 1,69 E+02 | 8,98 E+01 | 8,92 E+01 |
| 10 km | 9,75 E+01 | 1,31 E+02 | 9,81 E+01 | 9,70 E+01 |

**Commentaires :** Pour les quatre réseaux, les débits de dose moyens enregistrés pour l'année 2021 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 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 2021 sont donnés dans le tableau suivant.

| Compartiment | Paramètres | | Moyenne annuelle | Valeur maximale mesurée | Limite réglementaire (pour chaque analyse) |
|---|---|---|---|---|---|
| Poussières atmosphériques | Bêta globale | | < 4,33 E-04 Bq/m$^3$ | 1,79 E-3 Bq/m$^3$ | 0,01 Bq/m$^3$ |
| | Spectrométrie gamma | $^{58}$Co | < 5,73 E-06 Bq/m$^3$ | <6,95 E-06 Bq/m$^3$ | - |
| | | $^{60}$Co | < 4,39 E-06 Bq/Nm3 | < 5,47 E-06 Bq/Nm3 | - |
| | | $^{134}$Cs | < 4,06 E-06 Bq/Nm3 | < 4,58 E-06 Bq/Nm3 | - |
| | | $^{137}$Cs | < 3,67 E-06 Bq/Nm3 | < 4,08 E-06 Bq/Nm3 | - |
| | | $^{40}$K | < 1,44 E-04 Bq/Nm3 | 5,15 E-04 Bq/Nm3 | - |
| Tritium atmosphérique | | | < 1.60 E-01 Bq/m$^3$ | < 2.04 E-01 Bq/m$^3$ | 50 Bq/m$^3$ |
| Eau de pluie | Bêta globale | | < 1,97 E-01 Bq/L | 1,05 E-01 Bq/L | - |
| | Tritium | | < 5,31 E+00 Bq/L | 8,68 E+00 Bq/L | - |
| | Potassium | | 2,52 E-01 mg/L | 6,00 E-01 mg/L | - |

**Commentaires :** Les mesures de surveillance du compartiment atmosphérique pour l'année 2021 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.

### 3. Surveillance du milieu terrestre

Les résultats des mesures réalisées sur le compartiment terrestre pour l'année 2021 sont donnés dans le tableau suivant.

| Nature du prélèvement | Radionucléide | | Périodicité | Moyenne annuelle | Valeur maximale mesurée |
|---|---|---|---|---|---|
| Végétaux terrestres (Bq/kg sec) | Spectrométrie gamma sous influence | $^{58}$Co | Mensuelle | < 5.17 E-01 | < 5.59 E-01 |
| | | $^{60}$Co | | < 5.59 E-01 | < 6.16 E-01 |
| | | $^{134}$Cs | | < 4.58 E-01 | < 4.87 E-01 |
| | | $^{137}$Cs | | < 4.71 E-01 | < 4.99 E-01 |
| | | $^{40}$K | | 8.30 E+02 | 1.31 E+03 |
| | Spectrométrie gamma hors influence | $^{58}$Co | | < 5.10 E-01 | < 5.39 E-01 |
| | | $^{60}$Co | | < 5.69 E-01 | < 6.22 E-01 |
| | | $^{134}$Cs | | < 4.58 E-01 | < 4.94 E-01 |
| | | $^{137}$Cs | | < 4.72 E-01 | < 4.99 E-01 |
| | | $^{40}$K | | 8.60 E+02 | 1.30 E+03 |
| Lait (Bq/L) | Spectrométrie gamma sous influence | $^{58}$Co | Mensuelle | < 1.24 E-01 | < 1.77 E-01 |
| | | $^{60}$Co | | < 1.34 E-01 | < 1.49 E-01 |
| | | $^{134}$Cs | | < 1.31 E-01 | < 1.35 E-01 |
| | | $^{137}$Cs | | < 1.32 E-01 | < 1.43 E-01 |
| | | $^{40}$K | | 4.88 E+01 | 5.40 E+01 |

**Commentaires :** Les résultats des mesures annuelles réalisées sur le compartiment terrestre ainsi que leur interprétation pour l'année 2020 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 2021 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 | 1,16 E+01 | 1,25 E+01 |
| | | mensuelle Hors influence | Bq/L | 1,17 E+01 | 1,27 E+01 |
| | Tritium | Bi-mensuelle Sous influence | Bq/L | < 1,24 E+01 | 3,53 E+01 |
| | | mensuelle Hors influence | Bq/L | <7 ,97 E+00 | 1,66 E+01 |
| | Potassium | Bi-mensuelle Sous influence | mg/L | 4,08 E+02 | 4,30 E+02 |
| | | mensuelle Hors influence | mg/L | 4,07 E+02 | 4,35 E+02 |
| Matières en suspension | Activité bêta globale | Bi-mensuelle Sous influence | Bq/L | 7,14 E-02 | 2,26 E-01 |
| | | mensuelle Hors influence | Bq/L | 2,62 E-02 | 6,29 E-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 KER(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 KER(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 2020 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 | <5,15 E+00 |
| Bêta global | Bq/L | 1,48 E+00 |
| Bêta global des matières en suspension | Bq/L | 3,76 E-02 |
| Potassium | mg/L | 5,10 E+01 |

**Commentaires :** RAS

## 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 | - | 9,4 |
| Conductivité | µS / cm | 6,29 E+03 |
| Hydrocarbures totaux | mg / l | 2,00 E-01 |
| DCO | | 4,62 E+02 |
| COT | | 5,30 E+00 |
| Azote global | | 8,83 E+00 |
| Métaux totaux | | 3,21 E-01 |
| Sulfates | | 4,46 E+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 l'IFREMER, au niveau des stations canal d'amenée, rejet et point de référence hors influence des rejets du CNPE, 3 campagnes annuelles (printemps, été et automne) de mesure 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 2021, 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 2021 sont résumés ci-après.*

*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. Cette année 2021 n'a rien d'exceptionnel, un peu plus douce et un peu moins pluvieuse que la normale, mais cette moyenne masque des températures et des précipitations contrastées suivant les mois. Après un mois de janvier de saison, les mois de février et mars sont plus doux, au contraire des mois d'avril et mai plus frais. À partir de juin, à l'exception du mois d'août pour lequel on relève des températures maximales fraîches pour la saison, les températures sont supérieures aux normales, et l'année se termine avec un mois de décembre aux allures de printemps.*

***Les salinités** relevées au cours de l'année, sont proches de la médiane historique à chaque saison. Ceci peut s'expliquer par un débit moyen annuel relativement proche de la moyenne des écoulements mensuels calculés sur ces 55 dernières années pour la Durdent. De plus, les débits de la Seine se caractérisent par deux écarts nettement supérieurs à la moyenne (1975-2020), observés en février (+612m3/s) et en juillet (+287m3/s). A noter également que les débits des mois de mars, avril, mai et novembre sont à l'inverse, tous inférieurs au minimum de 100 m3/s à la moyenne historique.*

*Le suivi 2021 des **sels nutritifs** montre des concentrations relativement faibles au printemps et en automne pour tous les éléments azotés, ce qui peut être relié à l'utilisation de ces sels nutritifs par le phytoplancton au début d'une période productive (« Bloom » printanier). Les valeurs estivales de sels nutritifs montrent des niveaux de consommation de nutriments classiques pour les nitrates et les silicates, et des concentrations légèrement inférieures aux médianes interannuelles pour le reste des sels nutritifs. En automne, le stock en nutriment se recharge avec un léger retard, dû principalement à une pluviométrie inférieure à la moyenne à cette période de l'année. Le cycle saisonnier attendu des sels nutritifs est ainsi légèrement perturbé par la condition météorologique.*

*L'année 2021 est la sixième année de mesure de l'**oxygène dissous**. Les concentrations relevées sont proches de la valeur de référence attendue en Manche Atlantique et aucun état d'hypoxie ou d'anoxie n'a été observé sur l'ensemble de la zone d'étude au cours de cette année. Une nouvelle fois en 2021, des concentrations en **Matières en Suspension (MES)** relativement élevées au regard de la série historique ont été observées, notamment au cours de l'été au point Canal. A l'instar de l'oxygène dissous, la mesure de la **turbidité** par néphélométrie a été mise en place en 2016. En 2021 la plus forte valeur de turbidité a été mesurée au printemps au point Rejet. Néanmoins, une certaine homogénéité caractérise les trois campagnes. Par ailleurs, au cours de ces trois saisons, la turbidité et la matière en suspension ont diminué de la côte vers le large. Cette variabilité spatiale est conforme à ce qui est généralement observé en zone côtière. Les remises en suspension sur les petits fonds côtiers, les apports continentaux par les bassins versants ainsi que des biomasses*

*phytoplanctoniques généralement plus élevées à la côte, 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.

Les conclusions de la surveillance exercée sur l'année 2021 sont :

*Concernant les concentrations des formes de **trihalométhanes**, cette année, deux valeurs apparaissent supérieures à la LQ, au point Rejet et Canal lors de la campagne d'été, avec une concentration en Bromoforme de 4,9 et 0,85 µg/L respectivement, inférieur au seuil écotoxicologiques de la PNEC chronique fixée à 7,86 µg/L.*

*En conclusion, les données relatives au compartiment hydrologique acquises en 2021 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 Rejets. 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 2021 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

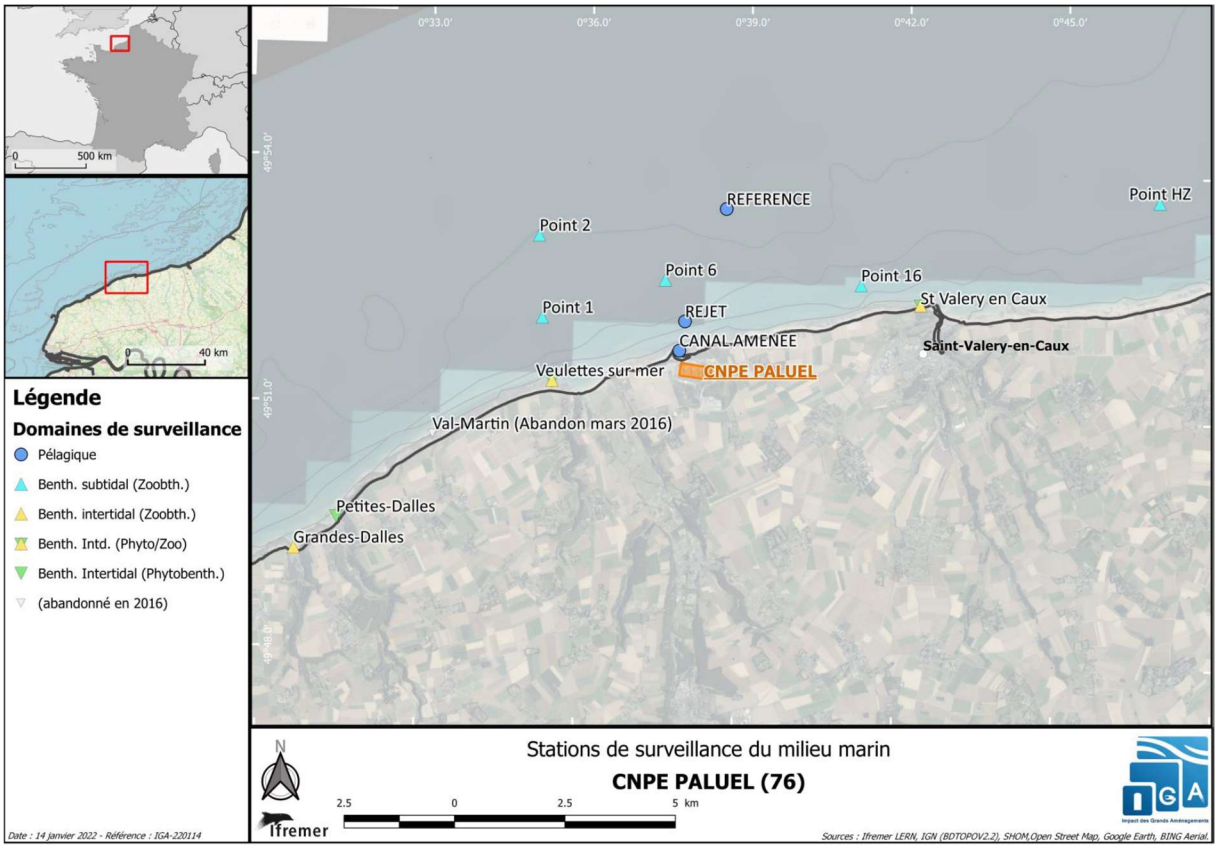
La synthèse du rapport de surveillance, réalisée par IFREMER est présentée ci-dessous.

*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 des centrales 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, une surveillance écologique du milieu récepteur du CNPE de PALUEL est mise en œuvre par l'exploitant. Cette surveillance a été initiée il y a 42 ans (en 1978).*

*La stratégie mise en œuvre 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'amenée* (en surface) *Rejet*, (en surface) *Référence* (en surface) **Date des campagnes 2021 :** 12 avril 2021 (PRINTEMPS) 16 juin 2021 (ETE) 14 septembre 2021 (AUTOMNE) |
| | | Salinité | |
| | Physico-chimie / Chimie[2] | Sels azotés (Ammonium, Nitrates, Nitrites) | |
| | | Turbidité | |
| | | Oxygène dissous | |
| | | Phosphates | |
| | | Silicates | |
| | | Trihalométhanes ou Haloformes (Bromoforme, Chloroforme, Dibromochlorométhane, Dichloromonobromométhane ) | |
| | | Matières en suspension | |
| | Phytoplancton | Composition floristique (Flore Totale) | |
| | | Biomasse Chlorophyllienne (Chlorophylle *a*) | |
| | | Phéopigments | |
| | | Production primaire | |
| | Zooplancton | Dénombrement faunistique | |
| | | Biomasse sestonique | |
| | | Dosage Carbone | |
| | | Dosage Azote | |
| | Micro-organismes[2] | Vibrions halophiles | |
| Benthique | Zoobenthos intertidal[2] | Population d'idotées (abondance, biométrie) | 3 radiales : Saint-Valéry-en-Caux ; Veulettes/Mer et Grandes-Dalles[3] 24 juin et du 25 au 27 juillet 2021 |
| | | Biomasse algale (*Fucus vesiculosus*) | |
| | Zoobenthos subtidal | Macrofaune (abondance) | 5 points : 1, 2, 6, 16 et HZ 3 mai et 8 octobre 2021 |
| | | Granulométrie | |
| | Phytobenthos intertidal[4] | Populations de *Fucus serratus* (biomasse, longueur des thalles, fertilité) | 3 radiales : Saint-Valéry-en-Caux, Veulettes/Mer Petites Dalles 28 mars et 7 sept. 2021 |
| Halieutique | Pêches | Suivis des pêches artisanales : production annuelle et mensuelle, nb de navire, CPUE[5], espèces, type d'engins, principaux ports d'exploitation | Fécamp et Dieppe Année 2020 |

*Dans le domaine du **phytoplancton**, l'année a été caractérisée par des valeurs s'inscrivant dans la norme de ce qui a été observé historiquement. Néanmoins, au printemps, il faut noter les concentrations élevées en chlorophylle-a mesurées sur le point Rejet, ainsi que des phéopigments sur l'ensemble des stations. La faible concentration en nutriments est cohérente avec une récente consommation par le phytoplancton, et les valeurs élevées des phéopigments ainsi que faibles pour le rETR, dénotent la forte pression de broutage de la part du zooplancton (où des abondances élevées des copépodes ont été observées). Les espèces dénombrées sont communément observées sur la zone. Le cycle saisonnier du phytoplancton, ainsi que la structure des communautés phytoplanctoniques observées en 2021 ne présentent pas de caractéristiques pouvant mettre en cause l'activité du CNPE de Paluel. La variabilité spatio-temporelle observée est principalement liée à l'évolution des conditions environnementales (e.g. concentrations en sels nutritifs, lumière, turbulence) et semble cohérente avec les connaissances que nous avons de ces paramètres en Manche.*

*Dans le domaine de la **Microbiologie**, l'année 2021 se distingue par une certaine variabilité saisonnière : au printemps, une présence de vibrions au point Rejet à une concentration élevée pour la saison, et en automne des mesures plus conformes à la dynamique habituelle. La composition spécifique est quant à elle conforme à celle observée depuis de nombreuses années : peuplement dominé par la souche V. alginolyticus et ponctuellement accompagnée*

*des souches V. parahaemolyticus (point Rejet au printemps) et V. vulnificus (point Canal à l'automne). Ainsi, au cours de l'année 2021, l'analyse des paramètres du compartiment microbiologique à travers les vibrions halophiles cultivables à 37°C n'a pas mis en évidence de résultats particuliers pouvant être mis en relation avec l'activité du CNPE de Paluel.*

*En 2021, les* ***abondances zooplanctoniques*** *printanières étaient supérieures aux valeurs historiques, probablement en raison d'une campagne d'échantillonnage plus tardive qu'habituellement dans la saison. Lors des deux campagnes suivantes, les abondances des points Canal et Référence étaient conformes aux valeurs moyennes historiques de la série 1988-2020, alors que celles du point Rejet étaient supérieures, particulièrement 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 2021 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,*** *la disparition de la moulière, observée entre 1977 et 1988, entraîne une stabilisation de l'évolution sédimentaire à l'ouest de la zone d'étude, situation qui se maintient en 2021. A l'est du site, les fonds sont constitués de sables hétérogènes. Les sédiments de cette zone tendent d'ailleurs à devenir plus grossiers depuis quelques années, même si la tendance à l'air de s'inverser durant l'année 2021. Cette évolution sédimentaire va fortement impacter la macrofaune benthique qui s'y développe. Les stations de l'ouest abritaient au début du suivi une moulière subtidale, celle-ci régressant pour laisser place à une communauté dominée par les Ascidies entre 1992 et 2014. Cette communauté s'est maintenue jusqu'en 2015 quand elle a été remplacée par une communauté dominée par les Balanes et les Vers tubicoles Spirobranchus. Cette communauté, même si elle reste la plus diversifiée et la plus densément peuplée en 2021, semble en régression depuis 2020. A noter une prolifération très importante des balanes sur les stations 1 et 2 durant l'hiver 2020-2021, entrainant les abondances les plus élevées mesurées depuis le début du suivi, dépassant d'un facteur 4 les maximales recensées en 2019. Leur quasi disparition dans les prélèvements de l'automne semble indiquer soit un évènement très transitoire, soit un évènement très localisé, la zone touchée au printemps n'ayant pas été retrouvée à l'automne. Sur l'est du site, deux communautés principales vont alterner en fonction de la nature des fonds. Enfin, à partir de 2015, avec le développement des balanes et des spirobranchus sur l'ensemble du site d'étude, toutes les stations sont largement dominées par la communauté des cailloutis. Enfin, l'intrusion des populations d'Ophiothryx fragilis, ophiure typique des fonds graveleux en Manche à plus de 20 m de profondeur, fréquente sur la station 2, n'est que faiblement observé au printemps 2021 et disparait quasiment durant l'été (1 seul individu récolté). 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'apparait pas d'effet détectable du fonctionnement du CNPE de Paluel sur la nature des fonds ou la faune associée.*

*En* ***zone intertidale****, le petit crustacé isopode* ***Idotea granulosa*** *se trouve dans sa limite méridionale de répartition. A ce titre, il peut être considéré comme un indicateur potentiel de l'influence thermique du rejet du circuit de refroidissement du CNPE. La dégradation des habitats, jugée irrémédiable sur la radiale historique de Veulettes-sur-Mer, a conduit en 2020, à envisager de rapprocher la zone de suivi des idotées de celle des prélèvements du*

*phytobenthos. D'autre part, un nouveau site (Grandes Dalles) a été prospecté en 2021, en remplacement de "Petites Dalles" qui s'est révélé inadapté aux critères de surveillance réglementaires en 2020. En 2021, la biomasse de Fucus est bien supérieure aux moyennes historiques, y compris sur la nouvelle radiale des Grandes Dalles, avec, sur les sites historiques, une forte progression par rapport à l'année précédente. De même les populations d'idotées augmentent légèrement par rapport à 2020, de façon d'ailleurs notable sur le site de Saint Valéry-en-Caux, mais restent bien inférieures aux moyennes historiques, s'inscrivant ainsi dans la régression continue et générale depuis 2007. Les densités rapportées à la biomasse d'algues suivent une dynamique très similaire, signe que la régression des populations d'idotées n'est pas une résultante de l'évolution des populations d'algues. Depuis 2007, et malgré quelques rebonds ponctuels, la régression des idotées se poursuit, et le phénomène semble toucher à l'ensemble du littoral cauchoix, indépendamment des niveaux de développement des ceintures algales. Il s'inscrit très probablement dans un contexte plus global, impossible à appréhender sur la seule base des données actuellement disponibles.*

*Les **biomasses de Fucus serratus** évaluées en 2021 sont quasiment toutes à des niveaux égal ou inférieur aux moyennes calculées sur les périodes de suivi. Il est à noter que pour Les Petites Dalles la biomasse observée en mars a progressé en 2021 (comme en 2020), ainsi qu'en septembre 2021. Les années 2006-2007 marquent une période charnière dans les observations des biomasses algales. 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. Néanmoins, les données acquises en 2021 ne mettent pas en évidence d'influence significative du fonctionnement du CNPE sur ces mêmes populations.*

*La **production halieutique** (zone 28F0 définie par le CIEM-Conseil International pour l'Exploration de la Mer) en 2020 a été d'environ 2 119 tonnes soit la plus faible quantité débarquée depuis le début du suivi. L'année 2020 est aussi caractérisée par un niveau de capture par unité d'efforts parmi les plus faibles depuis le début de la série. Cette diminution peut être attribuée au : (i) changement d'activité des professionnels qui pratiquent aujourd'hui le métier des engins dormants et (ii) une activité des bateaux particulièrement impactée par la crise du covid amplifiée par les conséquences d'un hiver très tempétueux. 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, le suivi écologique et halieutique réalisé à proximité du CNPE de Paluel en 2021 ne met pas en évidence d'influence du fonctionnement du CNPE sur les différents compartiments des domaines pélagique, benthique et halieutique.***

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 nucléaire 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 1er 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 proximité dans un rayon de 10km (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, Tchernobyl, …). 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 efficace[3] 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…).

[3] La **dose efficace** est la somme des doses absorbées par tous les tissus, pondérée d'un facteur radiologique $W_R$ ($W_R$ = 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 $W_T$ ($W_T$ = 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** ».

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 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 :

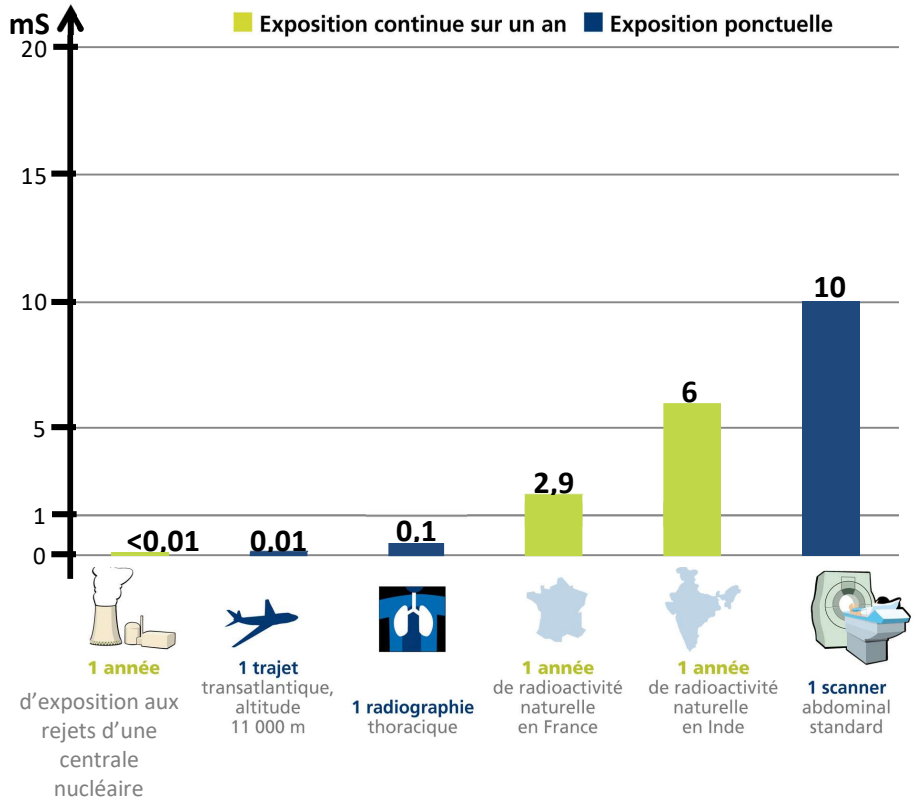



**Figure 4 : Echelle des ordres de grandeur de doses résultant de situations courantes et comparaison aux seuils réglementaires (Source : EDF)**

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 2 ci-après.

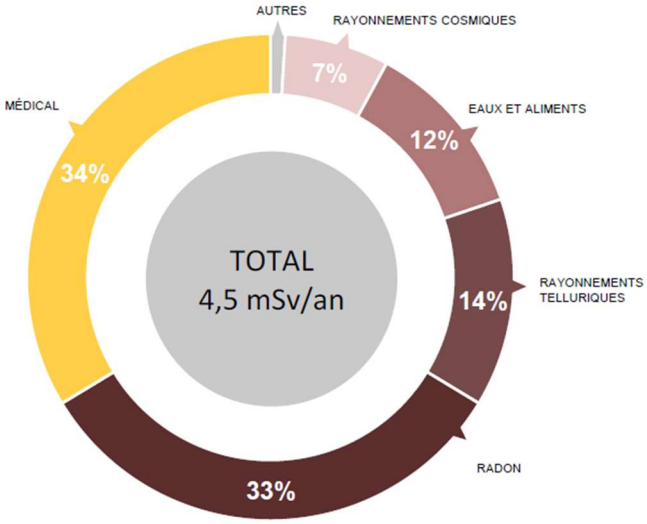



**Figure 5 : Part relative des différentes sources d'expositions de la population française aux rayonnements ionisants (Source : Bilan IRSN 2021)**

Les tableaux suivants fournissent les valeurs de dose efficace totale calculées à partir des rejets radioactifs réels de l'année 2021 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 | 6,7E-05 | 6,8E-05 |
| Rejets d'effluents liquides | 1,4E-07 | 1,8E-04 | 1,8E-04 |
| **Total** | **1,8E-06** | **2,4E-04** | **2,4E-04** |

| ENFANT DE 10 ANS | Exposition externe (mSv) | Exposition interne (mSv) | Total (mSv) |
|---|---|---|---|
| Rejets d'effluents à l'atmosphère | 1,6E-06 | 6,9E-05 | 7,1E-05 |
| Rejets d'effluents liquides | 4,8E-07 | 9,1E-05 | 9,2E-05 |
| **Total** | **2,0E-06** | **1,6E-04** | **1,6E-04** |

| ENFANT DE 1 AN | Exposition externe (mSv) | Exposition interne (mSv) | Total (mSv) |
|---|---|---|---|
| Rejets d'effluents à l'atmosphère | 1,5E-06 | 9,4E-05 | 9,5E-05 |
| Rejets liquides | 1,8E-07 | 2,2E-05 | 2,2E-05 |
| **Total** | **1,7E-06** | **1,2E-04** | **1,2E-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 2021 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.

<table>
<tr><th>Types déchet</th><th>Niveau d'activité</th><th>Durée de vie</th><th>Classification</th><th>Conditionnement</th></tr>
<tr><td>Filtres d'eau et résines primaires</td><td>Faible et Moyenne</td><td rowspan="8">Courte</td><td>FMA-VC (faible et moyenne activité à vie courte)</td><td>Fûts, coques</td></tr>
<tr><td>Filtres d'air</td><td rowspan="7">Très faible, Faible et Moyenne</td><td rowspan="7">TFA (très faible activité), FMA-VC</td><td rowspan="7">Casiers, big-bags, futs, coques, caissons</td></tr>
<tr><td>Résines secondaires</td></tr>
<tr><td>Concentrats, boues</td></tr>
<tr><td>Pièces métalliques</td></tr>
<tr><td>Matières plastiques, cellulosiques</td></tr>
<tr><td>Déchets non métalliques (gravats...)</td></tr>
<tr><td>Déchets graphite</td><td>Faible</td><td rowspan="2">Longue</td><td>FA-VL (faible activité à vie longue)</td><td>Entreposage sur site</td></tr>
<tr><td>Pièces métalliques et autres déchets actives</td><td>Moyenne</td><td>MA-VL (moyenne activité à vie longue)</td><td>Entreposage sur site (en piscine de refroidissement pour les grappes et autres déchets actives REP)</td></tr>
</table>

## 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.

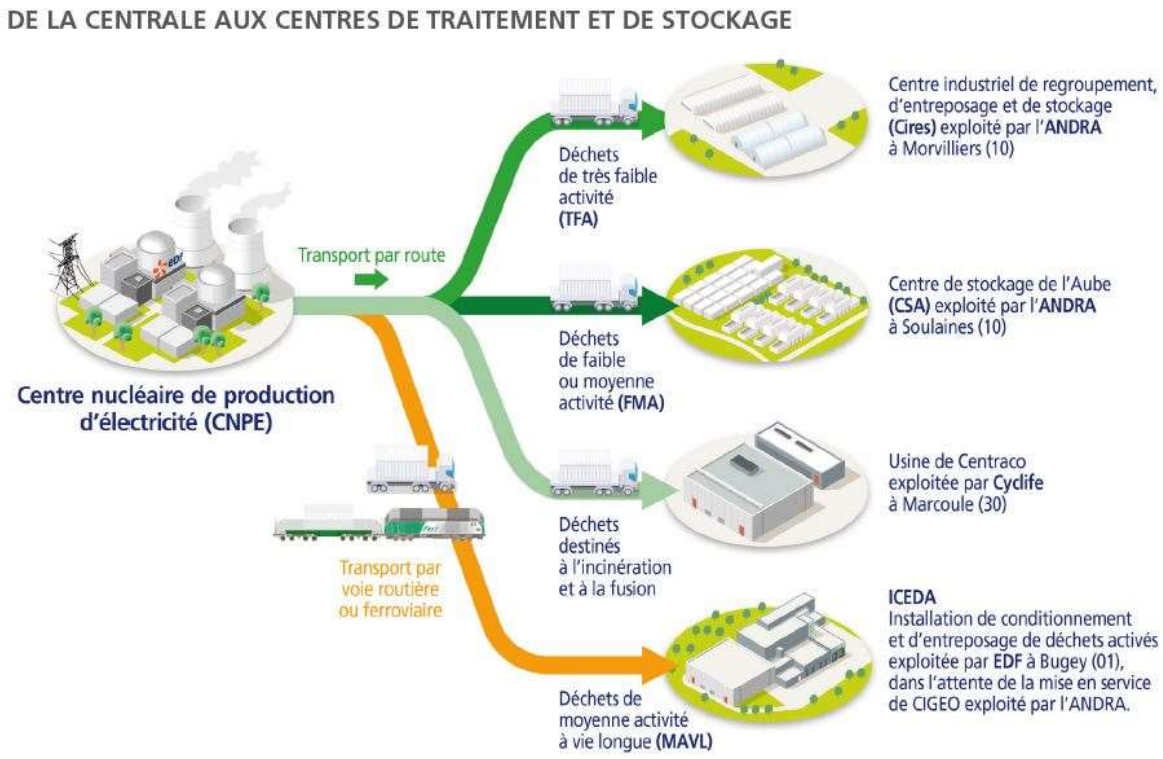



**Figure 6 : Transport des déchets radioactifs (Source : EDF)**

## 3. Les quantités de déchets entreposées au 31/12/2021

Le tableau suivant présente les quantités de déchets en attente de conditionnement au 31 décembre 2021 pour les 4 réacteurs en fonctionnement du CNPE de Paluel.

| Catégorie déchet | Quantité entreposée au 31/12/2021 | Commentaires |
|---|---|---|
| TFA | 277 tonnes (Aire TFA) | En conteneurs sur l'aire TFA |
| FMAVC (Liquides) | 51,5 tonnes (Huilerie TFA) | Effluents du lessivage chimique, huiles, solvants… |
| FMAVC (Solides) | 5 tonnes (BAC)<br>196 tonnes (BAN) | Localisation Bâtiment des Auxiliaires Nucléaire (BAN) et Bâtiment Auxiliaire de Conditionnement (BAC) |
| MAVL | 247 grappes<br>36 carquois<br>73 étuis | Concerne les grappes et les étuis dans les piscines de désactivation (déchets technologiques, galette inox, bloc béton et chemise graphite) |

Le tableau suivant présente les quantités de déchets conditionnés en attente d'expédition au 31 décembre 2021 pour les 4 réacteurs en fonctionnement du CNPE de Paluel.

| Catégorie déchet | Quantité entreposée au 31/12/2021 | Type d'emballage |
|---|---|---|
| TFA | 78 colis | Tous types d'emballage confondus |
| FMAVC (Solides) | 122 colis | Coques béton |
| | 139 colis | Fûts (métalliques, PEHD) |
| | | Autres (caissons, pièces massives…) |

Le tableau suivant présente le nombre de colis évacués et les sites d'entreposage en 2021 pour les 4 réacteurs en fonctionnement du CNPE de Paluel.

| Site destinataire | Nombre de colis évacués |
|---|---|
| Cires à Morvilliers | 131 colis |
| CSA à Soulaines | 571 colis |
| Centraco à Marcoule | 1200 colis |

En 2021, 1902 colis ont été évacués vers les différents sites de traitement ou de stockage appropriés (Centraco, Andra ou ICEDA).

## 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 2021 par les INB d'EDF.

| Quantités 2021 en tonnes | Déchets dangereux | | Déchets non dangereux non inertes | | Déchets inertes | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Produits | Valorisés | Produits | Valorisés | Produits | Valorisés | Produits | Valorisés |
| Sites en exploitation | 11 316 | 9 782 | 41 512 | 34 966 | 124 577 | 124 502 | 177 404 | 169 250 |
| Sites en déconstruction | 135 | 44 | 964 | 878 | 1 618 | 1 618 | 2 717 | 2 540 |

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 sur les INB d'EDF reste conséquente en 2021 du fait de la poursuite d'importants chantiers, liés notamment aux chantiers de modifications post Fukushima, au projet Grand Carénage, ainsi qu'à des chantiers de voirie, d'aménagement de zones d'entreposage, de parkings, de bâtiments tertiaires et des chantiers de rénovation des systèmes de traitement des eaux usées. 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 2021, les 4 unités de production du CNPE de Paluel ont produit 9 313 tonnes de déchets conventionnels : 98,8 % 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 2020

Le rapport Suivi radioécologique annuel du CNPE de Paluel pour l'année 2020 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
BP 48 – 76450 CANY BARVILLE
Numéro de téléphone 02.35.57.66.66

Les données de ce rapport ne sont utilisables qu’après l’accord d’EDF

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

# PALUEL

**2021**

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

# LISTE DES PIECES JOINTES

**Annexe 1** - Suivi radioécologique annuel des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord pour l'année 2020 (IRSN). Parties du rapport relatives au CNPE de Paluel.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
*Liberté*
*Égalité*
*Fraternité*

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

RAPPORT

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

## ANNÉE 2020

**Pôle Santé et Environnement**

Rapport IRSN N° **2022-00075**

MEMBRE DE ETSON

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

## RÉSUMÉ

L'objectif du suivi radioécologique des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord est de caractériser les niveaux de radioactivité dans l'environnement proche de ces sites dans quelques matrices représentatives des compartiments terrestre et marin. Il s'agit d'identifier les sources, passées ou présentes, à l'origine de la présence des radionucléides mesurés dans l'environnement des sites et d'analyser l'évolution temporelle de leurs activités dans les matrices.

Pour le compartiment terrestre, le $^{137}$Cs est détecté dans la plupart des échantillons prélevés (7 fois sur 10), à des niveaux comparables à ceux des années précédentes. Ce radionucléide artificiel est issu des retombées des essais aériens d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl. En 2020, les activités en $^{131}$I dans les mousses terrestres sont restées inférieures aux seuils de décision. Les activités du tritium en milieu terrestre sont comparables à celles mesurables en dehors de tout apport local par une installation, hormis dans l'environnement des CNPE de Paluel, Penly, et Gravelines, pour lesquels on mesure un apport local en tritium libre et/ou en tritium organiquement lié dans l'herbe (Paluel et Penly) ou le lierre (Gravelines) échantillonnés à proximité immédiate de ces CNPE (moins de 1,5 km). Les activités en $^{14}$C en milieu terrestre sont comparables à celles mesurables en dehors de tout apport local par une installation, ou témoignent d'un apport local pour le lait à proximité des CNPE de Paluel (9,6 km du CNPE) et de Penly (7,0 km du CNPE), sans que la contribution des rejets du site ne soit démontrée, hormis pour les mesures trimestrielles dans l'herbe et le lierre dans l'environnement des CNPE de Flamanville, Paluel et Gravelines.

Pour le compartiment marin, le $^{137}$Cs, détecté dans la plupart des matrices marines à l'exception d'un échantillon d'algues, d'un échantillon de sédiments, de deux échantillons de mollusques et de cinq échantillons de crustacés, à des niveaux comparables à ceux des années précédentes, est vraisemblablement issu des rejets d'effluents liquides de l'usine de traitement du combustible usé ORANO La Hague, ainsi que dans une moindre mesure, des rejets d'effluents liquides des CNPE côtiers et des retombées des essais aériens nucléaires et de l'accident de Tchernobyl. On observe également un marquage de l'environnement marin des CNPE de Flamanville, Paluel, Penly et Gravelines par le $^{60}$Co, le $^{134}$Cs, le $^{108m}$Ag, le $^{110m}$Ag, le $^{106}$Rh, et le $^{241}$Am, qui ont pour la plupart une double origine (communs aux rejets d'effluents liquides des CNPE et de l'usine de retraitement du combustible usé ORANO La Hague, hormis pour le $^{241}$Am et le $^{106}$Rh, présents uniquement dans les rejets d'ORANO La Hague, et le $^{108m}$Ag, dont l'origine est incertaine). En 2020, les activités en $^{131}$I sont restées inférieures aux seuils de décision dans les algues dans l'environnement des CNPE de la Manche et de la Mer du Nord. En 2020, les activités en tritium organiquement lié dans les crustacés, les mollusques et les poissons sont globalement cohérentes avec les valeurs mesurées les années précédentes et attendues du fait des niveaux d'activités mesurables dans l'eau de mer en Manche et majoritairement imputables à la dispersion des rejets d'effluents liquides de l'usine ORANO La Hague, mais témoignent toutefois d'un marquage en tritium lié en champ proche des CNPE de Flamanville, Penly et Gravelines par rapport aux échantillons prélevés en champ lointain de ces CNPE pour 5 des 21 échantillons. Les activités en $^{14}$C quantifiées au sein des crustacés, des mollusques et des poissons sont globalement supérieures au bruit de fond hors influence industrielle, mais cohérentes avec les valeurs moyennes enregistrées par le passé du fait du marquage global par les INB de la Manche, et notamment de la proximité de l'usine ORANO La Hague. Ce marquage en $^{14}$C tend à être plus prononcé au voisinage des points de rejet d'effluents liquides des CNPE pour les mollusques (Flamanville) et pour les poissons (Penly).


IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# TABLE DES MATIÈRES


**0. OBJECTIFS ..... 15**

**1. MÉTHODOLOGIE DU SUIVI RADIOÉCOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT PROCHE DES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ FRANÇAIS ..... 15**

**2. ORIGINE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT DES CNPE FRANÇAIS DE LA MANCHE ET DE LA MER DU NORD ..... 15**

**2.1. Radionucléides d'origine naturelle ..... 16**

2.1.1. Origine tellurique ..... 16

2.1.2. Rayonnement cosmique et comportement du tritium et du $^{14}C$ ..... 16

**2.2. Radionucléides d'origine artificielle ..... 17**

2.2.1. Retombées des essais aériens d'armes nucléaires et des chutes de satellites ..... 17

2.2.2. Retombées de l'accident de Tchernobyl ..... 19

2.2.3. Retombées de l'accident de Fukushima-Daiichi ..... 20

2.2.4. Installations nucléaires exploitées par EDF ..... 21

2.2.5. Autres activités ..... 22

**3. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET GÉOGRAPHIQUE ..... 23**

**3.1. Climatologie ..... 23**

**3.2. Géologie et hydrogéologie ..... 23**

**3.3. Hydrographie et hydrologie ..... 24**

**4. ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE FLAMANVILLE ..... 27**

**4.1. Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures ..... 27**

**4.2. État radiologique de l'environnement terrestre ..... 29**

4.2.1. Stratégie d'échantillonnage ..... 29

4.2.2. Résultats et interprétation ..... 32

**4.3. État radiologique de l'environnement aquatique ..... 33**

4.3.1. Stratégie d'échantillonnage ..... 33

4.3.2. Résultats et interprétation ..... 37

**4.4. Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Flamanville ..... 39**

**4.5. Tableaux de résultats ..... 40**

**5. ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE PALUEL ..... 61**

**5.1. Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures ..... 61**

**5.2. État radiologique de l'environnement terrestre ..... 63**

5.2.1. Stratégie d'échantillonnage ..... 63

5.2.2. Résultats et interprétation ..... 66

**5.3. État radiologique de l'environnement aquatique ..... 67**


IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

5.3.1. Stratégie d'échantillonnage ..... 67
5.3.2. Résultats et interprétation ..... 71
**5.4. Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Paluel ..... 73**
**5.5. Tableaux de résultats ..... 75**

**6. ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE PENLY ..... 95**
**6.1. Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures ..... 95**
**6.2. État radiologique de l'environnement terrestre ..... 97**
6.2.1. Stratégie d'échantillonnage ..... 97
6.2.2. Résultats et interprétation ..... 100
**6.3. État radiologique de l'environnement aquatique ..... 101**
6.3.1. Stratégie d'échantillonnage ..... 101
6.3.2. Résultats et interprétation ..... 104
**6.4. Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Penly ..... 105**
**6.5. Tableaux de résultats ..... 106**

**7. ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DU CNPE DE GRAVELINES ..... 125**
**7.1. Généralités et chronologie des études radioécologiques antérieures ..... 125**
**7.2. Etat radiologique de l'environnement terrestre ..... 127**
7.2.1. Stratégie d'échantillonnage ..... 127
7.2.2. Résultats et interprétation ..... 130
**7.3. État radiologique de l'environnement aquatique ..... 131**
7.3.1. Stratégie d'échantillonnage ..... 131
7.3.2. Résultats et interprétation ..... 134
**7.4. Conclusion de l'état radiologique de l'environnement du CNPE de Gravelines ..... 136**
**7.5. Tableaux de résultats ..... 137**

**8. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT RADIOÉCOLOGIQUE DE LA MANCHE ET DE LA MER DU NORD ..... 158**
**8.1. Radioécologie du milieu terrestre ..... 158**
**8.2. Radioécologie du milieu marin ..... 159**

**9. BIBLIOGRAPHIE ..... 163**

**10. ANNEXES ..... 165**

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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]).....16

Figure 1 – Activités de $^{3}H$ dans l'eau de pluie d'après [1]. .....18

Figure 3 – Évolution de l'activité spécifique du $^{14}C$ dans l'hémisphère nord depuis 1950 (tirée de [3]). .....19

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 [19]. .....20

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]). .....21

Figure 6 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Flamanville. .....28

Figure 7 - Localisation du CNPE de Flamanville et des stations terrestres échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020. .....31

Figure 9 - Localisation du CNPE de Flamanville et des stations marines échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020. .....36

Figure 12 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Paluel.....62

Figure 13 - Localisation du CNPE de Paluel et des stations terrestres échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020. .....65

Figure 15 - Localisation du CNPE de Paluel et des stations marines échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020. .....70

Figure 18 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Penly.....96

Figure 19 - Localisation du CNPE de Penly et des stations terrestres échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020. .....99

Figure 21 - Localisation du CNPE de Penly et des stations marines échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020. .....103

Figure 24 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Gravelines. .....126

Figure 25 - Localisation de CNPE de Gravelines et des stations terrestres échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020. .....129

Figure 27 - Localisation du CNPE de Gravelines et des stations marines échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020. .....133

Figure 30 - Activités en tritium libre ($Bq.L^{-1}$ 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 $Bq.L^{-1}$ à distance de l'usine ORANO [3, 26, 27]). .....160

Figure 31 - Activités en $^{60}Co$ et en $^{137}Cs$ mesurées dans les algues échantillonnées en 2020 dans l'environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord. .....161

Figure 32 - Activités en $^{14}C$ ($Bq.kg^{-1}$ 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

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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., 240±2 Bq.kg$^{-1}$ C d'après [3]). ..... 161

Figure 12.1 - Démarche utilisée pour la réalisation du suivi radioécologique annuel de chaque site. ..... 169

Figure 12.2 - Chronique d'une incinération : montée en température et paliers en fonction du temps. ..... 175

Figure 12.3 – 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). ..... 183

Figure 12.4 – Teneur en $^{238}$U dans les sédiments métropolitains. ..... 183

**Tableaux**

Tableau 1 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique de 2020 et analyses réalisées. ..... 30

Tableau 2 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Flamanville en 2020 et analyses réalisées. ..... 34

Tableau 3 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 40

Tableau 4 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 41

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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 42

Tableau 6 - Activités en radionucléides émetteurs β au sein d'échantillons de lierre collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 43

Tableau 7 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de légumes (salades ou betterave) collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 44

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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 45

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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 46

Tableau 10 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Flamanville de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 47

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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 48

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....49

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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....50

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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....51

Tableau 15 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec). ....52

Tableau 16 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec). ....53

Tableau 17 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2020. ....54

Tableau 18 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2020. ....54

Tableau 19 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Flamanville lors du suivi radioécologique 2020. ....55

Tableau 20 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sédiments, les algues, $Bq.kg^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons). ....56

Tableau 21 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sédiments, les algues, $Bq.kg^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons). ....57

Tableau 22 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2020. ....58

Tableau 23 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Flamanville lors du suivi radioécologique 2020. ....59

Tableau 24 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique de 2020 et analyses réalisées. ....64

Tableau 25 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel en 2020 et analyses réalisées. ....68

Tableau 26 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....75

Tableau 27 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....76

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Tableau 28 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'herbe collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....77

Tableau 29 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de salades collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....78

Tableau 30 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de lait collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....79

Tableau 31 - 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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....80

Tableau 32 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....81

Tableau 33 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'algues collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....82

Tableau 34 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de mollusques collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....83

Tableau 35 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de crustacés collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....84

Tableau 36 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ....85

Tableau 37 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec). ....86

Tableau 38 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec). ....87

Tableau 39 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2020. ....88

Tableau 40 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2020. ....88

Tableau 41 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2020. ....89

Tableau 42 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sédiments et les algues, $Bq.kg^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons). ....90

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Tableau 43 - 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 2020 (Bq.kg$^{-1}$ sec pour les sédiments et les algues, Bq.kg$^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons). ..... 91

Tableau 44 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2020. ..... 92

Tableau 45 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2020. ..... 93

Tableau 46 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique de 2020 et analyses réalisées. ..... 98

Tableau 47 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Penly en 2020 et analyses réalisées. ..... 102

Tableau 48 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 106

Tableau 49 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 107

Tableau 50 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'herbe collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 108

Tableau 51 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de salades collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 109

Tableau 52 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de lait collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 110

Tableau 53 - 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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 111

Tableau 54 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 112

Tableau 55 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'algues collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 113

Tableau 56 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de mollusques collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 114

Tableau 57 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de crustacés collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 115

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Tableau 58 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Penly de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 116

Tableau 59 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec). ..... 117

Tableau 60 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sols et les végétaux). ..... 118

Tableau 61 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2020. ..... 119

Tableau 62 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2020. ..... 119

Tableau 63 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Penly lors du suivi radioécologique 2020. ..... 120

Tableau 64 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sédiments et les algues, $Bq.kg^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons). ..... 121

Tableau 65 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sédiments et les algues, $Bq.kg^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons). ..... 122

Tableau 66 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2020. ..... 123

Tableau 67 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Penly lors du suivi radioécologique 2020. ..... 124

Tableau 68 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique de 2020 et analyses réalisées. ..... 128

Tableau 69 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines en 2020 et analyses réalisées. ..... 132

Tableau 70 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 137

Tableau 71 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 138

Tableau 72 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'herbe collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 139

Tableau 73 - Activités en radionucléides émetteurs β au sein d'échantillons de lierre collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 140

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Tableau 74 - 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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 141

Tableau 75 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de lait collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 142

Tableau 76 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'eau de boisson collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 143

Tableau 77 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 144

Tableau 78 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'algues collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 145

Tableau 79 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de mollusques collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 146

Tableau 80 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de crustacés collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 147

Tableau 81 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Gravelines de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique. ..... 148

Tableau 82 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sols et les végétaux). ..... 149

Tableau 83 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sols et les végétaux). ..... 150

Tableau 84 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2020. ..... 151

Tableau 85 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2020. ..... 151

Tableau 86 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Gravelines lors du suivi radioécologique 2020. ..... 152

Tableau 87 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sédiments et les algues, $Bq.kg^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons). ..... 153

Tableau 88 - 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 2020 ($Bq.kg^{-1}$ sec pour les sédiments et les algues, $Bq.kg^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons). ..... 155

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

Tableau 89 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2020. .....157

Tableau 90 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Gravelines lors du suivi radioécologique 2020.....157

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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 16) ainsi que des retombées atmosphériques des accidents de Tchernobyl et, dans une moindre mesure, de Fukushima Daiichi.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

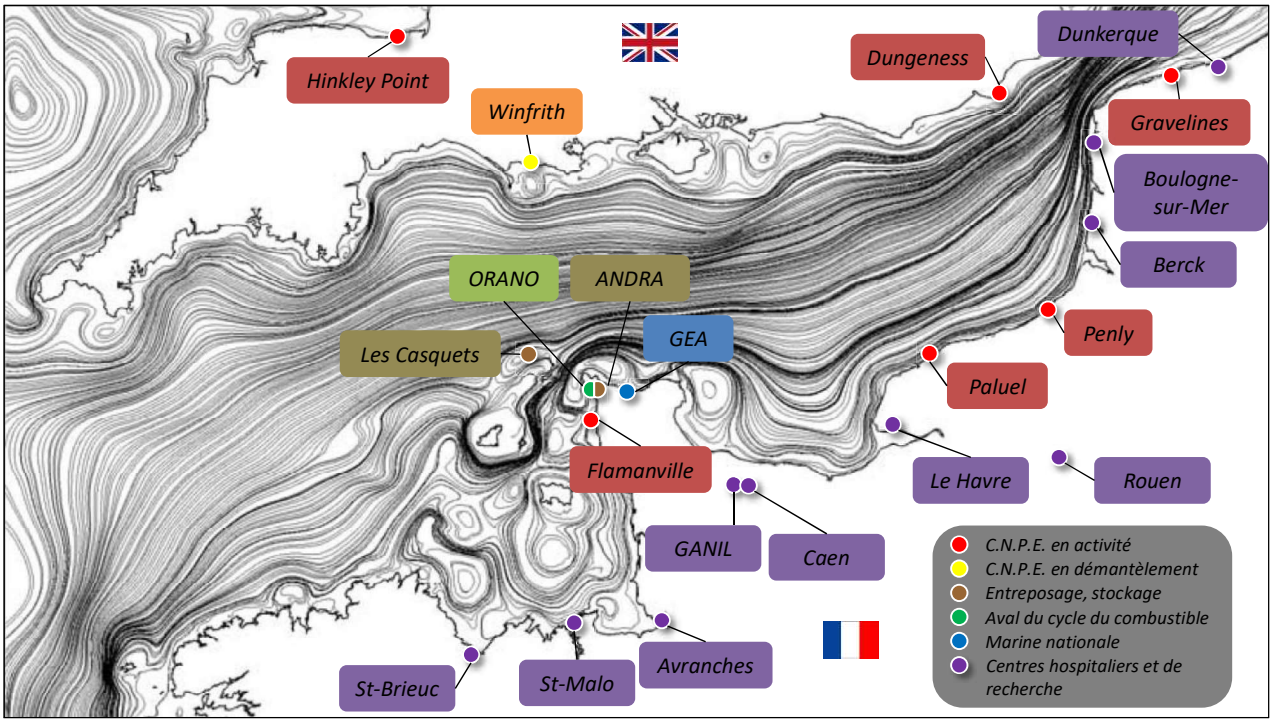



***Figure 1 – Localisation des installations nucléaires de la façade Manche/Mer du Nord et circulation générale des masses d'eaux (carte : [1, 2]).***

## 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 ($^{3}$H), le $^{14}$C, $^{7}$Be 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 $^{3}$H 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 $^{3}$H (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

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 [5-7]. Avant l'ère nucléaire, les valeurs en $^{3}H$ 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 $CO_2$ 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 $^{144}Ce/Pr$ et de $^{106}Ru/Rh$ (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 $^{239,\,240}Pu$ 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 $^{3}H$ 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 décru 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, 10-13] (Figure 2 page 18).

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


Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

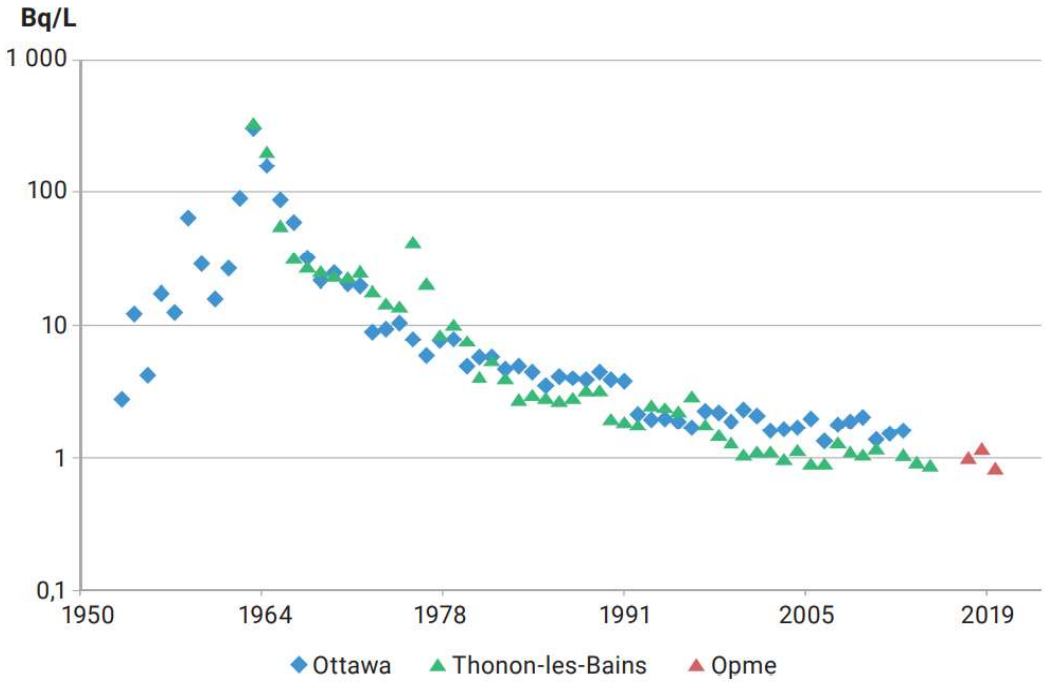



**Figure 2 - Activités de $^{3}H$ dans l'eau de pluie d'après [1].**

Le tritium produit lors des essais aériens est quantifiable aujourd'hui sous les formes libres (HTO et TED exprimées en $Bq.L^{-1}$ d'eau de dessiccation, abrégé en $Bq.L^{-1}$ ED) et liée à la matière organique (TOL, exprimée en $Bq.L^{-1}$ 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 $Bq.L^{-1}$ en France métropolitaine (dans une gamme allant de 0,39 à 1,9 $Bq.L^{-1}$ 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 $Bq.L^{-1}$ [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 $Bq.kg^{-1}$ 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±7 $Bq.kg^{-1}$ C [16]. En 2020, elle est de 224±7 $Bq.kg^{-1}$ C d'après [3], de l'ordre de grandeur de l'activité spécifique atmosphérique antérieure aux premiers essais aériens (226,0±1,1 $Bq.kg^{-1}$ C) (Figure 3 page 19).

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

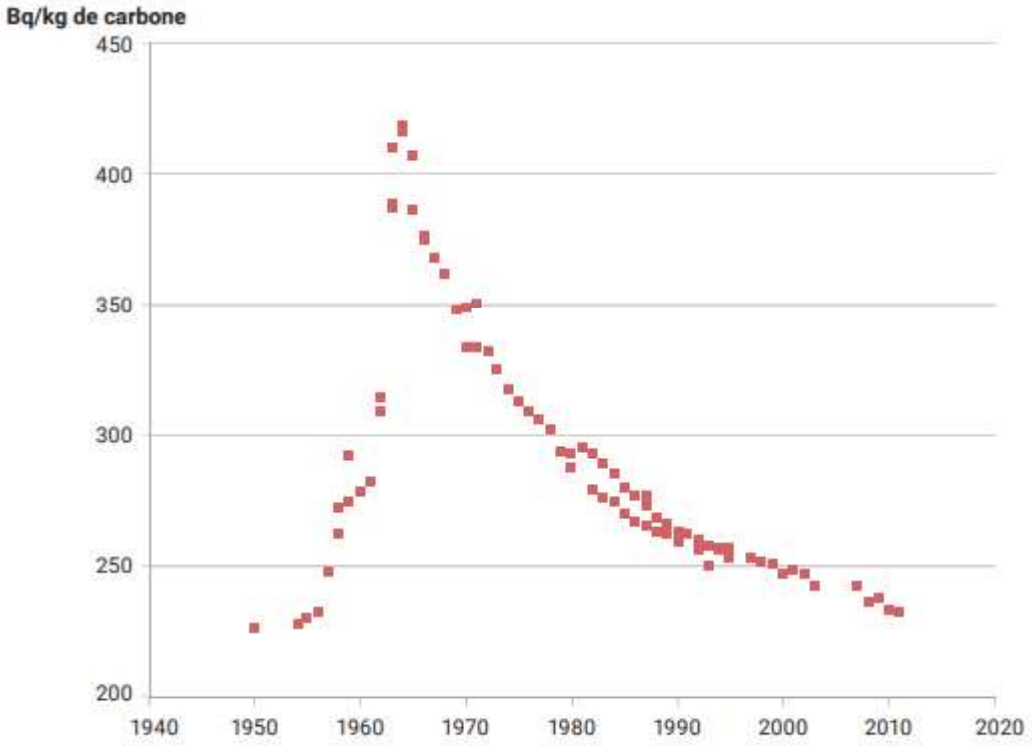



***Figure 3 – Évolution de l'activité spécifique du $^{14}C$ dans l'hémisphère nord depuis 1950 (tirée de [3]).***

Le $^{14}C$ des écosystèmes d'eau douce n'est pas en équilibre avec le $^{14}CO_2$ 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 180 et 220 $Bq.kg^{-1}$ C [3]. En milieu marin, le $^{14}C$ rejeté est en grande majorité sous forme minérale dissoute [17] 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 [17]. 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 $Bq.kg^{-1}$ 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±5 $Bq.kg^{-1}C$ en 2020, 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 $^{3}H$ 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 à l'aval du CNPE, comparativement à l'amont.

### 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

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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/m$^3$, n'était plus que de quelques dizaines de Bq/m$^3$ lorsque le panache a atteint la France métropolitaine durant la première semaine de mai 1986. Les évènements 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 ($^{103}$Ru, $^{106}$Ru/Rh, $^{110m}$Ag, $^{131}$I, $^{132}$Te, $^{134}$Cs et $^{137}$Cs). 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 20 présente la répartition estimée des activités surfaciques en $^{137}$Cs sur cette zone, issues de la rémanence de ces retombées. De nos jours, seul le $^{137}$Cs est encore mesurable [18].

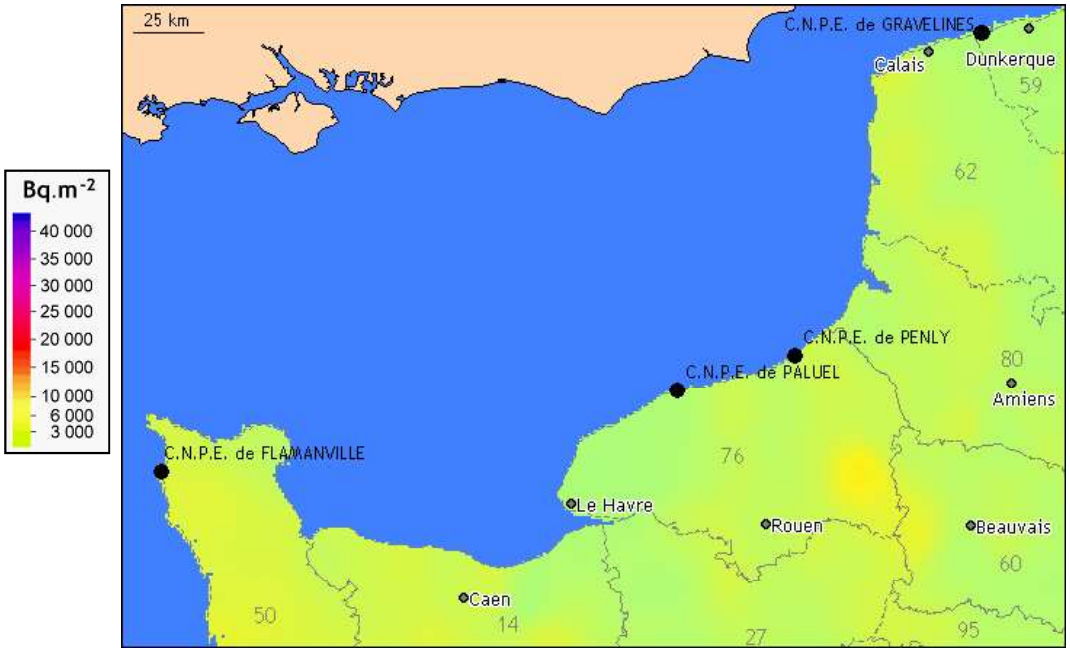



***Figure 4 - Activités surfaciques de $^{137}$Cs, calculées pour l'année 2010, issues des retombées atmosphériques des essais aériens et de l'accident de Tchernobyl à partir de [19].***

## 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 20). Les résultats des analyse réalisés sur le territoire métropolitain par l'IRSN et par les exploitants nucléaires ont montré la présence d'$^{131}$I, de $^{137}$Cs et de $^{134}$Cs [20]. L'$^{131}$I, du fait de sa courte période radioactive (8,02 jours [4]), a rapidement disparu de l'environnement. Le $^{134}$Cs, 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 $^{137}$Cs sont difficilement imputables à ce seul évènement compte-tenu de la rémanence de ce radionucléide sur le littoral de la Manche et de la Mer du Nord.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

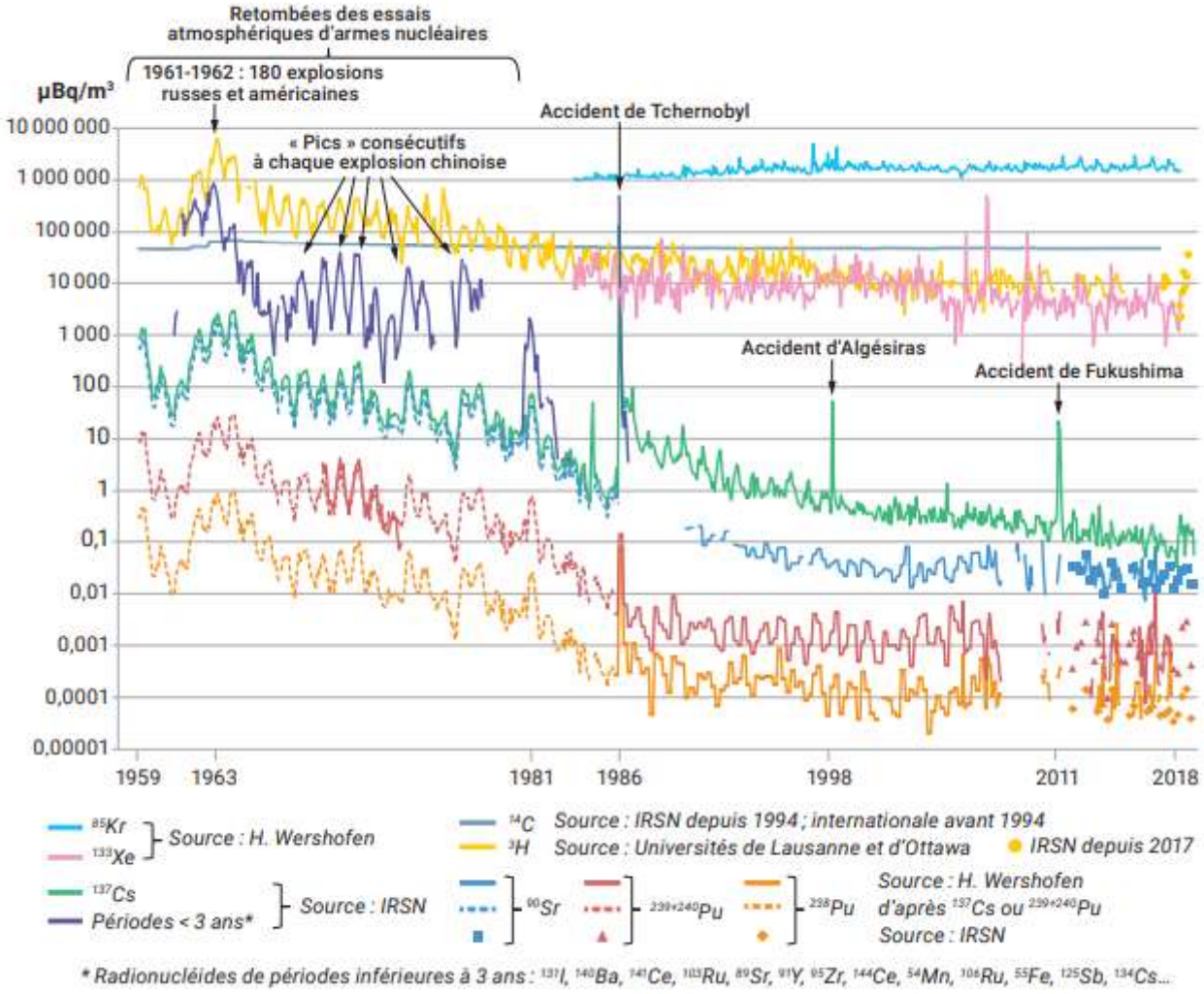



***Figure 5 – Évolution des activités des principaux radionucléides artificiels mesurés dans l'air en France et en Allemagne au cours des 60 dernières années (tirée de [3]).***

## 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 $^{14}C$, l'$^{41}Ar$, les xénons métastables 131, 133 et 135, le $^{85}Kr$, les $^{131}I$ et $^{133}I$, les $^{58}Co$ et $^{60}Co$ et les $^{134}Cs$ et $^{137}Cs$. Au sein des rejets d'effluents radioactifs liquides, le tritium, le $^{14}C$, les $^{58}Co$ et $^{60}Co$, le $^{63}Ni$, les $^{142}Sb$ et $^{125}Sb$, les $^{134}Cs$ et $^{137}Cs$, le $^{54}Mn$, l'$^{110m}Ag$, le $^{123m}Te$, et l'$^{131}I$ sont prépondérants. Le $^{55}Fe$ 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 significatifs (ESE) ou intéressants l'environnement (EIE) pour l'année 2020 ayant pu avoir une conséquence mesurable sur les niveaux d'activité des échantillons analysés dans le cadre du suivi.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

### 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 $^{3}$H 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 $^{99m}$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 [21]. 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 $10^4$ [22]. 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 16), 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 16), 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 16). Considérant les périodes radioactives du $^{99m}$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 apparait 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 16 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 [6]. Le $^{14}$C est rejeté en milieu marin en grande majorité sous forme minérale dissoute [23] 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 [17]. 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 Bq.kg$^{-1}$ C [23].

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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 50ème 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.

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

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

de mètres. Elles s'ouvrent sur la Manche, telle 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 19°C. Les variations de salinité restent faibles, comprises entre 34 et 35,5.

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 16 ; [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 conservatifs[2], rejetés par l'usine ORANO La Hague, en particulier l'$^{125}$Sb, 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.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 crustacés[3] (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 presque-île du Cotentin.

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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 10 page 65). 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 16). 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).

Les modalités d'exploitation et les limites des rejets d'effluents du CNPE de Paluel, en mer et dans l'atmosphère, sont définies par l'Autorité de sureté nucléaire (ASN). L'exploitant n'a pas porté à la connaissance de l'IRSN d'évènements significatifs ou intéressant l'environnement pour l'année 2020 ayant pu avoir une conséquence mesurable sur les niveaux d'activité des échantillons analysés dans le cadre du suivi.

La dispersion des effluents dans l'environnement est contrainte par les conditions météorologiques et hydrodynamiques propres au site. Le régime éolien est généralement dominé par les vents de secteur ouest à sud-ouest. La circulation générale des masses d'eaux le long du littoral Cauchois assure, quant à elle, la dispersion des effluents liquides vers le nord-est de la Manche.

La chronologie des études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Paluel est présentée sur la Figure 9 page 62. Les références bibliographiques sont présentées en pages 163 et suivantes.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

| Évènements pouvant influencer le niveau de radioactivité dans l'environnement du CNPE | Études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Paluel | |
|---|---|---|
| Début des essais nucléaires atmosphériques : 1945 | | |
| Mise en service de l'usine de traitement UP2 de la Hague : 1967 | | |
| Mise en service du site de stockage de la Manche : 1969 | | |
| 6 essais nucléaires aériens chinois : janv.1976 - déc. 1978 | 1978-1979 | **État de référence** |
| Dernier essai nucléaire aérien chinois : 16 oct.1980 | | |
| Incendie de silo à l'usine de la Hague : 6 janvier 1981 | | |
| **Couplage tranche 1 : juin 1984** | | |
| **Couplage tranche 2 : septembre 1984** | | |
| **Couplage tranche 3 : septembre 1985** | | |
| **Couplage tranche 4 : avril 1986** | | |
| Accident de Tchernobyl : 26 avril 1986 | | |
| Mise en service de l'usine de traitement UP3 de la Hague : 1990 | | |
| Mise en service de l'usine de traitement UP2-800 de la Hague : 1994 | 1992-1994 | **Suivis annuels** |
| Arrêt de l'exploitation du site de stockage de la Manche : 1994 | | |
| | 1995 | **Suivi annuel + Bilan décennal** |
| | 1996-2004 | **Suivis annuels** |
| | 2005 | **Suivi annuel + Bilan décennal** |
| | 2006-2010 | **Suivis annuels** |
| Accident de Fukushima : 11 mars 2011 | 2011 à 2015 | **Suivis annuels** |
| | 2016 | **Suivi annuel + Bilan décennal** |
| | 2017-2020 | **Suivis annuels** |

***Figure 9 - Chronologie des études radioécologiques conduites dans l'environnement du CNPE de Paluel.***

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

## 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 10 page 65. Les dates de prélèvement, stations, natures et caractéristiques identifiant chaque échantillon sont répertoriées dans le Tableau 24 page 64. 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 à 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, Le Tôt). 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-lès-Grès, située en secteur est-sud-est et auparavant considérée comme en ZI, est recatégorisée en ZNI.

En 2020, du fait de la crise sanitaire mondiale, l'IRSN a été contraint de réduire la stratégie d'échantillonnage aux seuls prélèvements et analyses réglementaires, en accord avec l'exploitant. Seuls quelques sites ont pu faire l'objet de quelques prélèvements et analyses non réglementaires, principalement avant le premier confinement. Ce ne fut pas le cas du CNPE de Paluel. Concernant les prélèvements et analyses réglementaires, il n'a pas été possible de prélever de salades dans l'environnement du CNPE de Paluel en 2020. L'IRSN n'a rencontré aucune autre difficulté de prélèvement dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel.

Depuis 2020, des analyses de $^{14}C$ sont demandées au titre des prescriptions réglementaires dans les salades à échantillonner en champ proche. Néanmoins, cette analyse, comme l'analyse des émetteurs gamma, celle du $^{3}H$ libre et du $^{3}H$ organiquement lié, n'ont pu être réalisées du fait de l'absence de prélèvements de salades en 2020.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 24 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique de 2020 et analyses réalisées.***

| Situation par rapport au C.N.P.E. | Chronique | Commune | Longitude WGS 84 | Latitude WGS 84 | Nature | Espèce | Fraction Prelevée/ Analysée | Date de prélèvement | Type de mesure | Frais/ Sec | Sec/ Cendres |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,84 km NE | Paluel - ZI Proche, à moins de 5 km du site | Paluel, Le Tôt | 00,64146 | 49,86390 | Sols non cultivés | Sol de pâturage ou de prairie *0 - 5 cm* | Diamètre inférieur à 2 mm | 07/07/2020 | Spectrométrie gamma (sec) | 1,12 | - |
| 0,84 km NE | Paluel - ZI Proche, à moins de 5 km du site | Paluel, Le Tôt | 00,64146 | 49,86390 | Herbes | Herbe de prairie permanente | Parties aériennes | 07/07/2020 | Tritium lié + %H (sec) | 2,24 | - |
| 0,84 km NE | Paluel - ZI Proche, à moins de 5 km du site | Paluel, Le Tôt | 00,64146 | 49,86390 | Herbes | Herbe de prairie permanente | Parties aériennes | 07/07/2020 | Tritium libre (liquide) | 2,24 | - |
| 9,61 km E | Paluel - Zone non influencée, à moins de 20 km du site | Gueutteville-les-Grès | 00,76754 | 49,84420 | Aliments liq. non transformés | Lait de vache | Entier | 06/07/2020 | Tritium libre (liquide) | 7,08 | - |
| 9,61 km E | Paluel - Zone non influencée, à moins de 20 km du site | Gueutteville-les-Grès | 00,76754 | 49,84420 | Aliments liq. non transformés | Lait de vache | Entier | 06/07/2020 | $^{14}C$ + C stable + $^{13}C/^{12}C$ (sec) | 7,08 | - |

- : absence de traitement.

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

| | |
|---|---|
| | Prélèvements hors vents dominants de l'installation |
| | Prélèvements sous les vents dominants de l'installation |

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Figure 10 - Localisation du CNPE de Paluel et des stations terrestres[7] échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020.***

[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.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

## 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 37 page 86.

En 2020, la radioactivité d'origine naturelle quantifiée dans le sol proche du 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 cette matrice [3]. 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 [3, 24, 25]. 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 38 page 87.

Dans le sol échantillonné dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel en 2020, le seul radionucléide d'origine artificielle quantifié est le $^{137}$Cs, dont l'activité est en accord avec les niveaux observés au cours des dix dernières années (Tableau 26 page 75) 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 39 et du Tableau 40 page 88, respectivement.

L'activité en tritium (libre) dans le lait est inférieure au seuil de décision (≤ 0,60 Bq.L$^{-1}$). Dans l'herbe, l'activité en tritium libre (2,8±0,7 Bq.L$^{-1}$) est supérieure au 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 0,39 à 1,9 Bq.L$^{-1}$ pour le TOL d'après [3]), et témoigne d'un apport local en champ proche du CNPE de Paluel pour l'herbe.

#### 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 41 page 89.

Les activités en $^{14}$C dans le lait échantillonné (246±12 Bq.kg$^{-1}$ C) et dans deux des quatre prélèvements trimestriels d'herbe (244±12 et 264±13 Bq.kg-1 C, Tableau 28 page 77) sont significativement supérieures au bruit de fond sur le territoire métropolitain français hors influence industrielle locale (224±7 Bq.kg$^{-1}$ C d'après [3]), et témoignent d'un apport local dans l'environnement du CNPE de Paluel, possiblement par les rejets à l'atmosphère du CNPE.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

## 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 11 page 70. Les dates de prélèvement, stations, natures et caractéristiques identifiant chaque échantillon sont répertoriées dans le Tableau 25 pages 68 et suivante. 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, à la station de Sassetot-le-Mauconduit, 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 2020, du fait de la crise sanitaire, l'IRSN a été contraint de réduire la stratégie d'échantillonnage aux seuls prélèvements et analyses réglementaires, en accord avec l'exploitant. Seuls quelques sites ont pu faire l'objet de quelques prélèvements et analyses non réglementaires, principalement avant le premier confinement. Ce ne fut pas le cas du CNPE de Paluel. Concernant les prélèvements et analyses réglementaires, comme en 2019, 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 terrestre du CNPE de Paluel.

Concernant les évolutions des prescriptions réglementaires, on peut noter que les analyses γ effectuées sur les algues en champ proche ne sont demandées qu'à une seule station en 2020 au lieu de deux les années précédentes.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 25 - Identification des échantillons prélevés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel en 2020 et analyses réalisées.***

| Situation par rapport au CNPE | Chronique | Commune | Longitude WGS 84 | Latitude WGS 84 | Nature | Espèce | Fraction Prelevée/ Analysée | Date de prélèvement | Type de mesure | Frais/ Sec | Sec/ Cendres |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9,73 km | Paluel - Champ lointain | Sassetot-le-Mauconduit | 00,51265 | 49,81989 | Algues brunes | Fucus *Fucus serratus* | Entier | 08/07/2020 | Spectrométrie gamma (cendres) | 5,77 | 4,30 |
| 9,76 km | Paluel - Champ lointain | Sassetot-le-Mauconduit | 00,51216 | 49,81981 | Sédiments | Sable de plage | Diamètre inférieur à 2 mm | 08/07/2020 | Spectrométrie gamma (sec) | 1,35 | - |
| 12,33 km | Paluel - Champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 00,47330 | 49,82000 | Crustacés | Araignée de mer *Maja squinado* | Entier | 05/01/2020 | Spectrométrie gamma (cendres) | 2,62 | 1,99 |
| 12,33 km | Paluel - Champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 00,47330 | 49,82000 | Crustacés | Araignée de mer *Maja squinado* | Chair | 05/01/2020 | Tritium lié + %H (sec) | 4,70 | - |
| 12,33 km | Paluel - Champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 00,47330 | 49,82000 | Mollusques | Bulot *Buccinum undatum* | Entier | 01/07/2020 | Spectrométrie gamma (cendres) | 3,88 | 6,04 |
| 12,33 km | Paluel - Champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 00,47330 | 49,82000 | Mollusques | Bulot *Buccinum undatum* | Entier | 01/07/2020 | Tritium lié + %H (sec) | 3,88 | - |
| 12,33 km | Paluel - Champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 00,47330 | 49,82000 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 29/06/2020 | Spectrométrie gamma (cendres) | 4,61 | 16,78 |
| 12,33 km | Paluel - Champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 00,47330 | 49,82000 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 29/06/2020 | Tritium lié + %H (sec) | 4,58 | - |
| 12,33 km | Paluel - Champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 00,47330 | 49,82000 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 29/06/2020 | $^{14}C$ + C stable + $^{13}C/^{12}C$ (sec) | 4,58 | - |
| 1,14 km | Paluel - Champ proche | Paluel au large | 00,63110 | 49,86750 | Crustacés | Araignée de mer *Maja brachydactyla* | entier | 22/01/2020 | Spectrométrie gamma (cendres) | 2,33 | 1,85 |
| 1,14 km | Paluel - Champ proche | Paluel au large | 00,63110 | 49,86750 | Crustacés | Araignée de mer *Maja brachydactyla* | Chair | 22/01/2020 | Tritium lié + %H (sec) | 4,14 | - |
| 1,14 km | Paluel - Champ proche | Paluel au large | 00,63110 | 49,86750 | Mollusques | Bulot *Buccinum undatum* | Entier | 13/05/2020 | Spectrométrie gamma (cendres) | 3,77 | 10,38 |
| 1,14 km | Paluel - Champ proche | Paluel au large | 00,63110 | 49,86750 | Mollusques | Bulot *Buccinum undatum* | Entier | 13/05/2020 | Tritium lié + %H (sec) | 3,87 | - |
| 1,14 km | Paluel - Champ proche | Paluel au large | 00,63110 | 49,86750 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 26/01/2020 | Spectrométrie gamma (cendres) | 4,73 | 16,27 |
| 1,14 km | Paluel - Champ proche | Paluel au large | 00,63110 | 49,86750 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 26/01/2020 | Tritium lié + %H (sec) | 4,67 | - |
| 1,14 km | Paluel - Champ proche | Paluel au large | 00,63110 | 49,86750 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 26/01/2020 | $^{14}C$ + C stable + $^{13}C/^{12}C$ (sec) | 4,67 | - |
| 6,34 km | Paluel - Champ proche | Saint-Valéry-en-Caux | 00,72112 | 49,87078 | Algues brunes | Fucus *Fucus serratus* | Entier | 08/07/2020 | Spectrométrie gamma (cendres) | 6,08 | 4,03 |
| 6,34 km | Paluel - Champ proche | Saint-Valéry-en-Caux | 00,72112 | 49,87078 | Sédiments | Sable de plage | Diamètre inférieur à 2 mm | 08/07/2020 | Spectrométrie gamma (sec) | 2,03 | - |

- : absence de traitement.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 |

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Figure 11 - Localisation du CNPE de Paluel et des stations marines[8] échantillonnées dans le cadre du suivi radioécologique 2020.***

[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.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

## 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 $\gamma$ des activités en radionucléides d'origine naturelle dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 42 page 90.

En 2020, 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 $^{7}$Be 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. 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 $\gamma$ des activités en radionucléides d'origine artificielle dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 43 page 91.

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 et à l'$^{108m}$Ag. Le $^{137}$Cs est le plus fréquemment quantifié (6 fois sur 10 échantillons analysés). Comme il le fut régulièrement au cours de la dernière décennie, l'$^{108m}$Ag est détecté dans les bulots en champ proche comme en champ lointain du CNPE de Paluel à un niveau proche du seuil de décision, avec des activités plus élevées en champ lointain qu'en champ proche en 2020. Le $^{60}$Co est quant à lui détecté en champ proche (sédiments et bulots) et en champ lointain du CNPE (algues). Les résultats de mesure par spectrométrie gamma obtenus en 2020 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 32 à Tableau 36, pages 81 et suivantes). 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 organiquement lié dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 44 page 92.

Les activités en tritium organiquement lié dans les échantillons prélevés en champ lointain (2,3±0,8 à 4,6±0,9 Bq.L$^{-1}$ EC, toutes matrices confondues) correspondent aux valeurs attendues du fait des niveaux d'activités mesurables dans l'eau de mer en Manche (qui varient généralement de 0,3 à 10 Bq.L$^{-1}$) et majoritairement imputables à la dispersion des rejets d'effluents liquides de l'usine ORANO La Hague. Les activités en tritium organiquement lié sont comparables en champ proche et en champ lointain, hormis pour les poissons, pour lesquels les activités sont plus élevées en champ proche (5,2±1,4 Bq.L$^{-1}$ EC) qu'en champ lointain (2,3±0,8 Bq.L$^{-1}$ EC). Cette observation cohérente avec les valeurs observées au cours de la dernière décennie, témoigne du

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

marquage par ce radionucléide de l'environnement proche du CNPE pour les poissons en 2020, même si les activités restent globalement du même ordre de grandeur depuis 2015 entre le champ proche et lointain.

**Carbone 14**

Les résultats d'analyse des activités en $^{14}C$ dans l'environnement marin du CNPE de Paluel sont présentés au sein du Tableau 45 page 93.

Les activités en $^{14}C$ quantifiées au sein des poissons échantillonnés en champ proche et en champ lointain des rejets d'effluents liquides du CNPE de Paluel sont supérieures au bruit de fond en $^{14}C$ observé hors influence dans les matrices biologiques collectées en entrée de Manche (233±5 $Bq.kg^{-1}$ C en 2020 d'après nos mesures et d'après [3]). Elles sont comparables en champ proche et 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.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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

Les niveaux d'activités des radionucléides naturels détectés en 2020 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 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 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. L'activité en tritium libre met en évidence un marquage lié aux rejets d'effluents à l'atmosphère. L'activité en $^{14}C$ dans le lait de vache échantillonné est significativement supérieure au bruit de fond sur le territoire français hors influence industrielle (224±7 $Bq.kg^{-1}$ C d'après [3]). Au vu des résultats obtenus dans le cadre du suivi radioécologique 2020, 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 $^{14}C$ dans le lait et l'herbe et le $^{3}H$ dans l'herbe.

En 2020, 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 $^{60}Co$ (dans les sédiments, les algues et les mollusques) et l'$^{108m}Ag$ (dans les 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. L'$^{108m}Ag$, qui peut se trouver ponctuellement dans les rejets liquides des CNPE, est uniquement quantifié dans les bulots, à des niveaux plus élevés en champ lointain qu'en champ proche, sans que son origine ne soit clairement établie. En 2020, le $^{60}Co$ est quantifié dans les sédiments et les mollusques prélevés en champ proche uniquement, tandis qu'il l'est dans les algues en champ lointain 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 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, et ne mettent pas en évidence de marquage spécifique par les rejets d'effluents liquides du CNPE de Paluel hormis pour les poissons en 2020. 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 dans les poissons.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

## 5.5. Tableaux de résultats

***Tableau 26 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de sols collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 10 km | 10 km | 10 km | 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 |
| Émetteurs γ d'origine artificielle ($Bq.kg^{-1}$ sec) | | | | | | | | | | | |
| $^{134}Cs$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{137}Cs$ | 5,5 (1/1) | 6,0 (1/1) | 5,6 (1/1) | 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) |
| $^{57}Co$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{58}Co$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{60}Co$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{110m}Ag$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{106}Ru/Rh$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{241}Am$ | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 27 - Activités en radionucléides émetteurs γ au sein d'échantillons de mousses collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 5,0 et 6,5 km | 5,0 et 6,5 km | 5,0 et 6,5 km | 5,0 et 6,5 km | 5,0 et 6,5 km | 5,0 et 6,5 km | 5,0 et 6,5 km | 5,0 et 6,5 km | 5,1 km | 5,1 km | - |
| Émetteurs γ d'origine artificielle ($Bq.kg^{-1}$ sec) | | | | | | | | | | | |
| $^{134}Cs$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | n.a. |
| $^{137}Cs$ | 2,6-4,6 (2/2) | 1,0-1,3 (2/2) | 1,8-4,8 (2/2) | 1,4-9,7 (2/2) | 1,1-1,9 (2/2) | - | 0,4-0,8 (2/2) | 0,45-1,72 (2/2) | 0,75 (1/1) | 0,40 (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. |
| $^{131}I$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | n.a. |

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 28 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'herbe collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 0,8 et 10,3 km | 10 km | 0,7 km | 0,7 km | 0,8 km |
| Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg$^{-1}$ sec) | | | | | | | | | | | |
| $^{134}$Cs | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | n.a. |
| $^{137}$Cs | - | - | 0,11 (1/1) | 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. |
| $^{57}$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 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 0,8 et 10,3 km | 0,8 km | 0,7 km | 0,7 km | 0,8 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. | n.a. | 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) |
| $^3$H lié | n.a. | n.a. | n.a. | 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) |
| $^{14}$C | n.a. | n.a. | 233 (1/1) | 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) |

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 29 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de salades collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 et 5,7 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 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 et 5,7 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. | n.a. | 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. |
| $^{3}$H lié | n.a. | n.a. | n.a. | 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. |
| $^{14}$C | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 236-257 (2/2) | n.a. | 235 (1/1) | 239 (1/1) | n.a. |

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 30 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de lait collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 9,5 km | 9,6 km | 9,6 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. |
| $^{57}$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 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 10 km | 9,5 km | 9,6 km | 9,6 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 | 1,2 (1/1) | 1,0 (1/1) | 0,9 (1/1) | - | 0,8 (1/1) | 0,7 (1/1) | 0,9 (1/1) | - | - | - | - |
| $^{3}$H lié | n.a. | n.a. | - | 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. |
| $^{14}$C | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 230-233 (4/4) | 227-235 (5/5) | 234 (1/1) | 243 (1/1) | 229 (1/1) | 246 (1/1) |

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

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 31 - 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 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 10 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 km | 1,6 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. | n.a. |
| $^{137}$Cs | n.a. | 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. | n.a. |
| $^{58}$Co | n.a. | 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. | n.a. |
| $^{110m}$Ag | n.a. | 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. | n.a. |
| $^{241}$Am | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | - | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| **Émetteurs β ($^{3}$H 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.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 32 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de sédiments collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 2,0 à 8,8 km | 2,0 à 8,8 km | 6,3 et 9,8 km |
| Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg$^{-1}$ sec) | | | | | | | | | | | |
| $^{134}$Cs | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{137}$Cs | 2,6 (1/3) | 0,1-3,1 (2/3) | 0,3-3,0 (3/3) | 3,5 (1/3) | 0,5-3,3 (3/3) | 0,2-2,6 (2/3) | 0,2-3,3 (3/3) | 0,03-2,23 (2/3) | 0,17-3,04 (3/3) | 0,17-2,97 (3/3) | 2,67 (1/2) |
| $^{57}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{58}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{60}$Co | 0,9 (1/3) | 0,8 (1/3) | 0,8 (1/3) | 1,3 (1/3) | 0,1-1,8 (3/3) | 0,7 (1/3) | 1,3 (1/3) | 0,8 (1/3) | 0,9 (1/3) | 1,1 (1/3) | 0,77 (1/2) |
| $^{110m}$Ag | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{106}$Ru/Rh | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{241}$Am | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | - | - |

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 2,0 à 8,8 km | 2,0 à 8,8 km | 6,3 et 9,8 km |
| Émetteurs β ($^{3}$H lié : Bq.L$^{-1}$ d'eau de combustion ; $^{14}$C : Bq.kg$^{-1}$ C) | | | | | | | | | | | |
| $^{3}$H lié | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 34-44 (3/3) | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| $^{14}$C | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 96-207 (3/3) | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 33 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons d'algues collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 1,6 à 8,8 km | 1,6 à 8,8 km | 6,3 et 9,7 km |
| Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg$^{-1}$ sec) | | | | | | | | | | | |
| $^{134}$Cs | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{137}$Cs | 0,23 (3/3) | 0,23-0,34 (3/3) | 0,21-0,24 (3/3) | 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) |
| $^{57}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{58}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{60}$Co | - | 0,36 (1/3) | 0,24-0,30 (2/3) | 0,22 (1/3) | 0,21-0,26 (3/3) | 0,16 (1/3) | 0,22-0,24 (2/4) | 0,18-0,30 (3/3) | 0,30-0,36 (3/3) | 0,24-0,39 (2/3) | 0,25 (1/2) |
| $^{110m}$Ag | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{106}$Ru/Rh | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{241}$Am | - | - | - | 0,18 (1/3) | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{131}$I | 1,0-4,1 (3/3) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 0,8 à 12 km | 6,2 et 8,8 km | 6,3 et 8,8 km | 6,3 et 9,7 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. | n.a. | 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. |
| $^{3}$H lié | n.a. | n.a. | n.a. | 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. |
| $^{14}$C | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 288-302 (3/3) | n.a. | 286-290 (2/2) | 269-278 (2/2) | n.a. |

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

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 34 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de mollusques collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 2 à 12 km | 2 à 12 km | 2 à 12 km | 2 à 12 km | 2 à 12 km | 2 à 12 km | 2 à 12 km | 5,7 et 12 km | 2 à 12 km | 2 et 12 km | 1,1 et 12,3 km |
| Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg$^{-1}$ frais) | | | | | | | | | | | |
| $^{134}$Cs | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{137}$Cs | 0,02-0,06 (4/4) | 0,02-0,07 (4/4) | 0,02-0,03 (4/4) | 0,02-0,08 (4/4) | 0,02-0,13 (3/4) | 0,02-0,07 (4/4) | 0,02 (4/4) | 0,02-0,04 (2/2) | 0,02-0,05 (3/3) | 0,02 (2/2) | 0,014 (1/2) |
| $^{57}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{58}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{60}$Co | 0,02-0,03 (2/4) | - | 0,03 (1/4) | 0,02 (1/4) | 0,02-0,07 (3/4) | 0,04 (1/4) | - | - | 0,01 (2/3) | - | 0,01 (1/2) |
| $^{110m}$Ag | 0,03-0,04 (2/4) | - | - | - | 0,03 (1/4) | 0,01-0,02 (2/4) | 0,03-0,05 (2/4) | - | 0,01 (2/3) | - | - |
| $^{108m}$Ag | 0,011-0,020 (2/4) | 0,03 (2/4) | - | 0,02 (2/4) | 0,03 (1/4) | 0,02 (3/4) | 0,02-0,03 (3/4) | 0,01 (1/2) | 0,05 (2/3) | 0,01-0,03 (2/2) | 0,02-0,05 (2/2) |
| $^{106}$Ru/Rh | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,10-0,16 (2/3) | - | - |
| $^{241}$Am | - | - | - | 0,03 (1/4) | 0,05 (1/4) | 0,03 (1/4) | - | - | 0,02 (1/3) | - | - |

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 2 à 12 km | 5,7 et 12 km | 5,7 et 12 km | 5,7 et 12 km | 5,7 et 12 km | 5,7 et 12 km | 5,7 et 12 km | 5,7 et 12 km | 5,6 et 12 km | 2 et 12 km | 1,1 et 12,3 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. | 3,6-4,3 (2/2) | 4,1 (2/2) | 5,8-7,4 (2/2) | 4,8-5,0 (2/2) | 5,3-7,6 (2/2) | 7,0-7,8 (2/2) | 5,5-5,9 (2/2) | n.a. | n.a. | n.a. |
| $^{3}$H lié | n.a. | n.a. | 3,5-3,6 (2/2) | 4,6-5,1 (2/2) | 4,1-5,2 (2/2) | 5,1-5,8 (2/2) | 6,3-7,5 (2/2) | 5,4 (2/2) | 5,2-6,2 (2/2) | 4,6-5,3 (2/2) | 4,1-4,6 (2/2) |
| $^{14}$C | n.a. | n.a. | 294-295 (2/2) | 267-301 (2/2) | 270-278 (2/2) | 266-274 (2/2) | 281-287 (2/2) | 280-296 (2/2) | 287-368 (2/2) | 331-333 (2/2) | n.a. |

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 35 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de crustacés collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.***

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 1,1 et 12,3 km |
| Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg$^{-1}$ frais) | | | | | | | | | | | |
| $^{134}$Cs | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{137}$Cs | - | 0,05 (1/2) | 0,05 (1/2) | - | 0,03 (1/2) | 0,03 (1/2) | 0,03 (1/2) | 0,04 (1/2) | - | - | - |
| $^{57}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{58}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{60}$Co | - | - | - | - | - | - | 0,04 (1/2) | - | - | - | - |
| $^{110m}$Ag | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{108m}$Ag | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{106}$Ru/Rh | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{241}$Am | - | - | - | - | - | 0,05 (1/2) | 0,02 (1/2) | - | - | - | - |

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 1,1 et 12,3 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. | n.a. | n.a. | n.a. | 4,9-5,7 (2/2) | 4,9-6,6 (4/4) | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| $^{3}$H lié | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 5,0-6,0 (4/4) | 4,4-4,8 (2/2) | 4,8-6,6 (2/2) | 4,1-4,3 (2/2) | 3,5 (2/2) |
| $^{14}$C | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 338-393 (4/4) | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

*Tableau 36 - Activités en radionucléides émetteurs γ et β au sein d'échantillons de poissons collectés dans l'environnement marin du CNPE de Paluel de 2010 à 2020 dans le cadre du suivi radioécologique.*

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 1,1 et 12,3 km |
| Émetteurs γ d'origine artificielle (Bq.kg$^{-1}$ frais) | | | | | | | | | | | |
| $^{134}$Cs | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{137}$Cs | 0,08-0,31 (3/3) | 0,05-0,26 (4/4) | 0,04-0,36 (4/4) | 0,05-0,32 (4/4) | 0,04-0,27 (4/4) | 0,04-0,21 (4/4) | 0,03-0,24 (4/4) | 0,17-0,24 (2/2) | 0,14-0,17 (2/2) | 0,15-0,17 (2/2) | 0,21-0,25 (2/2) |
| $^{57}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{58}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{60}$Co | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{110m}$Ag | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{108m}$Ag | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{106}$Ru/Rh | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| $^{241}$Am | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

| Date | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Distance au site | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 2 et 12 km | 1,1 et 12,3 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 | 3,3-3,5 (2/2) | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 3,9-7,1 (3/3) | 5,5-9,5 (4/4) | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. |
| $^3$H lié | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 4,1-4,4 (3/3) | 4,9-7,5 (4/4) | 3,8-6,0 (2/2) | 7,9-9,0 (2/2) | 4,7-11,3 (2/2) | 2,3-5,2 (2/2) |
| $^{14}$C | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 290-370 (3/3) | 314-448 (4/4) | 319-343 (2/2) | 338-346 (2/2) | 346-371 (2/2) | 308-315 (2/2) |

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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 37 - 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 2020 (Bq.kg$^{-1}$ sec).***

| Chronique | Station | 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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | $^{228}$Ac | $^{234}$Th | $^{234m}$Pa | $^{210}$Pb | |
| Paluel - zi proche, à moins de 5 km du site | Paluel, Le Tôt | 07/07/2020 | Sols | Sol de pâturage ou de prairie | Diamètre inférieur à 2 mm | sec | 1,12 | 08/10/2020 | 201±18 | 21,5±2,6 | n.a. | 18±10 | n.a. | ≤ 3,0 |

n.a. : non analysé.

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

| | |
|---|---|
| | Prélèvements hors vents dominants de l'installation |
| | Prélèvements sous les vents dominants de l'installation |

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 38 - 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 2020 (Bq.kg$^{-1}$ sec).***

| Chronique | Station | 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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Paluel - zi proche, à moins de 5 km du site | Paluel, Le Tôt | 07/07/2020 | Sols | Sol de pâturage ou de prairie | Diamètre inférieur à 2 mm | sec | 1,12 | 08/10/2020 | ≤ 0,13 | 8,10±0,70 | ≤ 0,28 | ≤ 0,13 | ≤ 0,19 | ≤ 0,15 | ≤ 0,33 | ≤ 0,37 |

n.a. : non analysé.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 39 - Activités en tritium libre (HTO) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2020.***

| Chronique | Station | 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 - zi proche, à moins de 5 km du site | Paluel, Le Tôt | 07/07/2020 | Herbes | Herbe de prairie permanente | Parties aériennes | 2,24 | 28/10/2020 | 2,80±0,70 | 1,55±0,39 | Frais |
| Paluel - zone non influencée, à moins de 20 km du site | Gueutteville-les-Grès | 06/07/2020 | Produits laitiers | Lait de vache | Entier | 7,08 | 28/10/2020 | ≤ 0,60 | ≤ 0,52 | Liquide |

n.a. : non analysé.

***Tableau 40 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2020.***

| Chronique | Station | Date de prélèvement | Nature | Espèce | Fraction | Frais/Sec | Date de mesure | TOL (Bq.L$^{-1}$ d'eau de combustion) | TOL (Bq.kg$^{-1}$ frais ou Bq.L$^{-1}$) | Unité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Paluel - zi proche, à moins de 5 km du site | Paluel, Le Tôt | 07/07/2020 | Herbes | Herbe de prairie permanente | Parties aériennes | 2,24 | 08/02/2021 | 2,70±0,70 | 0,69±0,18 | Frais |

n.a. : non analysé.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

*Tableau 41 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement terrestre du CNPE de Paluel lors du suivi radioécologique 2020.*

| Chronique | Station | Date de prélèvement | Nature | Espèce | Fraction | Frais/Sec | Date de mesure du $^{14}C$ | $^{14}C$ (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) | $\delta^{13}C/^{12}C$ (‰ ) | pMC (%) | Unité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Paluel - zone non influencée, à moins de 20 km du site | Gueutteville-les-Grès | 06/07/2020 | Produits laitiers | Lait de vache | Entier | 7,08 | 11/11/2020 | 246±12 | 18,22±0,89 | 74 | -27,65 | 109,4±5,3 | Liquide |

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 42 - 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 2020 (Bq.kg$^{-1}$ sec pour les sédiments et les algues, Bq.kg$^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons).***

| Chronique | Station | 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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | $^{228}$Ac | $^{234}$Th | $^{234m}$Pa | $^{210}$Pb | |
| Paluel - champ proche | Saint-Valery-en-Caux | 08/07/2020 | Sédiments | Sable de plage | Diamètre inférieur à 2 mm | sec | 2,03 | 07/10/2020 | 227±20 | 10,4±1,3 | n.a. | 25,0±8,0 | n.a. | 46,5±4,5 |
| Paluel - champ lointain | Sassetot-le-Mauconduit | 08/07/2020 | Sédiments | Sable de plage | Diamètre inférieur à 2 mm | sec | 1,35 | 06/10/2020 | 31,4±3,3 | 1,20±0,30 | n.a. | ≤ 9,0 | n.a. | ≤ 1,5 |
| Paluel - champ proche | Saint-Valery-en-Caux | 08/07/2020 | Algues | Fucus *Fucus serratus* | Entier | cendre | 6,08 | 02/11/2020 | 1 440±150 | 3,10±0,55 | 6,08±0,97 | ≤ 17 | ≤ 1,5 | 6,7±2,0 |
| Paluel - champ lointain | Sassetot-le-Mauconduit | 08/07/2020 | Algues | Fucus *Fucus serratus* | Entier | cendre | 5,77 | 02/11/2020 | 1 350±140 | 2,90±0,51 | 7,5±1,0 | ≤ 26 | 1,86±0,74 | 5,8±1,6 |
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 22/01/2020 | Crustacés aquatiques | Araignée de mer *Maja brachydactyla* | Entier | cendre | 2,33 | 19/10/2020 | 62,1±6,5 | 0,86±0,23 | 0,56±0,26 | ≤ 6,7 | 0,53±0,26 | ≤ 11 |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 05/01/2020 | Crustacés aquatiques | Araignée de mer *Maja brachydactyla* | Entier | cendre | 2,62 | 20/10/2020 | 62,1±6,3 | 0,77±0,17 | 0,54±0,19 | ≤ 6,0 | 0,40±0,21 | ≤ 7,1 |
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 13/05/2020 | Mollusques aquatiques | Bulot *Buccinum undatum* | Chair | cendre | 3,77 | 03/11/2020 | 122±12 | ≤ 0,028 | 0,174±0,043 | ≤ 0,95 | 0,345±0,064 | ≤ 0,38 |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 01/07/2020 | Mollusques aquatiques | Bulot *Buccinum undatum* | Chair | cendre | 3,88 | 19/10/2020 | 113±11 | ≤ 0,068 | 0,256±0,094 | ≤ 2,1 | 0,36±0,12 | ≤ 0,38 |
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 26/01/2020 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | cendre | 4,73 | 20/11/2020 | 117±12 | ≤ 0,033 | ≤ 0,091 | ≤ 1,2 | ≤ 0,10 | ≤ 2,1 |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 29/06/2020 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | cendre | 4,61 | 20/11/2020 | 118±12 | ≤ 0,025 | ≤ 0,057 | ≤ 0,78 | ≤ 0,065 | ≤ 0,21 |

n.a. : non analysé.

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 |

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 43 - 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 2020 (Bq.kg$^{-1}$ sec pour les sédiments et les algues, Bq.kg$^{-1}$ frais pour les mollusques, les crustacés et les poissons).***

| Chronique | Station | 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 | $^{108m}$Ag | $^{106}$Rh | $^{241}$Am |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Paluel - champ proche | Saint-Valery-en-Caux | 08/07/2020 | Sédiments | Sable de plage | Diamètre inférieur à 2 mm | sec | 2,03 | 07/10/2020 | ≤ 0,100 | 2,67±0,25 | ≤ 0,23 | 0,77±0,14 | ≤ 0,14 | ≤ 0,13 | ≤ 0,25 | ≤ 0,30 | ≤ 0,12 | ≤ 1,1 | n.a. |
| Paluel - champ lointain | Sassetot-le-Mauconduit | 08/07/2020 | Sédiments | Sable de plage | Diamètre inférieur à 2 mm | sec | 1,35 | 06/10/2020 | ≤ 0,070 | ≤ 0,060 | ≤ 0,14 | ≤ 0,070 | ≤ 0,090 | ≤ 0,070 | ≤ 0,16 | ≤ 0,19 | ≤ 0,070 | ≤ 0,60 | n.a. |
| Paluel - champ proche | Saint-Valery-en-Caux | 08/07/2020 | Algues | Fucus *Fucus serratus* | Entier | cendre | 6,08 | 02/11/2020 | ≤ 0,12 | 0,357 ±0,079 | ≤ 0,37 | ≤ 0,20 | ≤ 0,20 | ≤ 0,15 | ≤ 0,40 | ≤ 0,30 | ≤ 0,17 | ≤ 1,2 | ≤ 0,15 |
| Paluel - champ lointain | Sassetot-le-Mauconduit | 08/07/2020 | Algues | Fucus *Fucus serratus* | Entier | cendre | 5,77 | 02/11/2020 | ≤ 0,16 | 0,283 ±0,065 | ≤ 0,53 | 0,249 ±0,100 | ≤ 0,28 | ≤ 0,21 | ≤ 0,51 | ≤ 0,37 | ≤ 0,23 | ≤ 1,9 | ≤ 0,19 |
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 22/01/2020 | Crustacés aquatiques | Araignée de mer *Maja brachydactyla* | Entier | cendre | 2,33 | 19/10/2020 | ≤ 0,058 | ≤ 0,044 | ≤ 0,70 | ≤ 0,063 | ≤ 0,14 | ≤ 0,086 | ≤ 0,95 | ≤ 0,14 | ≤ 0,070 | ≤ 0,72 | ≤ 0,039 |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 05/01/2020 | Crustacés aquatiques | Araignée de mer *Maja brachydactyla* | Entier | cendre | 2,62 | 20/10/2020 | ≤ 0,069 | ≤ 0,042 | ≤ 0,65 | ≤ 0,062 | ≤ 0,12 | ≤ 0,079 | ≤ 0,96 | ≤ 0,12 | ≤ 0,071 | ≤ 0,67 | ≤ 0,027 |
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 13/05/2020 | Mollusques aquatiques | Bulot *Buccinum undatum* | Chair | cendre | 3,77 | 03/11/2020 | ≤ 0,0069 | 0,0136 ±0,0036 | ≤ 0,036 | 0,0087 ±0,0051 | ≤ 0,012 | ≤ 0,0095 | ≤ 0,041 | ≤ 0,018 | 0,016 ±0,005 | ≤ 0,079 | ≤ 0,0090 |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 01/07/2020 | Mollusques aquatiques | Bulot *Buccinum undatum* | Chair | cendre | 3,88 | 19/10/2020 | ≤ 0,015 | ≤ 0,015 | ≤ 0,047 | ≤ 0,021 | ≤ 0,026 | ≤ 0,019 | ≤ 0,047 | ≤ 0,038 | 0,047 ±0,013 | ≤ 0,17 | ≤ 0,019 |
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 26/01/2020 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | cendre | 4,73 | 20/11/2020 | ≤ 0,0091 | 0,245 ±0,025 | ≤ 0,14 | ≤ 0,013 | ≤ 0,022 | ≤ 0,014 | ≤ 0,21 | ≤ 0,022 | ≤ 0,012 | ≤ 0,13 | ≤ 0,0091 |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 29/06/2020 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | cendre | 4,61 | 20/11/2020 | ≤ 0,0056 | 0,205 ±0,019 | ≤ 0,023 | ≤ 0,0090 | ≤ 0,0090 | ≤ 0,0078 | ≤ 0,023 | ≤ 0,013 | ≤ 0,0078 | ≤ 0,065 | ≤ 0,0062 |

n.a. : non analysé.

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 44 - Activités en tritium organiquement lié (TOL) mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2020.***

| Chronique | Station | 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 - champ proche | Paluel au large | 22/01/2020 | Crustacés aquatiques | Araignée de mer *Maja brachydactyla* | Chair | 4,14 | 08/02/2021 | 3,50±0,70 | 0,56±0,11 | Frais |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 05/01/2020 | Crustacés aquatiques | Araignée de mer *Maja brachydactyla* | Chair | 4,70 | 08/02/2021 | 3,50±0,70 | 0,50±0,10 | Frais |
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 13/05/2020 | Mollusques aquatiques | Bulot *Buccinum undatum* | Chair | 3,87 | 07/03/2021 | 4,1±1,1 | 0,67±0,18 | Frais |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 01/07/2020 | Mollusques aquatiques | Bulot *Buccinum undatum* | Chair | 3,88 | 08/02/2021 | 4,60±0,90 | 0,76±0,15 | Frais |
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 26/01/2020 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 4,67 | 03/03/2021 | 5,2±1,4 | 0,74±0,20 | Frais |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 29/06/2020 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 4,58 | 03/03/2021 | 2,30±0,80 | 0,33±0,12 | Frais |

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

***Tableau 45 - Activités en $^{14}C$ mesurées au sein des échantillons collectés dans l'environnement marin du site de Paluel lors du suivi radioécologique 2020.***

| Chronique | Station | Date de prélèvement | Nature | Espèce | Fraction | Frais/sec | Date de mesure du $^{14}C$ | $^{14}C$ (Bq.kg$^{-1}$ C) | $^{14}C$ (Bq.kg$^{-1}$ sec ou frais) | $C_{TOT}$ (g.kg$^{-1}$ sec ou frais) | $\delta^{13}C/^{12}C$ (‰ ) | pMC (%) | Unité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Paluel - champ proche | Paluel au large | 26/01/2020 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 4,67 | 27/12/2020 | 315±15 | 32,9±1,6 | 100 | -17,63 | 137,3±6,5 | Frais |
| Paluel - champ lointain | Saint-Pierre-en-Port au large | 29/06/2020 | Poissons | Bar *Dicentrarchus labrax* | Muscle | 4,58 | 27/12/2020 | 308±15 | 32,6±1,6 | 110 | -17,21 | 134,2±6,5 | Frais |

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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 (7 fois sur 10). L'activité la plus élevée (8,1±0,7 $Bq.kg^{-1}$ sec) est observée dans le sol de pâturage de Paluel, Le Tôt, dans la zone sous les vents 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 20).

En plus de l'eau de boisson et du lait de vache, dans lesquels l'activité en $^{3}H$ libre est recherchée depuis plusieurs années, cette activité a également été recherchée depuis 2015 dans l'herbe, les feuilles de salade, voire le lierre pour les CNPE de Flamanville et Gravelines (depuis 2016 et 2018 respectivement). En 2020, le $^{3}H$ libre a été recherché dans l'herbe, le lierre, les salades et le lait. Le $^{3}H$ libre est détecté dans deux des quatre échantillons de lait de vache récoltés, à des niveaux d'activité proches du seuil de décision (activité de 0,7±0,7 et 0,9±0,7 $Bq.L^{-1}$ ED dans l'environnement des CNPE de Penly et Flamanville ; et ≤ 0,6 $Bq.L^{-1}$ ED dans l'environnement des CNPE de Paluel et de Gravelines). Dans les salades échantillonnées sous influence des CNPE de Penly et de Gravelines, l'activité en $^{3}H$ libre est inférieure au seuil de décision (≤ 2,4 $Bq.L^{-1}$ ED). Dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Flamanville, l'activité en $^{3}H$ libre est un peu plus élevée (1,5±0,7 $Bq.L^{-1}$ ED), mais reste de l'ordre de grandeur du bruit de fond attendu en milieu terrestre hors influence des rejets des INB (0,5 à 2 $Bq.L^{-1}$ pour l'HTO et 0,39 à 1,9 $Bq.L^{-1}$ pour le TOL d'après [3]). Dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Gravelines et dans l'herbe échantillonnée à proximité des CNPE de Paluel et de Penly, l'activité en $^{3}H$ libre est en revanche plus élevée que ce bruit de fond (2,8±0,7 à 3,3±0,7 $Bq.L^{-1}$ ED), et témoigne d'un apport local en tritium libre.

Depuis 2010, le $^{3}H$ organiquement lié est lui aussi quantifié dans le lait de vache, à un niveau d'activité généralement proche du seuil de décision. En 2020, le $^{3}H$ organiquement lié a été recherché dans la salade, l'herbe et les feuilles de lierre, et son activité y est proche du bruit de fond attendu en milieu terrestre hors influence des rejets des INB (0,5 à 2 $Bq.L^{-1}$ pour l'HTO et 0,39 à 1,9 $Bq.L^{-1}$ pour le TOL d'après [3]), hormis dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Gravelines, où l'activité en $^{3}H$ organiquement lié mesurée témoigne d'un apport local (2,9±0,7 $Bq.L^{-1}$ EC).

Enfin, l'activité en $^{14}C$ dans la salade dans l'environnement du CNPE de Penly et de Gravelines est comparable à la valeur du bruit de fond sur le territoire français hors influence industrielle (224±7 $Bq.kg^{-1}$ C d'après [3]). L'activité en $^{14}C$ dans le lait est proche de ce bruit de fond dans l'environnement des CNPE de Flamanville et de Gravelines, tandis qu'elle témoigne d'un apport local (244±12 et 246±12 $Bq.kg^{-1}$ C) dans l'environnement des CNPE de Paluel et Penly, sans que la contribution des rejets du site ne soit démontrée. En revanche, 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), et Gravelines (lierre) (à environ un kilomètre ou moins des différents CNPE) était significativement supérieure au bruit de fond hors influence industrielle (activité comprise entre 241±12 $Bq.kg^{-1}$ C, dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Flamanville, et 261±13 $Bq.kg^{-1}$ C, dans le lierre échantillonné à proximité du CNPE de Gravelines) ; témoignant d'un apport local probable en $^{14}C$ dans l'environnement immédiat de ces CNPE pour l'herbe ou le lierre.

À la vue des résultats obtenus dans le cadre du suivi radioécologique 2020, 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, de lait 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 $^{3}H$ (libre et organiquement lié), ainsi que pour le $^{14}C$.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

## 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 $^{3}$H. 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 $^{110m}$Ag), tout comme le $^{3}$H 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 $^{3}$H 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 18 page 160).

Le $^{137}$Cs est le radionucléide artificiel le plus fréquemment détecté au sein des matrices échantillonnées (40 fois sur 49). Les activités en $^{137}$Cs sont relativement homogènes de Flamanville à Gravelines (Figure 19 page 161). 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 mBq par kg de matière fraîche. L'$^{131}$I, recherché dans les algues échantillonnées à proximité des CNPE de Flamanville et de Gravelines, n'est pas détecté à des niveaux supérieurs au seuil de décision.

Les activités en tritium organiquement lié (2,1±0,8 à 14,2±1,4 Bq.L$^{-1}$ EC) dans 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 Bq.L$^{-1}$, et qui varient généralement de 0,3 à 10 Bq.L$^{-1}$) 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 (5 des 21 activités mesurées sont supérieures à 5 Bq.L$^{-1}$ EC, avec une activité maximale de 14,2±1,4 Bq.L$^{-1}$ EC dans les patelles récoltées à proximité du CNPE de Flamanville) dans l'environnement des CNPE de Flamanville, Penly et Gravelines en 2020.

Les activités en $^{14}$C quantifiées au sein des crustacés, des mollusques et des poissons échantillonnées dans l'environnement marin des CNPE (223±11 à 520±25 Bq.kg$^{-1}$ C) sont pour la plupart (9 des 10 activités mesurées, l'exception étant représentée par les bars d'aquaculture du Centre Aquacole de Gravelines) supérieures au bruit de fond hors influence industrielle (233±5 Bq.kg$^{-1}$ C en 2020 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 [28], 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 mollusques à proximité du CNPE de Flamanville, et pour les

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

poissons à proximité du CNPE de Penly (Figure 20 page 161). Les différences ne sont pas significatives pour les poissons à Paluel. A Flamanville et Gravelines, les poissons n'ont été échantillonnés qu'en champ proche et la comparaison n'est pas possible. Il en est de même pour les crustacés à Flamanville, échantillonnés uniquement en champ proche.

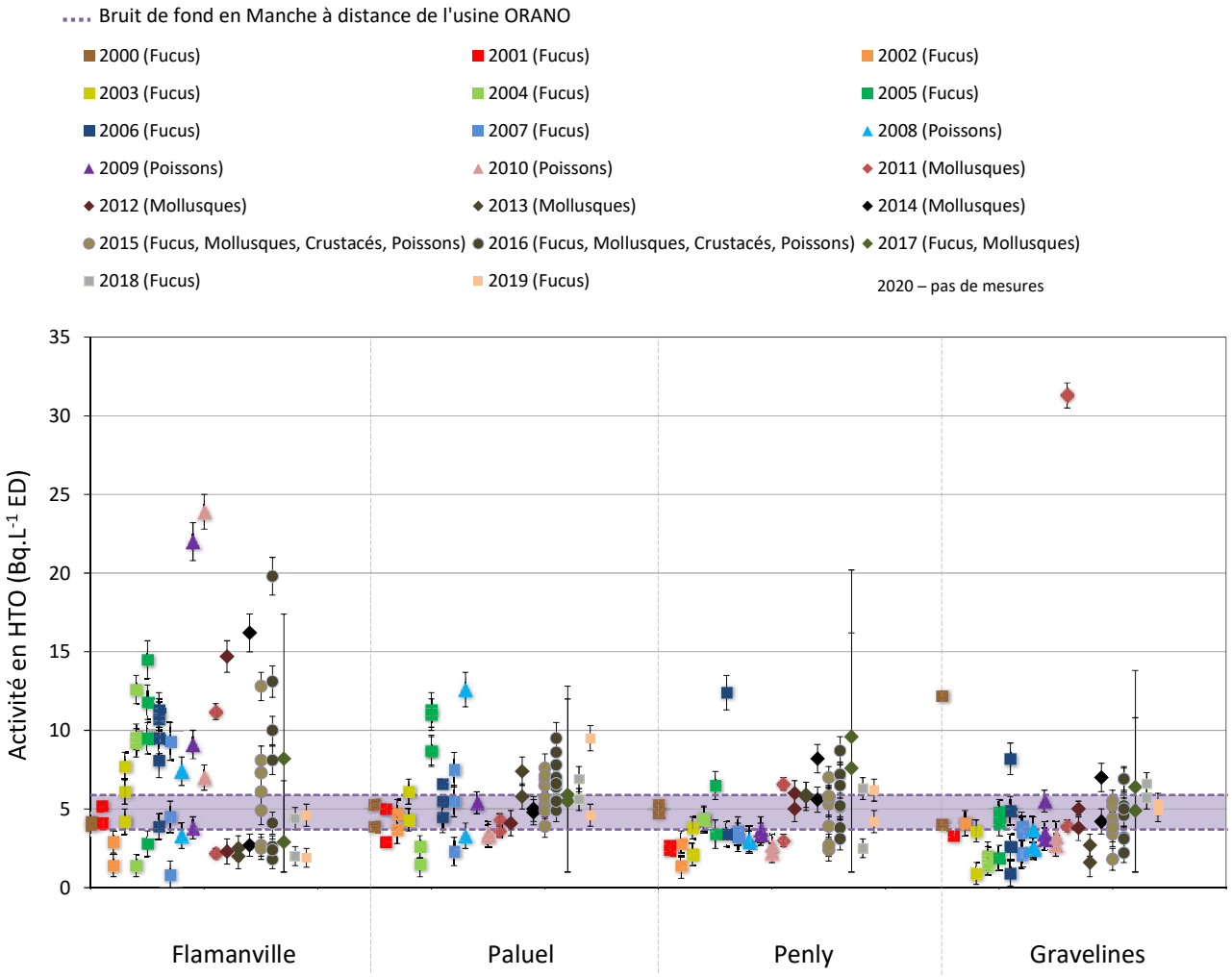



***Figure 18 - Activités en tritium libre (Bq.L$^{-1}$ ED) mesurées dans les algues, les mollusques, les crustacés et les poissons échantillonnés dans l'environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord depuis 2000. La zone violette indique le bruit de fond attendu en entrée de Manche (i.e. entre 3,7 et 5,9 Bq.L$^{-1}$ à distance de l'usine ORANO [3, 26, 27]).***

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

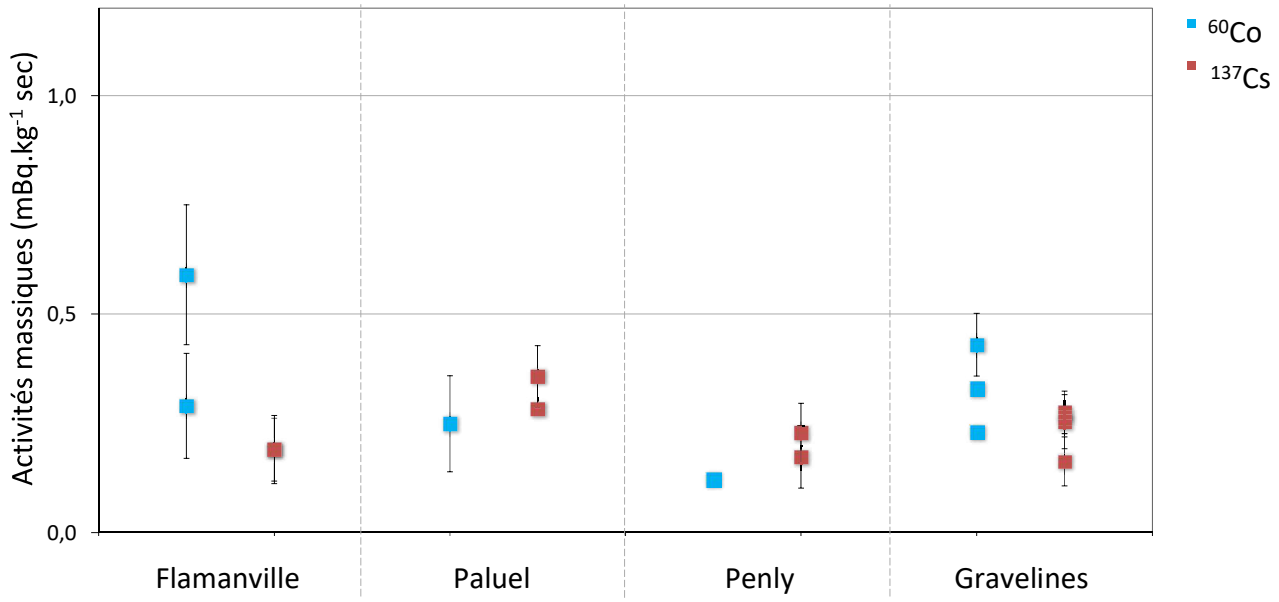



***Figure 19 - Activités en $^{60}$Co et en $^{137}$Cs mesurées dans les algues échantillonnées en 2020 dans l'environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord.***

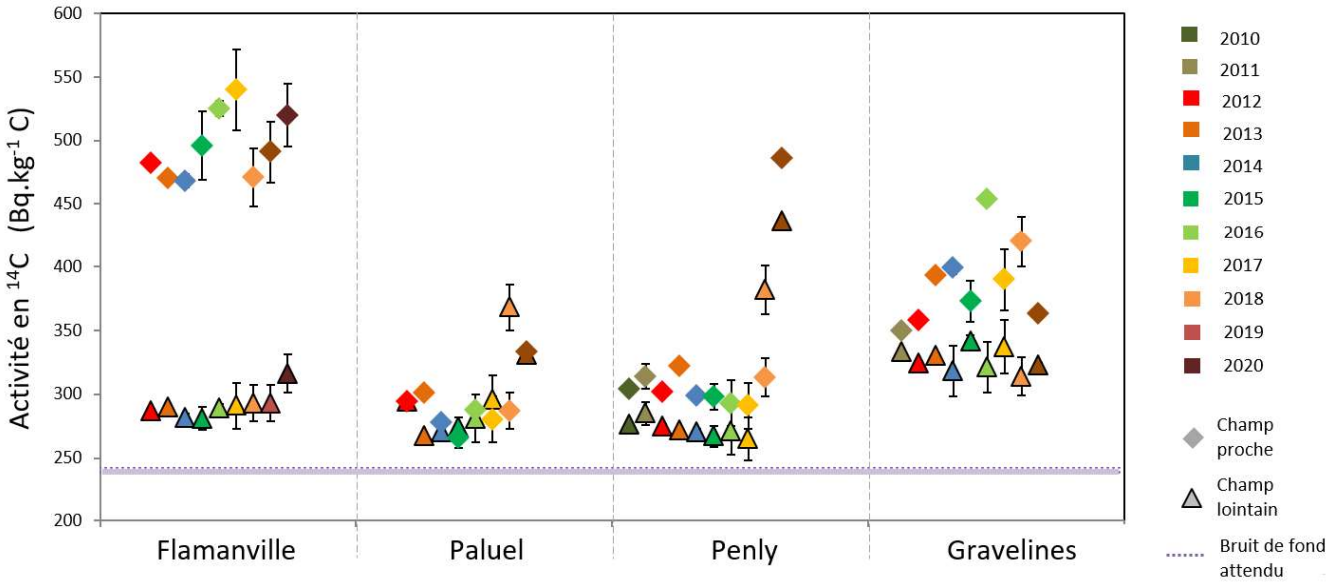



***Figure 20 - Activités en $^{14}$C (Bq.kg$^{-1}$ C) dans les mollusques (patelles et moules) échantillonnés depuis 2010 dans l'environnement proche des CNPE en Manche et Mer du Nord. Le graphique distingue les prélèvements fait en champ proche de chaque CNPE (losanges) de ceux effectués en champ lointain (triangles), et indique en violet le bruit de fond attendu hors influence industrielle (i.e., 240±2 Bq.kg$^{-1}$ C d'après [3]).***

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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. 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; Accessible à l'adresse: http://livre-blanc-tritium.asn.fr/.
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 Sûreté 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 techniques2008. p. 190.
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. Roussel-Debet, S., Gontier, G., Siclet, F., et Fournier, M., *Distribution of Carbon 14 in the terrestrial environment close to French nuclear power plants.* Journal of Environmental Radioactivity, 2006. **87**(3): 246-259 p.
17. 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.
18. IRSN, *Tchernobyl, 25 ans après.* in *Collection thématique de l'IRSN*2011, IRSN. 48 p.
19. Renaud, P., Champion, D., et Brenot, J., *Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français. Conséquences environementales et exposition des personnes.*2007, Paris: Éditions Tec & Doc. Collection Sciences et techniques. Lavoisier.


IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

20. 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.

21. 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.

22. IAEA, *Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment* 2004, IAEA. 95 p p.

23. 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.

24. IRSN, *Radionucléides naturels en France*. 2007, IRSN. Rapport Rapport DEI/SESURE n°2007-21, 45 p.

25. Reimann, C., Filzmoserb, P., et Garrettc, R.G., *Background and threshold: critical comparison of methods of determination*. Science of the Total Environment, 2005. **346**: 1-16 p.

26. IRSN, *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de juin 2011 à décembre 2014*. 2015, IRSN. 252 p.

27. 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.

28. IRSN, *Synthèse du suivi radioécologique 2013 des 19 centres nucléaires de production d'électricité en exploitation*. 2014, IRSN. 132 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 og 14C data*. Radiocarbon, 1977. **19**(3): 355-363 p.

35. Laboratoire national Henri Becquerel, *Arrondissage 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.

38. ASN, *Livre blanc du tritium*, 2010, ASN. 304 p p.

39. IAEA, *Monitoring isotopes in rivers : creation of the global network of isotopes in rivers (GNIR)*. 2012, IAEA. Rapport IAEA-TECDOC-1673, 258 p.

40. Rank, D., Papesch, W., Heiss, G., et Tesch, R., *Isotopic composition of river water in the danube basin - results from the joint danube survey 2 (2007)*. Austrian Journal of Earth Sciences, 2009. **102**(2): 170-180 p.


IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 10. ANNEXES

**Annexe 1. Choix des stations de prélèvements ..... 170**

**Annexe 2. Choix des matrices prélevées ..... 170**

2.1. Domaine terrestre ..... 170
2.1.1. Eaux ..... 170
2.1.2. Les bryophytes ..... 170
2.1.3. Les sols ..... 171
2.1.4. L'herbe ..... 171
2.1.5. Les végétaux cultivés ..... 171
2.1.6. Le lait ..... 171
2.2. Domaine aquatique marin ..... 171
2.2.1. Les sédiments ..... 171
2.2.2. Algues ..... 171
2.2.3. Les poissons, mollusques et crustacés ..... 172

**Annexe 3. Choix des fréquences d'analyses ..... 172**

**Annexe 4. Choix des analyses ..... 172**

**Annexe 5. Méthode de prélèvements sur le terrain ..... 172**

5.1. Domaine terrestre ..... 172
5.1.1. Eaux (eau de boisson, eau de nappe) ..... 172
5.1.2. Sols ..... 172
5.1.3. Végétaux ..... 173
5.1.4. Lait ..... 174
5.2. Domaine aquatique marin ..... 174
5.2.1. Sédiments ..... 174
5.2.2. Végétaux ..... 174
5.2.3. Poissons, crustacés, mollusques ..... 174

**Annexe 6. Préparation et conditionnement des échantillons ..... 174**

6.1. Domaine terrestre ..... 174
6.1.1. Eau de boisson ..... 174
6.1.1.1. Mesurage des émetteurs gamma ..... 174
6.1.1.2. Mesurage du tritium ..... 175
6.1.2. Sols ..... 175
6.1.3. Végétaux ..... 175
6.1.3.1. Mesurage des émetteurs gamma ..... 175
6.1.3.2. Mesurage du tritium et du $^{14}C$ ..... 176
6.1.4. Lait ..... 176
6.1.4.1. Mesurage des émetteurs gamma ..... 176
6.1.4.2. Mesurage du tritium et du $^{14}C$ ..... 176
6.2. Domaine aquatique marin ..... 176
6.2.1. Sédiments ..... 176
6.2.2. Végétaux ..... 176
6.2.2.1. Mesurage des émetteurs gamma ..... 176
6.2.2.2. Mesurage du tritium et du $^{14}C$ ..... 176
6.2.3. Poissons, crustacés, mollusques ..... 178
6.2.3.1. Mesurage des émetteurs gamma ..... 178
6.2.3.2. Mesurage du tritium et $^{14}C$ ..... 178

**Annexe 7. Techniques d'analyses ..... 178**

7.1. Détermination de la teneur en matière organique et de la granulométrie des sols et des sédiments ..... 178
7.1.1. Teneur en matière organique ..... 178
7.1.2. Granulométrie ..... 178
7.2. Identification des espèces vivantes ..... 179
7.3. Mesure du tritium libre ..... 179
7.4. Mesure du tritium organiquement lié ..... 179
7.5. Mesure du $^{14}C$ ..... 179
7.6. Spectrométrie $\gamma$ ..... 180

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

**Annexe 8. Expression des résultats et unités utilisées ..... 181**

**Annexe 9. Radionucléides dans l'environnement ..... 182**

9.1. Radioactivité d'origine naturelle ..... 182
9.2. Radioactivité d'origine artificielle ..... 183
9.2.1. Retombées atmosphériques des essais militaires ..... 183
9.2.2. Retombées dues aux accidents d'installations nucléaires ..... 184
9.2.3. Effluents liquides et atmosphériques des CNPE en fonctionnement normal ..... 184
9.2.4. Effluents liquides et atmosphériques d'autres installations ..... 184
9.3. Sources de $^{3}H$ ..... 184
9.4. Sources de $^{14}C$ ..... 185

**Annexe 10. Laboratoires d'analyses ..... 186**

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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 10.1 page 169 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 l'$^{131}$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 ($^{3}$H, $^{7}$Be et $^{14}$C) ainsi que des radionucléides d'origine artificielle ($^{137}$Cs) sont présents dans l'environnement terrestre. Les activités en radionucléides naturellement présents ($^{3}$H, $^{14}$C) peuvent être augmentées par les rejets d'effluents de l'industrie nucléaire ou les activités militaires. Les dépôts

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

globaux de ces radionucléides ($^{3}$H, $^{14}$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, $^{110m}$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 $^{3}$H 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 l'$^{131}$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 $^{3}$H et $^{14}$C ($^{54}$Mn, $^{57}$Co, $^{58}$Co, $^{60}$Co, $^{110m}$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 $^{3}$H 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 écocomplexe et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications, naturelles ou provoquées ».

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

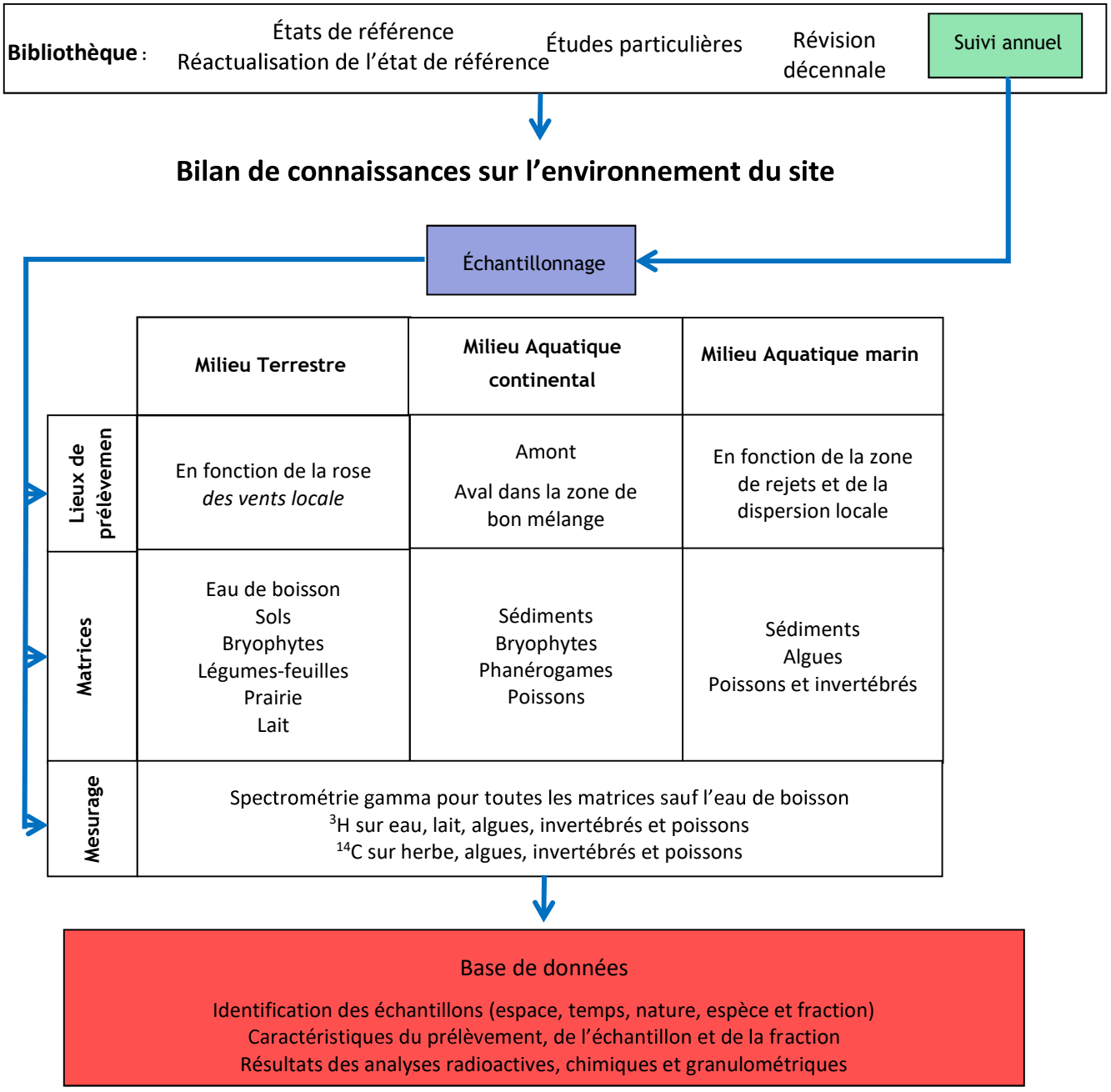



***Figure 10.1 - Démarche utilisée pour la réalisation du suivi radioécologique annuel de chaque site.***

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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. 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

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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. Algues

Les macroalgues peuvent concentrer jusqu'à 10 000 fois les radionucléides dissous dans l'eau de mer [22]. 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

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 $^{54}Mn$, $^{58}Co$, $^{60}Co$, $^{63}Ni$, $^{123m}Te$, $^{124}Sb$, $^{125}Sb$, $^{134}Cs$ 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.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 sachet 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.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

### 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 $^{3}H$ libre, lié et $^{14}C$ 1à 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

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 $^{3}H$ 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 $\gamma$. 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 10.2 page 175). 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 $\gamma$. Le rapport poids frais / poids sec est déterminé sur chaque aliquote de façon à exprimer l'ensemble des résultats dans la même unité ($Bq.kg^{-1}$ sec).

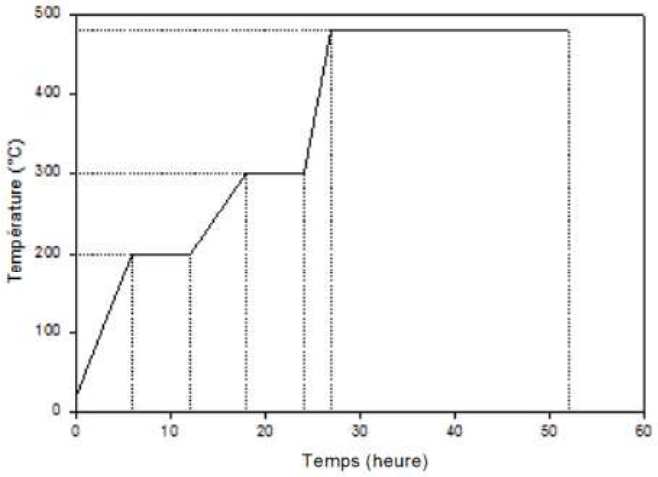



***Figure 10.2 - Chronique d'une incinération : montée en température et paliers en fonction du temps.***

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

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

#### 6.1.3.2. 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.

### 6.1.4. 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 $\gamma$.

#### 6.1.4.2. Mesurage du tritium et du $^{14}C$

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 $^{14}C$. 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 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. 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 $\gamma$.

### 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 incinérés à 480 °C dans un four à moufle (cf. chronique d'une incinération, figure 10.2 page 175). 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 l'$^{131}I$ 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

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

### 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 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 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 Stockes 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.

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

## 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 ($^{3}$He), 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

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 $^{13}C/^{12}C$ 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.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# 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 $\beta^-$, donne naissance avec un rendement de 94,6 % au $^{137m}Ba$ de période 2,55 minutes et avec un rendement de 5,4 % au $^{137}Ba$, stable. Le $^{137m}Ba$ conduit au $^{137}Ba$, avec émission gamma (rendement de 85 %). Dans le rapport, l'activité gamma mesurée du $^{137m}Ba$, 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 $^{13}C/^{12}C$ ($\delta^{13}C$ ci-dessous) :

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

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) :

$$BqS = BqC\ (C\ /\ 1000)$$

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 ± incertitude » (± 2 σ). 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 ± incertitude » ainsi que les SD sont arrondis depuis 2011 selon les règles du Laboratoire National Henri Becquerel [35].

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 :

$$^{137}Cs_{ref} = {}^{137}Cs_{meas}\,\frac{(1.15\pm0.20)\cdot CC_{ref}+(0.43\pm0.16)\cdot FSC_{ref}}{(1.15\pm0.20)\cdot CC_{meas}+(0.43\pm0.16)\cdot FSC_{meas}}$$

IRS ou du secret en matière industrielle et commerciale. ite préalable. intellectuelle

Où :

$^{137}Cs_{ref}$ = activité massique en $^{137}Cs$ normalisée (une station aval dans ce document) ;

$^{137}Cs_{meas}$ = 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 l'$^{238}U$ comprenant 14 descendants, et à celle du $^{232}Th$ en comprenant 10. Le $^{7}Be$ est parfois détecté.

Dans le cas des deux familles du $^{232}Th$ et de l'$^{238}U$, 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 l'$^{238}U$ : $^{234}Pa$, $^{234}Th$, $^{214}Pb$, $^{214}Bi$, $^{210}Pb$

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 : $^{40}K + (14 \times {}^{238}U) + (10 \times {}^{232}Th) + {}^{7}Be$. 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 [24].

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

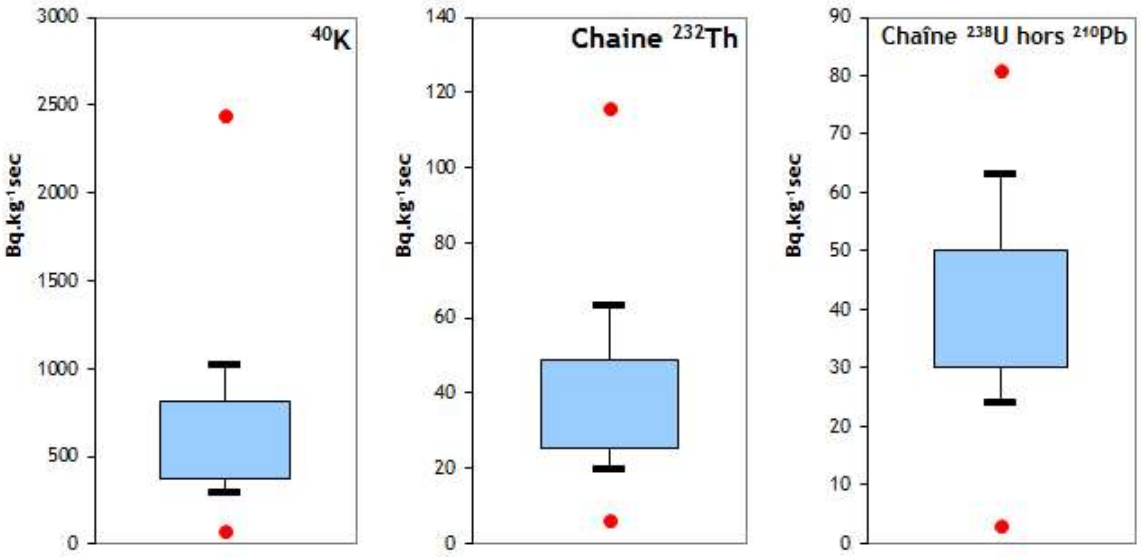



***Figure 10.3 – Teneur en $^{40}K$ et en radionucléides des familles du $^{232}Th$ et du $^{238}U$ dans les sols métropolitains (1er et 3ème quartiles, 1er et 9ème déciles, minimum et maximum).***

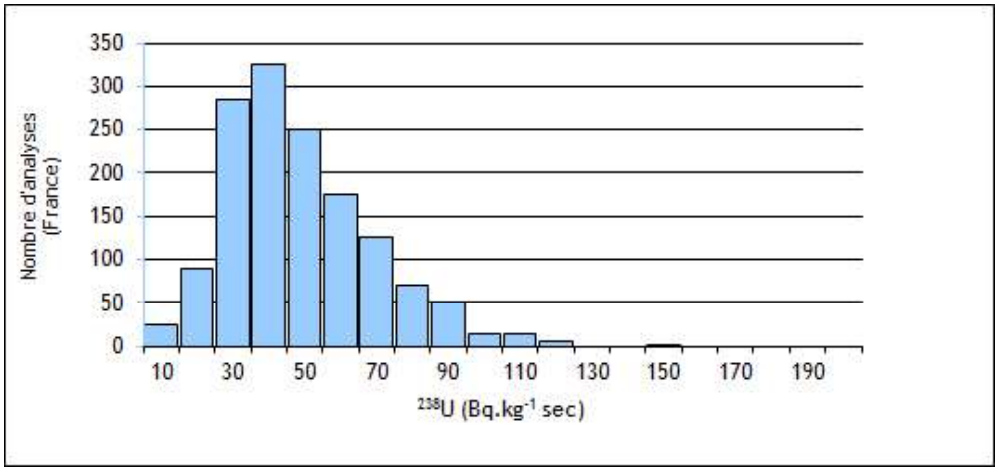



***Figure 10.4 – Teneur en $^{238}U$ dans les sédiments métropolitains.***

## 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

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 $^{144}$Ce/Pr, $^{141}$Ce, $^{137}$Cs, $^{54}$Mn, $^{57}$Co, $^{58}$Co, $^{60}$Co, $^{103}$Ru, $^{106}$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 $^{134+137}$Cs, l'$^{131}$I, le $^{132}$Te, le $^{140}$Ba et les $^{103+106}$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 $^{137}$Cs/$^{134}$Cs est proche de 1 [20]. 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 $\gamma$ émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal sont : $^{58}$Co, $^{60}$Co, $^{110m}$Ag, $^{123m}$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 $^{110m}$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 usé 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 $^{3}$H

En dehors des rejets de $^{3}$H liquides et dans l'atmosphère par les CNPE, le $^{3}$H 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-


Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

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 $^{3}H$ de l'eau de pluie étaient inférieures à 2 $Bq.L^{-1}$. Le $^{3}H$ 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 proche de 1 $Bq.L^{-1}$.

Hors influence industrielle locale, les activités en tritium libre sont à l'équilibre entre l'eau atmosphérique et l'eau libre des matrices du milieu terrestre [38]. L'activité en tritium organiquement lié mesurée dans les échantillons biologiques rend compte de l'activité atmosphérique du tritium au cours de la période de croissance de l'échantillon.

En milieu aquatique continental, hors influence industrielle locale, les activités en tritium libre des échantillons sont à l'équilibre avec les activités atmosphériques actuelles [38-40]. Les activités en tritium organiquement lié dans les sédiments sont plus élevées que celles mesurées dans les végétaux et poissons, elles-mêmes supérieures au tritium libre des eaux de surface. Hors influence de toute activité industrielle actuelle, les niveaux observés résultent de l'exposition des organismes aquatiques à deux sources de tritium différenciées par leur forme (libre et organiquement lié) et par leur âge : le tritium libre atmosphérique actuel et le tritium organiquement lié, drainé sur le bassin versant et rémanent d'une époque où les niveaux de tritium libre atmosphérique étaient plus élevés.

En milieu aquatique marin, l'activité du tritium libre est de l'ordre de 0,1 $Bq.L^{-1}$ dans les eaux marines de surface [14]. Elle est comprise entre 0,3 et 10 $Bq.L^{-1}$ le long des côtes de la Manche et de la mer du Nord, principalement du fait des rejets d'effluents liquides effectués par l'usine de traitement du combustible usé ORANO de la Hague.

## 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 2020, proche de 224 $Bq.kg^{-1}$ de carbone [3].

En milieu aquatique, l'activité spécifique du $^{14}C$ varie avec sa dilution dans les substances carbonées, en particulier les carbonates anciens issus des roches sédimentaires appauvries en carbone 14. Contrairement au milieu terrestre, le $^{14}C$ des écosystèmes d'eau douce n'est pas en équilibre avec le $CO_2$ atmosphérique ; les activités spécifiques dans l'eau et les végétaux, hors influence industrielle locale y sont plus faibles : inférieures à 220 $Bq.kg^{-1}$ de carbone [3, 28].

En milieu marin, le $^{14}C$ rejeté est en grande majorité sous forme minérale dissoute [23] et peut donc être incorporé ensuite à la matière organique. A 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 [17]. 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 $Bq.kg^{-1}$ de carbone.

IRSN
Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

# Annexe 10. Laboratoires d'analyses

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

IRSN

Sous réserve du droit des tiers, ce document ne peut être communiqué, divulgué ou reproduit à ou par des tiers sans autorisation écrite préalable. Il est susceptible de contenir des informations confidentielles, au regard de la sécurité notamment, ou protégées au titre de la propriété intellectuelle ou du secret en matière industrielle et commerciale.

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

31 av. de la division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

**COURRIER**
B.P 17 - 92260 Fontenay-aux-Roses

**TÉLÉPHONE**
+33 (0)1 58 35 88 88

**SITE INTERNET**
www.irsn.fr

MEMBRE DE
ETSON