



DOSSIER

DP2D_LP5-CB

**PROJET BRENNILIS - PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES
SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS
- PIÈCE 1 : RÉSUMÉ PÉDAGOGIQUE - PIÈCE 2 : NOTE
D305615001831 IND. B**

Référence : D455517011815

Indice :

Nb de pages : 97

Résultat de publication

DP2D_LP5-CB

PROJET : BRENNILIS

Plan de gestion des terres situées sous le radier de la Station de Traitement des Effluents

PIECE 1

Résumé Pédagogique

Contexte

La station de traitement des effluents (STE) du site nucléaire en déconstruction de Brennilis servait à traiter certains effluents radioactifs. Elle a fonctionné de 1967 à 1985. Les travaux de démantèlement de la STE ont été terminés en juillet 2016, à l'exception du **radier**, dont le retrait est en cours jusqu'à fin 2017.

Radier : dalle de béton qui sert d'assise à une construction et assure son isolation avec le sol.

Une fois ce retrait terminé, EDF mettra en œuvre une démarche d'assainissement des terres situées sous le radier, car certaines sont légèrement marquées radiologiquement. Cette démarche, qui répond au guide d'assainissement des sols de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), fait l'objet d'un **Plan de gestion des terres**, soumis à accord de l'ASN.

Présentation du sous-sol et du radier

La STE occupait une superficie de 750 m² et était enterrée à **5 mètres sous le niveau naturel du terrain**. Le niveau du bas du radier est situé pour l'essentiel à la cote 218 m NGF, et son épaisseur varie de 50 cm à 1 mètre (en moyenne 80 cm).

Sous-sol et nappe phréatique

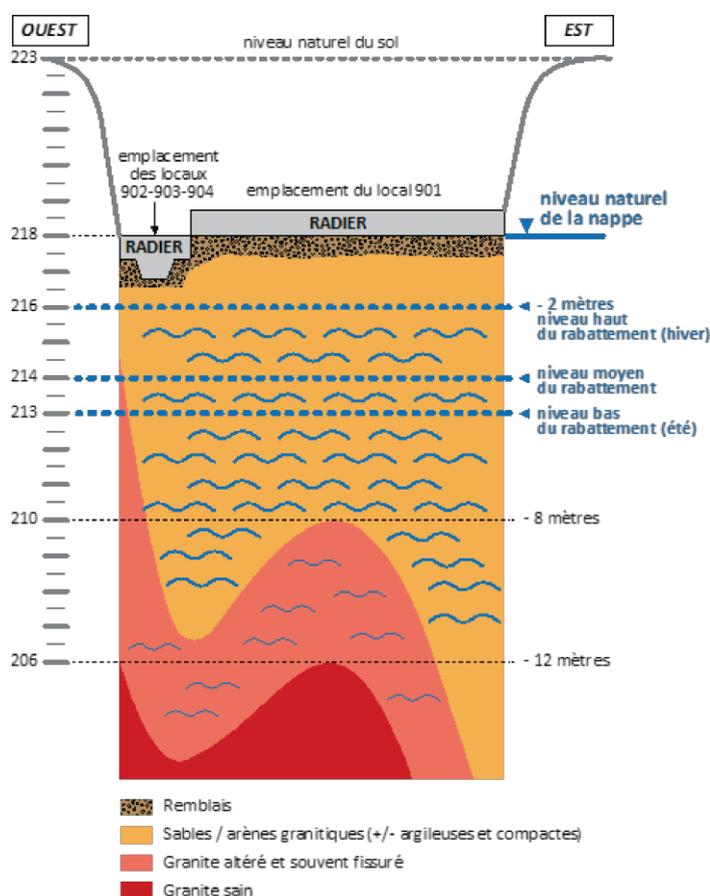
Les sous-sols de la STE sont constitués de remblais, puis de sables et d'arènes granitiques plus ou moins argileuses et compactes, et enfin de granite, d'abord fissuré puis sain.

Le niveau naturel de la nappe phréatique sous la STE correspond au niveau du bas du radier (218 m NGF). Après la démolition des étages supérieurs de la STE, début 2000, **un rabattement de la nappe par pompage** a été mis en place pour en abaisser le niveau. Ce rabattement empêche que la poussée de l'eau affecte le génie civil restant en place et prévient ainsi le risque d'infiltrations et de transfert des radioéléments présents.

Avec ce rabattement, la nappe oscille entre - 2 mètres et - 5 mètres sous le bas du radier suivant la pluviométrie et les saisons. Les eaux de la nappe pompées sous la STE sont **contrôlées puis rejetées dans le lac Saint-Michel**.

Après la fin du démantèlement, la zone de la STE sera **remblayée à son niveau initial naturel (cote 223 m NGF) par 5 mètres de terres naturelles et le rabattement sera arrêté**.

NGF (nivellement général de la France) : repère de l'altitude par rapport au niveau zéro de référence, qui est la Méditerranée à Marseille.



État du radier

Pendant la période d'exploitation de la STE, des déversements d'effluents se sont produits dans le local principal de la STE. La

cartographie radiologique du radier montre que la plupart de la surface se situe en-dessous de 8 000 Bq/kg, avec deux zones plus particulièrement marquées au sud et à l'ouest du local principal. Les principaux radioéléments présents sont du césium 137, du strontium 90 et du nickel 63.

Diagnostic du sous-sol : la nappe et les terres

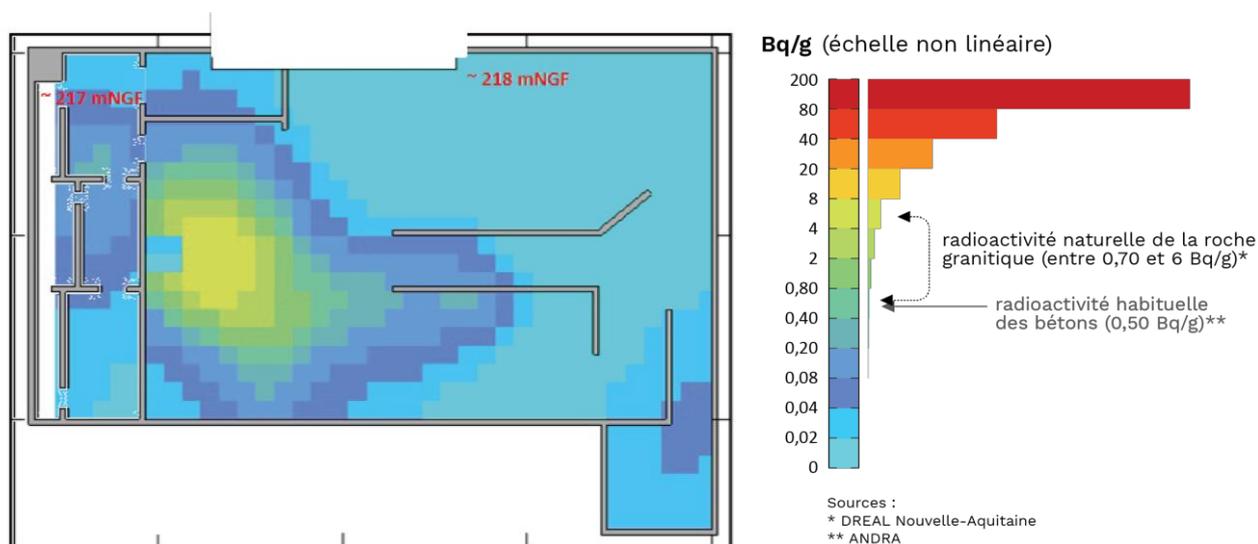
État de la nappe

La nappe au niveau de la STE fait l'objet d'une double surveillance : la **surveillance des eaux pompées** pour le rabattement de la nappe, et la **surveillance des eaux souterraines à proximité de la STE**. Ce suivi a donné lieu à près de 10 000 mesures, qui montrent la **propreté chimique et radiologique des eaux de nappe**.

État des terres

En 2008, 34 sondages ont été effectués **dans le radier et les terres en-dessous** jusqu'à moins 3-4 mètres, et 180 échantillons issus de ces sondages ont été analysés. Ces analyses permettent d'estimer la radioactivité artificielle totale **dans les terres** à 4 GBq (radionucléides : césium 137, cobalt 60, tritium et nickel 63), un niveau faible, comparable au niveau de radioactivité naturelle. Une modélisation du sous-sol, présentée ci-dessous, montre que le **marquage des sols est localisé pour l'essentiel sous la partie ouest** du local principal de la STE (901), et **dans les 50 premiers centimètres de terres**.

Modélisation du marquage des terres sous la STE





Aucun impact sanitaire

Après la fin du démantèlement, la zone de la STE sera **remblayée à son niveau initial naturel (cote 223 m NGF) par 5 mètres de terres** non marquées radiologiquement. Même si l'usage prévu du site à la fin du démantèlement sera industriel, différents scénarios d'utilisation de la zone de la STE, **bien que non réalistes**, ont été étudiés pour envisager les hypothèses les plus pénalisantes. Ces scénarios sont issus du guide consacré à la gestion de sites contaminés, publié par l'IRSN en 2011.

Scénario « Pêche dans l'Ellez »

Ce scénario considère **l'exposition d'un pêcheur sur l'Ellez au plus près du site** (bien que la pêche soit interdite entre le Lac Saint-Michel et le Lac Saint-Herbot par arrêté préfectoral). On suppose, de manière majorante, qu'à l'arrêt du rabattement, les radionucléides restant présents dans les terres sont instantanément et en totalité transférés dans la nappe, et donc en partie vers l'Ellez. Les voies d'exposition du pêcheur seraient alors l'ingestion de poisson et l'exposition externe sur les berges. **L'exposition calculée pour ce scénario est de l'ordre de 1/100 000^{ème} de la limite réglementaire d'exposition du public à la radioactivité artificielle.**

Scénario « Installation d'une famille ou d'activités sur le site »

Un scénario d'**implantation d'une famille ou d'activités non industrielles** sur le site a également été étudié :

- Une famille s'installe 100 % du temps sur le site dans une maison avec jardin et potager dont elle consomme les légumes ;
- L'une des activités suivantes s'implante sur le site : bâtiment de bureau, agriculture de maraîchage, école maternelle, parking ; stade, base de loisirs, abandon en libre accès et utilisation comme terrain de jeu d'enfants (6 heures par WE), chantier de construction...

Dans la mesure où la zone de la STE sera remblayée à son niveau initial par 5 mètres de terres naturelles non marquées, il n'y aura **pas de voie d'exposition directe en surface**, que ce soit par irradiation externe, ingestion de terres ou inhalation de poussières : **l'exposition sera nulle.**

Cependant, de manière très pénalisante, l'impact pour ces scénarios a également été calculé en **l'absence de remblai**, autrement dit en imaginant que la famille ou l'activité s'installent au niveau de l'ancien radier. Pour cette hypothèse, doublement irréaliste, d'une part en raison du remblaiement prévu, et d'autre part en raison de la présence naturelle de la nappe à ce niveau, **l'exposition calculée est de l'ordre de 1/10^{ème} de la limite réglementaire d'exposition du public à la radioactivité artificielle.**

Synthèse : les impacts sanitaires associés aux différents scénarios

Les différents scénarios sont représentés sur le schéma ci-dessous, avec les impacts associés. Ces impacts, calculés en tenant compte de l'ensemble des radionucléides artificiels présents, sont à comparer à ceux liés à la radioactivité naturelle (**2,4 mSv/an**) et à la limite d'exposition à la radioactivité artificielle pour une personne du public (**1 mSv/an**).

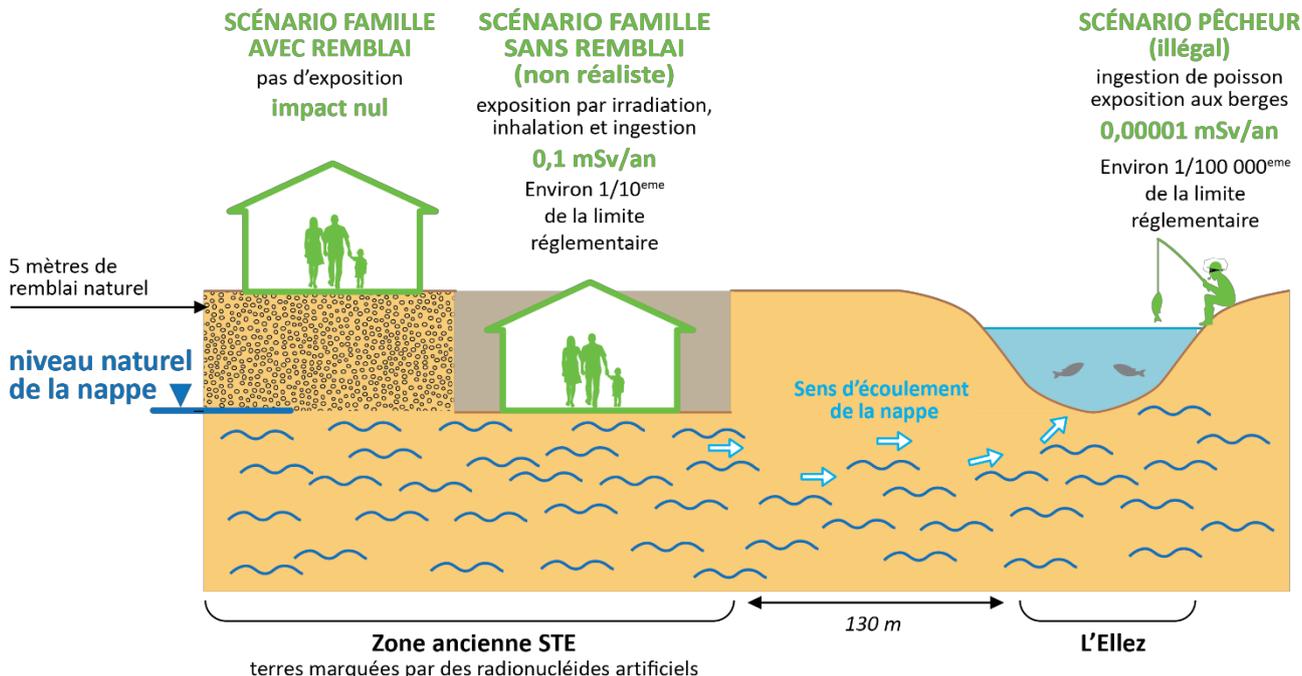
Sv (sievert) : unité de mesure de l'impact des rayonnements sur l'homme.

mSv : millisievert (0.001 Sv)



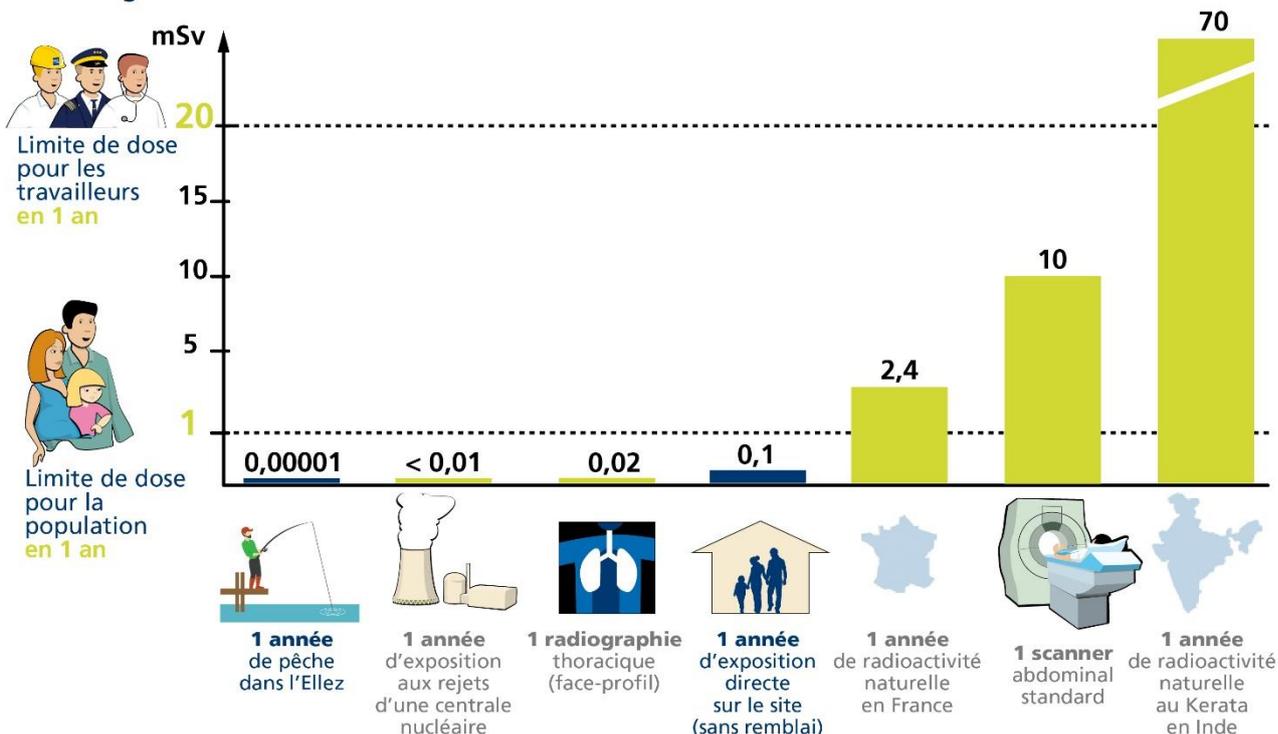
Résumé pédagogique du dossier technique

Impact pour les différents scénarios sans enlever de terre sous le radier



ECHELLE DES EXPOSITIONS

Seuils réglementaires





Même sans aucune excavation, l'état des sols est compatible avec tous les usages étudiés, y compris pour les scénarios d'usage les plus majorants, étudiés malgré leur caractère irréaliste. **Aucune mesure de gestion n'est justifiée par la préservation des intérêts protégés par la loi.**

Démarche d'assainissement proposée

Le remblaiement de la zone de la STE à son niveau initial par 5 mètres de terres naturelles **fait écran à tout risque d'exposition** au droit de cette zone. De fait, sans aucune autre action d'assainissement, l'impact calculé serait nul dans tous les scénarios envisagés.

Cependant, afin d'éliminer une partie significative de la faible radioactivité artificielle marquant le sous-sol à cet endroit, EDF propose d'excaver la couche de terre située sous le radier sur une épaisseur de 50 centimètres, soit près de 600 tonnes.

Cet assainissement permettra de diviser par 4 l'exposition calculée pour le scénario « famille », le plus pénalisant.

A noter que les terres excavées sous l'emprise de la STE seront **dans leur totalité considérées comme des déchets TFA**. Elles seront conditionnées en grands sacs et transportées jusqu'à un centre de stockage dédié de l'ANDRA (Aube).

Une excavation sur une plus grande profondeur (au-delà de 50 centimètres) n'aurait aucun effet significatif supplémentaire sur la réduction de l'activité résiduelle des terres restantes ni sur l'exposition associée. En revanche, le volume de déchets TFA produits augmenterait fortement avec la profondeur d'excavation, générant des nuisances disproportionnées par rapport au gain attendu. A titre d'exemple, excaver jusqu'à 4 mètres de profondeur multiplierait par 6 les transports de terre par camion et les émissions de CO₂.

***TFA** (très faible activité) : classification des déchets considérés comme radioactifs et dont l'activité massique est inférieure à 100 Bq/g.*

***ANDRA** : Agence Nationale de gestion des Déchets Radioactifs*

Cette démarche d'assainissement poussé répond aux attentes exprimées par l'ASN dans son Guide n° 24 (août 2016), qui recommande d'« aller aussi loin que raisonnablement possible dans l'assainissement », ainsi qu'aux objectifs du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs, élaboré sous l'égide du Ministère de l'Environnement, qui vise à limiter la saturation des centres de stockage de déchets radioactifs.

Chantier et vérification

L'excavation des 50 centimètres de terre sous le radier de la STE sera réalisée au premier semestre 2018.

A l'issue de cette opération, **des contrôles seront effectués** :

- EDF réalisera une campagne de mesures radiologiques à la surface du sol (avant remblaiement).
- L'ASN validera également l'atteinte des objectifs de l'assainissement poussé.

Après validation de l'ASN, EDF procédera au remblaiement de la zone par 5 mètres de terres naturelles, garantissant que le public ne sera exposé à aucune radioactivité artificielle.

DP2D_LP5-CB

PROJET : BRENNILIS

Plan de gestion des terres situées sous le radier de la Station de Traitement des Effluents

PIECE 2

Note D305615001831 Ind. B



NOTE

DIPDE_2ED-ENV

PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS

D305615001831

B

Nb de pages : 88

Applicabilité : BZ

: Cette note est le plan de gestion des terres situées sous le radier de la STE de Brennilis. Elle décrit le diagnostic de la zone et propose des mesures de gestion et de contrôles suivant une démarche d'optimisation.

Affaire LBZS06

Projet(s) :

Rédaction	Contrôle	Approbation	Visa final (*)
RETY Celine 02/08/2017	DECUNG Fabien 03/08/2017	OLLIVIER-DEHAYE Catherine 03/08/2017	

(*) La présence de cette icône atteste que le document a été approuvé par un circuit de signature électronique

Ne peut être transmis à l'extérieur d'EDF/DPI et entités autorisées, que par une personne habilitée.

**DIVISION DE L'INGENIERIE DU
PARC DE LA DECONSTRUCTION
ET DE L'ENVIRONNEMENT**

140, AVENUE VITON 13401
MARSEILLE CEDEX 20

Téléphone : 04.91.74.88.00
Télécopie : -

www.edf.fr

EDF - SA au capital de 1 370 938 843
euros -552 081 317 R.C.S. Paris
Le groupe EDF est certifié ISO 14 001

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Code OTP : E234/077521/EDEPOL

Vérification indépendante :	Auprès de (Nom/Société) :
-----------------------------	---------------------------

Pré-diffusion formalisée (indice en cours) :		
Auprès de : DP2D - J. TRUFFET - S. MAURAU - J. CUCCINIELLO - S. BERTRAND		

<i>INDICE</i>	<i>MODIFICATIONS</i>
A	Création du document
B	Mise à jour du document intégrant les modalités de contrôle de l'atteinte des objectifs d'assainissement ainsi que des clarifications du contenu.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ORGANIGRAMME DE CLASSEMENT DE LA NOTE

Première étape : DEFINITION DU CLASSEMENT AIP* OU NON AIP DE L'ELABORATION DE LA NOTE

Condition 1

L'activité concerne directement une fonction ou un élément identifié comme EIP et peut avoir un impact sur la démonstration de protection des intérêts, ou l'activité ne concerne pas directement une fonction ou un EIP, mais peut avoir un impact indirect sur le maintien d'une fonction d'un EIP (ex. séisme événement, incendie,...)

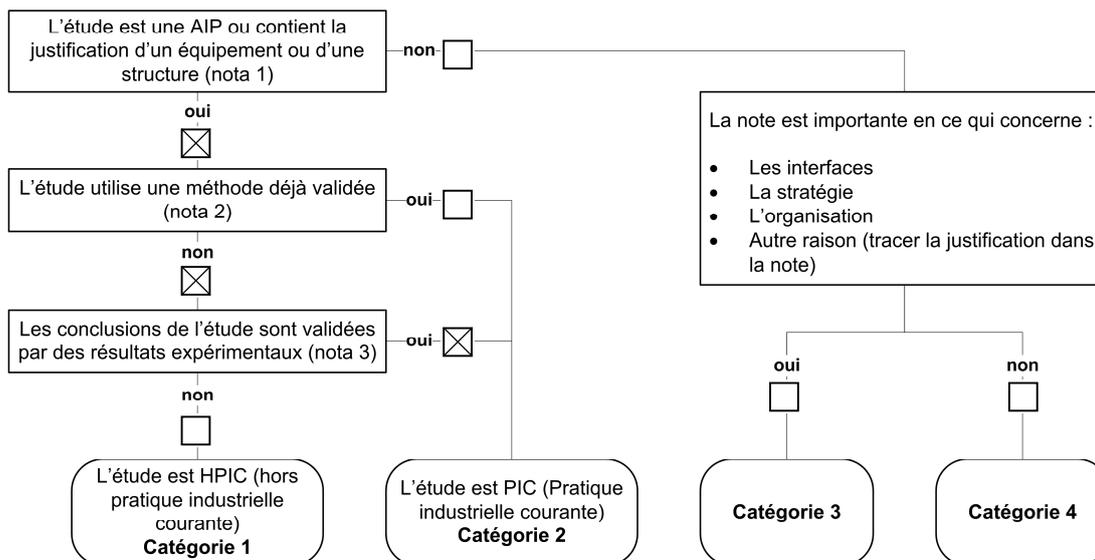
Condition 2

Une erreur liée à cette activité peut conduire, sans possibilité de rattrapage par une activité aval, au non respect de la démonstration de protection des intérêts.

L'élaboration du document constitue une **AIP** (Activité Importante pour la Protection des intérêts)

L'activité n'est pas une AIP
 S'il s'agit d'une note d'étude, tracer la justification (nota 4)

Deuxième étape : DEFINITION DE LA CATEGORIE DE LA NOTE



Nota 1 :

- Justification des performances fonctionnelles ou de la résistance d'une structure,
- Justification du comportement sous sollicitations (par exemple en situation accidentelle),
- Énoncé de règles de conception ou d'installation,
- ... et par extension, énoncé de règles d'exploitation.

Nota 2 :

- Méthode déjà utilisée dans une étude traitant du même domaine technique et faisant l'objet d'une note d'étude approuvée.
 - Méthodologie faisant l'objet d'une note approuvée.
- Si la note fait l'objet de calculs, ceux-ci doivent faire appel à un code validé.

Nota 3 :

- Ces résultats doivent faire l'objet d'une note d'étude ou d'un compte rendu d'essais approuvé.
- Le retour d'expérience d'exploitation est un résultat expérimental.

Nota 4 :

La décision correspondant à l'application de la condition 2 doit être justifiée et tracée. En particulier, si l'application des exigences AIP* est reportée sur une activité aval, celle-ci doit être précisément identifiée et la justification tracée.

*AIP : Activité Importante pour la Protection des intérêts

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

SYNTHESE

La Station de traitement des effluents du site de Brennilis est en cours de démantèlement. Historiquement, divers incidents de renversement de fûts d'effluents ont conduit à la contamination du radier du bâtiment et dans une moindre mesure des sols sous-jacents (essentiellement présence de ¹³⁷Cs).

La caractérisation des terres sous la STE a été réalisée en 2008 par 34 points de sondages (soit 180 échantillons) de 2 à 5 m de profondeur, sous le radier. Les caractérisations sous la STE ont montré :

- la prépondérance du terme source du radier qui représente 80% du terme source global (radier+sols),
- un marquage des terres de faible activité (médiane de 0,026 Bq/g en ¹³⁷Cs) et diffus sur 5 m de profondeur : deux zones se démarquant légèrement :
 - une couche de 0/50 cm située immédiatement sous le radier (moyenne estimée à 0,69 Bq/g en ¹³⁷Cs),
 - une couche à environ 3 m / 3 m 50 de profondeur (moyenne estimée à 0,58 Bq/g en ¹³⁷Cs).

La démarche d'assainissement de référence recommandée par l'ASN dans sa doctrine de 2012 ainsi que dans le guide 24 de 2016 a été étudiée pour les sols sous la STE (à noter que l'intégralité du radier sera retiré soit 80% du terme source initial). Les terres présentes sous la STE pourraient être potentiellement marquées, même très faiblement, jusqu'aux terrains très compacts sous-jacents, ce qui représenterait environ 12 000 m³ de déchets TFA. Cette démarche de référence n'est techniquement pas réalisable car le rabattement déjà mis en place sous la STE dans un contexte granitique fracturé complexe, ne garantit un niveau de nappe que de 2 m sous le radier. Pour éviter la production d'un volume de déchets trop important et du fait de la difficulté technique lié au rabattement de nappe, EDF a étudié différentes options d'assainissement poussé.

Afin de définir l'assainissement poussé et les travaux d'excavation pertinents, EDF a réalisé tout d'abord une analyse de la compatibilité des sols avec les usages. Les résultats ont montré que **l'état actuel du sol était compatible quels que soient les usages étudiés** (l'impact sanitaire du scénario réaliste d'usage « Pêcheur » est de 8 x 10⁻⁶ mSv/an). Il s'est agi ensuite d'optimiser les excavations pour réduire au maximum le terme source tout en prenant en compte les contraintes techniques et les impacts sur les intérêts protégés (déchets TFA produits, impacts CO₂) et la sécurité des travailleurs. Les principaux résultats de cette optimisation ont été :

- le retrait des 50 premiers cm de terres sous le radier présente un avantage d'efficacité dans la diminution du terme source,
- l'impact scénario d'usage « Pêcheur » reste dans des gammes de valeurs très faibles (< 8 x 10⁻⁶ mSv/an) quelle que soit l'option d'excavation retenue,
- excaver les terres au-delà de 50 cm n'entraîne pas de gain sur les impacts sanitaires alors que les volumes de déchets TFA produits augmentent de manière très significative ainsi que l'impact environnemental global du chantier (rejets CO₂, trafic routier, etc.).

	NOTE		
	PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B	Page 5/88

L'assainissement poussé retenu est donc l'excavation des 50 premiers cm de terres présentes sous le radier, car il est techniquement réalisable avec la présence de la nappe. Par ailleurs il représente un gain dans l'optimisation de la réduction du terme source et des impacts sanitaires, contrairement à des options d'excavation plus profondes. Cette mesure est également une mesure raisonnable en termes d'impact environnemental (volume de déchets TFA produit, impact CO₂ du transport) et de risques pour les intervenants.

Ainsi, à la fin de la mise en œuvre de ce plan de gestion, c'est plus de 83% du terme source initial (radier + sols) qui aura été retiré.

A l'issue des travaux de retrait du radier puis des terres, des contrôles seront réalisés sur les terres naturelles en fonds de fouille afin (1) de vérifier l'atteinte *a minima* de la profondeur d'excavation cible (cote 217,5 mNGF), (2) de s'assurer de la cohérence des observations avec les éléments du diagnostic initial et de l'étude présentée et (3) de tracer l'état final de la surface des terres en fin de chantier.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

SOMMAIRE

	Pages
1. OBJET DE LA NOTE	10
2. CONTEXTE	11
2.1. CALENDRIER ET CONTEXTE DE LA ZONE	11
2.2. REFERENTIELS SUIVIS POUR L'ELABORATION DU PLAN DE GESTION	14
3. HISTORIQUE ET HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE	15
3.1. DESCRIPTION DE LA ZONE	15
3.1.1. HISTORIQUE	15
3.1.2. SPECTRE DES RADIOELEMENTS PRESENTS DANS LA STE	16
3.2. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE.....	18
3.2.1. GEOLOGIE.....	18
3.2.2. HYDROGEOLOGIE.....	19
3.3. CONCLUSION.....	20
4. DIAGNOSTIC DE LA ZONE.....	21
4.1. SUIVI DE LA QUALITE DES EAUX DE NAPPE	21
4.1.1. SUIVI DES EAUX ISSUES DU RABATTEMENT DE NAPPE SOUS LA STE	21
4.1.2. SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES DE LA ZONE	22
4.1.3. CONCLUSION.....	22
4.2. CARACTERISATION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STE	23
4.2.1. RESULTATS DES CARACTERISATIONS	25
4.2.2. ABSENCE DE MARQUAGE CHIMIQUE.....	30
4.2.3. SPECTRE FINAL RETENU	30
4.3. RECONSTITUTION DES TERMES SOURCES ET STRUCTURATION DU MARQUAGE DES TERRES	31
4.3.1. RECONSTITUTION DES TERMES SOURCES	31
4.3.2. STRUCTURATION DU MARQUAGE DES TERRES	32
4.3.3. ZONES D'INTERETS.....	35
4.3.4. CONCLUSION.....	36
4.4. CONCLUSION DU DIAGNOSTIC	37
5. ETUDE DE LA DEMARCHE DE REFERENCE : RETRAIT TOTAL DES TERRES	38
5.1. RAPPEL SUR LA DEMARCHE DE REFERENCE	38
5.2. DESCRIPTION DE LA DEMARCHE DE REFERENCE.....	38

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

- 5.3. FAISABILITE TECHNIQUE..... 39**
 - 5.3.1. PRESENCE DE LA NAPPE..... 39
 - 5.3.2. SECURITE DES INTERVENANTS 39
- 5.4. VOLUME DE DECHETS PREVISIONNEL ET IMPACT CO₂..... 39**
- 5.5. ESTIMATION DES COUTS 40**
- 5.6. CONCLUSION..... 41**
- 6. ETUDE DE VULNERABILITE DES MILIEUX ET SCHEMA CONCEPTUEL..... 42**
 - 6.1. USAGES SUR SITE ET HORS SITE..... 42
 - 6.1.1. SUR SITE 42
 - 6.1.2. HORS SITE 42
 - 6.2. EXPOSITIONS ET ENJEUX..... 43
 - 6.3. SCHEMA CONCEPTUEL..... 44
- 7. ETUDE D'IMPACT SANITAIRE DES TERRES EN PLACE 45**
 - 7.1. SCENARIO REALISTE ADAPTE AU SITE : SCENARIO D'USAGE « PECHEUR » . 45
 - 7.1.1. TRANSFERT DES RADIOELEMENTS VERS L'ELLEZ..... 45
 - 7.1.2. CALCUL D'EXPOSITION DU SCENARIO D'USAGE « PECHEUR » A PARTIR DES
 CONCENTRATIONS EN RIVIERE 47
 - 7.1.3. ANALYSES DES INCERTITUDES 48
 - 7.1.4. CONCLUSION..... 49
 - 7.2. SCENARIOS TYPES IRSN 50
 - 7.2.1. OUTIL DE CALCUL UTILISE 50
 - 7.2.2. DONNEES D'ENTREE..... 51
 - 7.2.3. HYPOTHESE USAGE FUTUR REALISTE : ZONE REMBLAYEE PAR 5 M DE TERRAIN
 PROPRE..... 51
 - 7.2.4. HYPOTHESE USAGE FUTUR TRES PENALISANT : LA ZONE EST EN ACCES DIRECT52
 - 7.3. CONCLUSION..... 52
- 8. OPTIMISATION DES MESURES DE GESTION..... 53**
 - 8.1. OPTIMISATION DES EXCAVATIONS VIS-A-VIS DU TERME SOURCE, DECHETS TFA ET
 IMPACTS 53
 - 8.1.1. OPTIONS D'EXCAVATION DES TERRES ETUDIES 53
 - 8.1.2. TERMES SOURCE RESIDUELS ASSOCIES ET VOLUME DE DECHETS TFA PRODUITS
 55
 - 8.1.3. IMPACTS SANITAIRES RESIDUELS 57
 - 8.1.4. SYNTHESE 58

	NOTE		
	PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B	Page 8/88

8.2. OPTIMISATION « REDUCTION DU TERME SOURCE/COUTS » 60

8.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES DIFFERENTS SCENARIOS D'EXCAVATION 61

9. PROPOSITION DE GESTION 63

10. GESTION DU CHANTIER 64

10.1. MODALITES DE SUIVI DES TRAVAUX 64

10.2. FILIERES DE GESTION DES TERRES EXCAVEES 64

10.3. ETAT FINAL DE LA ZONE..... 65

10.4. MEMOIRE DE L'OPERATION..... 65

11. VERIFICATION DE L'ATTEINTE DES OBJECTIFS..... 66

11.1. VERIFICATION DE LA MESURE DE GESTION OPEREE..... 66

11.2. VERIFICATION DE LA COHERENCE AVEC L'ESTIMATION ISSUE DE L'ETUDE GEOSTATISTIQUE 66

11.3. CARTOGRAPHIE DE LA DOSE EFFICACE EN FOND DE FOUILLE 69

11.4. SYNTHÈSE DES CONTRÔLES FINAUX 69

12. CONCLUSION..... 70

TABLEAUX

Tableau 1 : Spectre des radioéléments présents dans les déchets bétons de la STE (2009)16

Tableau 2 : Reconstitution des termes sources moyens en Bq du radier et des sols en 201531

Tableau 3 : Coefficient de distribution ou Kd (Bq.kg⁻¹ de sol sec par Bq.L⁻¹ d'eau)46

Tableau 4 : Estimation des activités volumiques des radionucléides dans l'Ellez46

Tableau 5 : Doses efficaces reçues par ingestion et exposition externe (calcul BLIQUID).....47

Tableau 6 : Activités des radioéléments utilisés pour le calcul d'impact Scénario « Types IRSN»51

Tableau 7 : Dose efficace reçue pour la zone STE remblayée51

Tableau 8 : Dose efficace reçue pour la zone STE non remblayée52

Tableau 9 : Options optimisée d'excavation des sols.....54

Tableau 10 : Terme source, déchets TFA et activité massiques résiduelles en fonction des options d'excavation.....55

Tableau 11 : Impacts sanitaires en fonction des options d'excavation57

Tableau 12 : Efficacité des différentes options d'excavation (en MBq/M€).....61

Tableau 13 : Paramètres utilisés pour le calcul d'émission de CO_{2e} dû au transport de déchets61

Tableau 14 : Résultats des calculs d'impact CO_{2e} du transport de déchets62

Tableau 15 : Synthèse des contrôles finaux.....69

Tableau 16 : Estimation du nombre N de prélèvements nécessaires en fonction du triplet {α, β, Δ / σ} (tableau issu de la méthodologie MARSSIM)87

	NOTE		
	PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B	Page 9/88

FIGURES

Figure 1 : Site de Brennilis, dont en bleu la STE.....	10
Figure 2 : Photo de la STE avec les talus et la mise en place du confinement	11
Figure 3 : Vue schématique des locaux de la STE et de son pourtour	12
Figure 4 : Vue 3D du confinement nucléaire et de la protection climatique	12
Figure 5 : Photos de l'avancement de la démolition du radier (a/ vue du côté Ouest ; b/ vue du côté Est : on voit la marche entre les terres et le radier restant à démolir)	13
Figure 6 : Vue reconstituée par géostatistique de la contamination du radier de la STE	15
Figure 7 : Coupe géologique Est-Ouest au niveau de la STE.....	18
Figure 8 : Position de la nappe rabattue dans les sous-sols de la STE.....	19
Figure 9 : Représentation 3D des sondages dans les terres (avec visualisation du radier en bleu) au droit des locaux de la STE	24
Figure 10 : Représentation 3D et visualisation des principales lithologies rencontrées au niveau des sondages réalisés au droit des locaux de la STE	25
Figure 11 : Vue schématique des sondages sous la STE.....	26
Figure 12 : Nuage de corrélation ³ H / ¹³⁷ Cs (Bq/kg)	29
Figure 13 : Carte des activités massiques en ¹³⁷ Cs obtenues par géostatistique dans la couche supérieure et inférieure du radier de la STE	32
Figure 14 : Carte des activités massiques en ¹³⁷ Cs obtenues par géostatistique dans les sols sous le radier	33
Figure 15 : Carte de risque de dépassement des niveaux d'activité de 0,1 Bq/g et 0,5 Bq/g en ¹³⁷ Cs	34
Figure 16 : Sélection préliminaire de 2 zones plus marquées.....	36
Figure 17 : Coupe géologique sous la STE et représentation des faciès compacts.....	38
Figure 18 : Direction des écoulements issus de la modélisation hydrogéologique du site	43
Figure 19 : Schéma conceptuel des usages de la zone.....	44
Figure 20 : Valeurs de perméabilités des terrains sous la STE	49
Figure 21 : Représentation du terme source, déchets TFA et activités massiques résiduelles en fonction des options d'excavation	56
Figure 22 : Impacts sanitaires en fonction des options d'excavation (pour une zone non remblayée).....	58
Figure 23 : Synthèse de l'optimisation des activités et impacts en fonction des options d'excavations	58
Figure 24 : Exemple d'emplacement des 20 contrôles finaux en fond de fouille	67
Figure 25 : Exemple de 2 structures spatiales différentes pour une même distribution statistique	74
Figure 26 : Exemple de répartition des estimations et incertitudes dans une étude géostatistique	74

ANNEXES

ANNEXE 1 : LOCALISATION DES PIEZOMETRES ET PUIXS DE POMPAGE A PROXIMITE DE LA STE	72
ANNEXE 2 : LA GEOSTATISTIQUE.....	73
ANNEXE 3 : DESCRIPTION DES PARAMETRES POUR L'ETUDE D'IMPACT DU SCENARIO D'USAGE PECHEUR.....	75
ANNEXE 4 : DESCRIPTION DES PARAMETRES UTILISES POUR LES SCENARIOS D'USAGE TYPE DU GUIDE ASN/IRSN DE 2011.....	81
ANNEXE 5 : DECLINAISON DE LA METHODE MARSSIM POUR LA REALISATION DES CONTROLES FINAUX.....	85

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

1. OBJET DE LA NOTE

La station de traitement des effluents (STE) du site nucléaire en déconstruction de Brennilis servait à traiter les effluents contaminés en provenance du Bâtiment des Combustibles Irradiés (BCI) du site. La STE est actuellement en démantèlement autorisé par le Décret n° 2011-886 du 27 juillet 2011 et le Décret n° 2016-1530 du 16 novembre 2016 modifiant le décret n° 2011-886 du 27 juillet 2011.

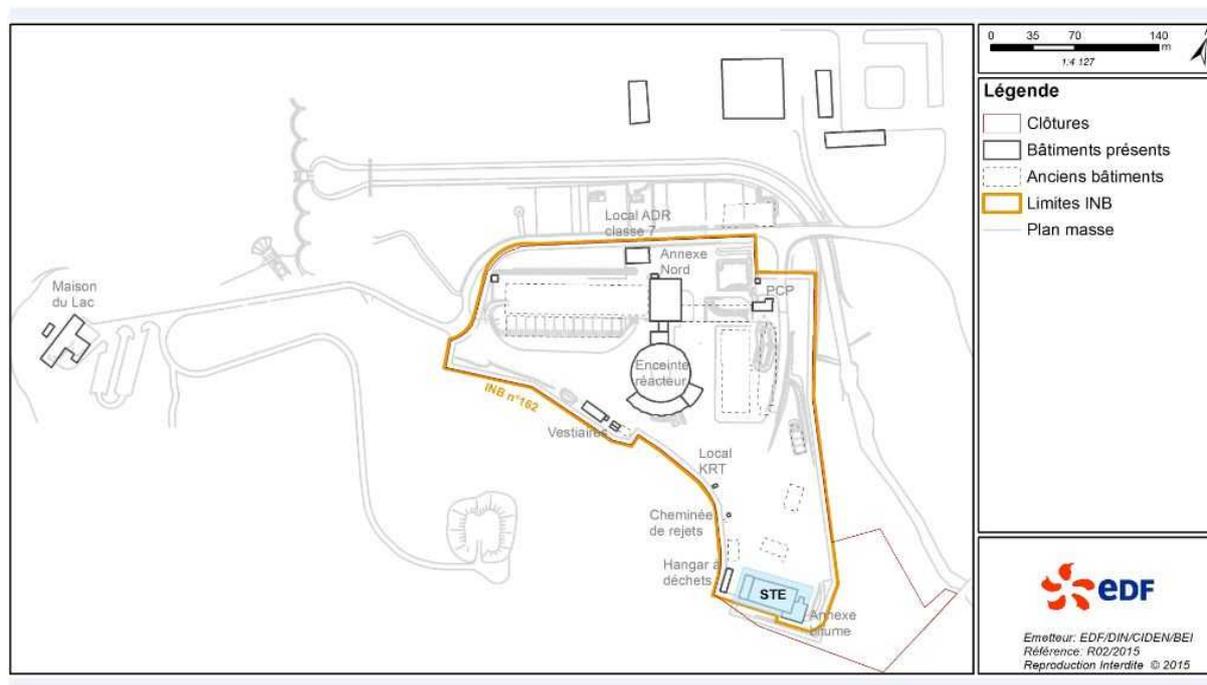


Figure 1 : Site de Brennilis, dont en bleu la STE

A l'issue du retrait de l'ensemble des voiles et du radier de la STE, EDF propose à l'ASN, via la présente note, un Plan de gestion des terres marquées radiologiquement situées sous le radier, conformément à l'article 2 du Décret n° 2011-886 du 27 juillet 2011 et le Décret n° 2016-1530 du 16 novembre 2016 modifiant le décret n° 2011-886 du 27 juillet 2011. Le contenu de ce dossier est conforme aux exigences définies par l'ASN en avril 2010 et suit les préconisations de l'ASN retranscrites dans le guide n° 24 de 2016.

Après avoir décrit l'historique et le diagnostic de la zone, EDF présente la démarche de gestion de référence, *i.e.* d'excavation totale des terres marquées, issue de la doctrine ASN diffusée en octobre 2012 dont la mise en œuvre est détaillée dans le guide ASN n°24 diffusé en août 2016. Les contraintes techniques afférentes à cette démarche ainsi que les impacts en termes de déchets produits sont décrits. La note met ensuite en regard l'impact sanitaire actuel des terres en place et une étude de différentes options d'excavation envisageables, avec leur influence sur les termes sources résiduels, les impacts sanitaires, la production de déchets TFA et les impacts environnementaux associés. L'étude de ces options conduit au choix d'une mesure de gestion pour un assainissement poussé optimisé. La note détaille ensuite les modalités de contrôles à réaliser à l'issue des travaux et permettant de vérifier les objectifs définis dans ce plan de gestion.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

2. CONTEXTE

2.1. CALENDRIER ET CONTEXTE DE LA ZONE

Les travaux de démantèlement de la STE sont en cours et doivent être achevés avant fin juillet 2018 comme demandé dans le Décret n° 2011-886 du 27 juillet 2011 et le Décret n° 2016-1530 du 16 novembre 2016 modifiant le décret n° 2011-886 du 27 juillet 2011. Les travaux de démantèlement du génie civil ont commencé au printemps 2015 et devraient se terminer fin 2017. Les voiles et le radier de l'ancienne STE vont être éliminés jusqu'au niveau bas du radier c'est-à-dire 218 mNGF environ (variable en fonction de la structure du radier, hors locaux 902, 903 et 904).

Comme le montrent les figures 2 à 4, la STE en déconstruction est aujourd'hui surplombée d'un confinement nucléaire et d'une protection climatique. Les terres qui étaient situées autour de la STE ont été talutées jusqu'à 5 m sous la cote du terrain naturel, à hauteur du niveau bas du radier (218 mNGF). L'avancée de la démolition du radier est visible sur la Figure 5 (plus de 70% du radier a été retiré à ce jour).

Suite au démantèlement du génie civil et aux mesures de gestion des terres, l'état final visé est une zone comblée par du remblai propre (*a minima* 5 m) pour revenir à la cote du terrain naturel (223 mNGF).



Figure 2 : Photo de la STE avec les talus et la mise en place du confinement

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

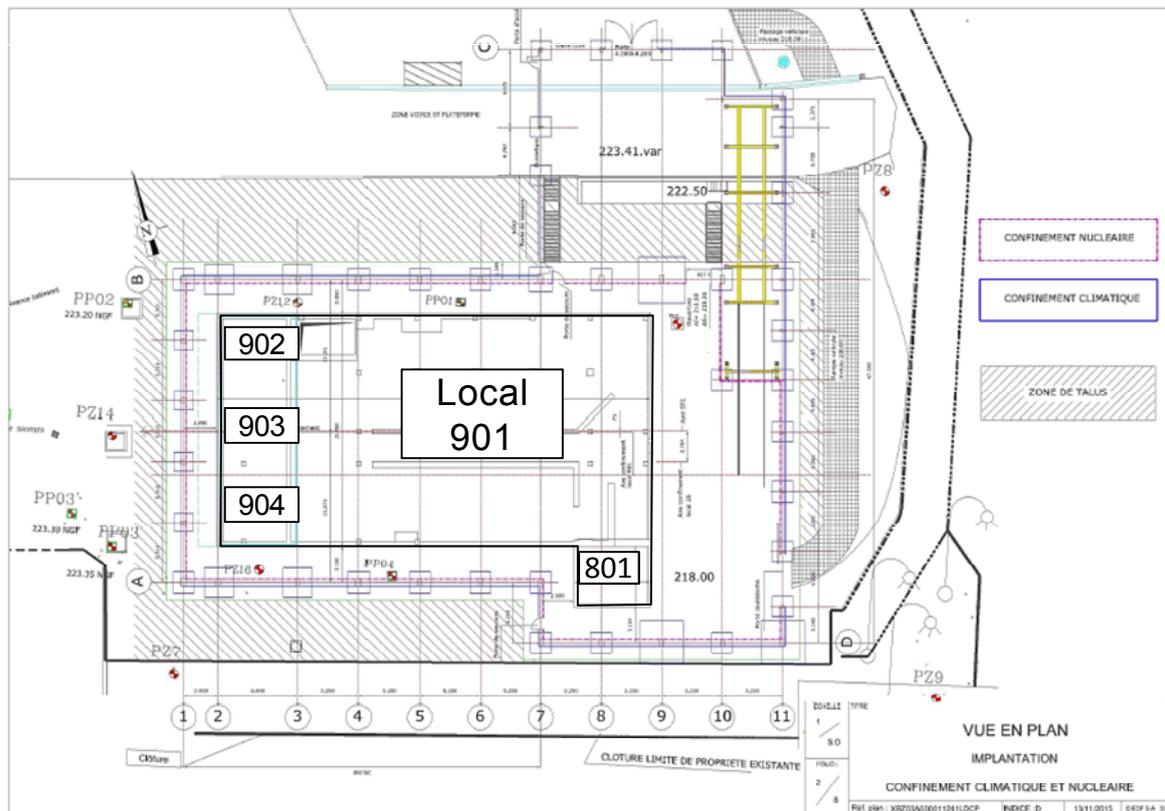


Figure 3 : Vue schématique des locaux de la STE et de son pourtour

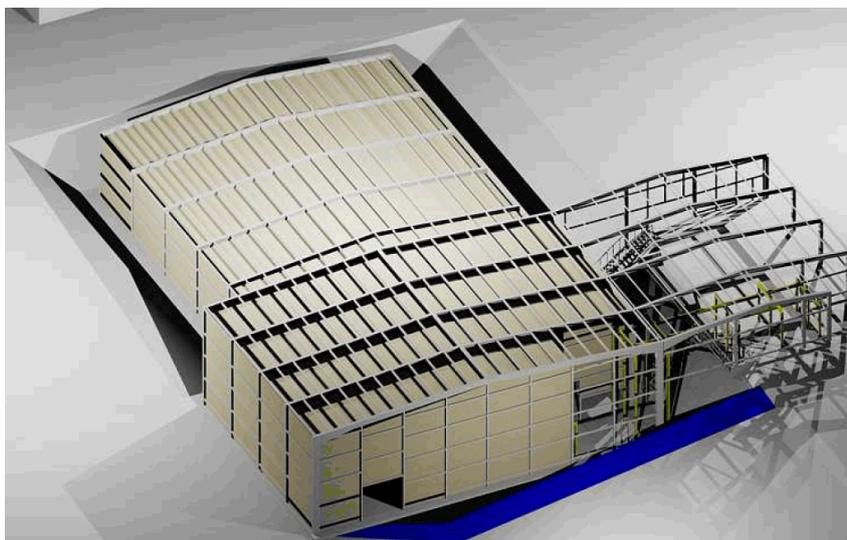


Figure 4 : Vue 3D du confinement nucléaire et de la protection climatique

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B	Page 13/88



a/



b/

Figure 5 : Photos de l'avancement de la démolition du radier (a/ vue du côté Ouest ; b/ vue du côté Est : on voit la marche entre les terres et le radier restant à démolir)

Les travaux de gestion des sols se feront sous la protection climatique afin de respecter les délais d'une fin de travaux à juillet 2018. En effet, compte tenu du REX des travaux d'assainissement du chenal, la sécurisation du planning nécessite la protection des terres des intempéries pour respecter le taux d'humidité avant envoi des déchets à l'ANDRA.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

2.2. REFERENTIELS SUIVIS POUR L'ELABORATION DU PLAN DE GESTION

Les textes réglementaires pris en compte pour l'élaboration de ce Plan de gestion sont le Décret Procédures dont l'article 37, le Code de la Santé Publique dont l'article L 1333-1, l'Arrêté INB dont les articles 1.1 et 8.3.2 et le Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) avec l'objectif de ne pas saturer les stockages de déchets radioactifs. La réflexion s'est basée aussi sur la méthodologie Sites et Sols Pollués nationale de 2007, mise à jour en 2017, et la méthodologie relative aux Sols Pollués radiologiquement (Guide ASN/IRSN/Ministère de 2011 et guide ASN n° 24 d'août 2016).

Ces différents textes ou guides incitent à retirer en premier lieu des pollutions concentrées, puis à adopter une approche proportionnée aux enjeux lorsqu'il y a impossibilité de retirer toute trace de pollution dans des conditions technico-économiques acceptables. Les objectifs d'assainissement sont déterminés en fonction des prévisions d'utilisation ultérieure du site et la démarche est conduite selon le principe d'optimisation compte-tenu des techniques disponibles et des facteurs économiques et sociaux. Le Plan de gestion doit alors prendre en compte l'ensemble des intérêts protégés (public, environnement), la sécurité des travailleurs, la minimisation de la production de déchets TFA et des impacts CO₂.

La doctrine ASN met l'accent sur une « démarche de référence » qui vise un assainissement complet de toute trace de radioactivité artificielle ajoutée dans les sols et à rendre l'état du sol compatible « tout usage ». Publié en août 2016, le guide ASN n°24 sur la gestion des sols pollués détaille cette attente, structure la démarche et introduit la possibilité d'une démarche d'optimisation lorsque la démonstration est faite d'impossibilités techniques, de l'engagement d'une dosimétrie travailleurs trop importante ou de la production de déchets disproportionnée. Il faut alors montrer la compatibilité des sols avec les usages établis ou envisagés du site.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

3. HISTORIQUE ET HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE

3.1. DESCRIPTION DE LA ZONE

3.1.1. Historique

La STE de Brennilis était une Station de Traitement des Effluents liquides en provenance des autres bâtiments de l'INB. Après traitement par évaporation, les concentrats y étaient conditionnés et entreposés en fûts, en attente de conditionnement et d'évacuation. Le radionucléide prépondérant dans ces concentrats était le ¹³⁷Cs.

La STE a fonctionné de 1967 à 1985, puis les opérations de Mise à l'Arrêt Définitif ont duré de 1986 à 1992.

Au cours de l'exploitation, plusieurs déversements accidentels de ces effluents ont été constatés :

- entre le début de l'exploitation de la STE et la construction de « l'annexe bitume » en 1980, des fuites de concentrats, liées à des problèmes de corrosion de fûts, ont entraîné une contamination importante de la dalle du local 901 et ont provoqué la destruction du revêtement de peinture et déstabilisé la couche superficielle du béton par attaque du liant ciment. En mars 1983, une décontamination du sol par micro-billage a été réalisée en vue d'éliminer toute la contamination non fixée.
- suite à un incident d'inondation survenu le 10 juillet 1983, l'eau récoltée par le puisard d'un autre local de la STE a été pompée et envoyée vers la cuve de préparation du local 901. Celle-ci a débordé et a entraîné une contamination du sol de la salle 901 avec écoulements vers le puisard Ouest de cette même salle.
- une chute d'un fût de concentrats le 26 mars 1984 a entraîné une contamination de la salle 901.

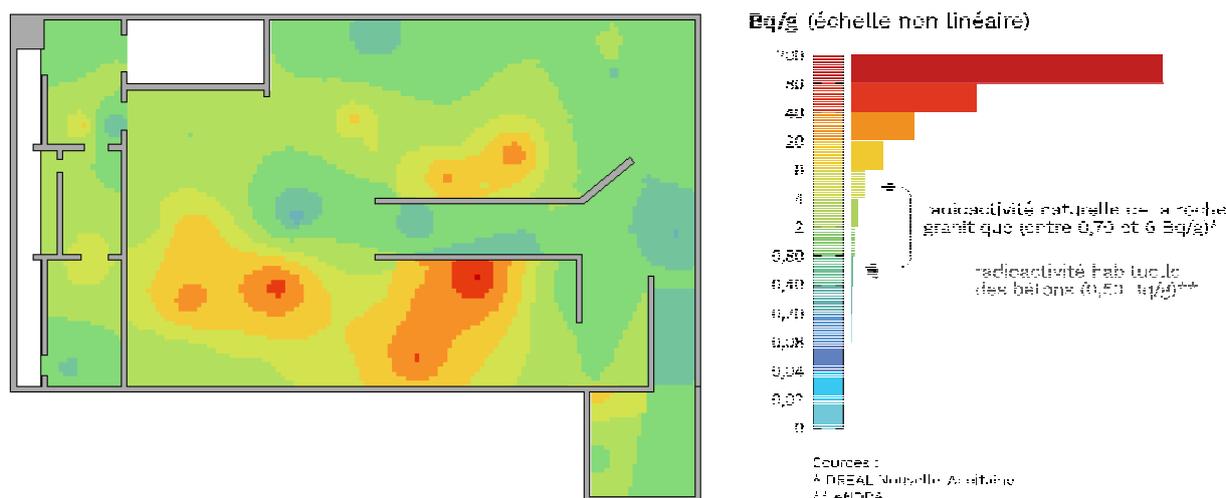


Figure 6 : Vue reconstituée par géostatistique de la contamination du radier de la STE

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Les informations historiques disponibles révèlent donc une contamination générale de la dalle, plus marquée côté Sud et Ouest (voir Figure 6) due à la fuite du réservoir d'effluents et écoulement vers le puisard Ouest. Par ailleurs une contamination du radier au pied du mur intérieur Sud existe, due probablement à une fuite de la tuyauterie G13 de traitement des effluents. Les ratios $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ montrent que le local 901 et les locaux 902 à 904 ont des historiques de contamination différents.

Le radier de la STE a déjà été partiellement assaini dans les années 2000 dans le cadre de la déconstruction du site de Brennilis : la chape a été retirée partiellement ainsi que les premiers niveaux du radier jusqu'à 20 cm de profondeur environ. Les terres marquées par des radioéléments artificiels présentes autour de la STE ont été assainies en 2014, talutées et contrôlées jusqu'au niveau du point bas du radier. Des contrôles de fond de fouille (EDF et IRSN) ont montré la propreté des zones traitées.

3.1.2. Spectre des radioéléments présents dans la STE

Le spectre des déchets bétons de la STE a été établi à partir de mesures de ^{137}Cs et ^{60}Co sur des fûts de déchets provenant du démantèlement initial de la STE, et de mesures de ^3H et ^{14}C réalisées lors de campagnes sur des échantillons métalliques des circuits effluents. Pour les autres radioéléments difficilement mesurables, les valeurs les plus pénalisantes ont été retenues entre les résultats de mesures directes effectuées sur ces échantillons et les calculs d'activation. Aucun émetteur α n'est présent dans le spectre des bétons de la STE. Ce spectre est présenté dans le tableau ci-dessous. C'est le spectre qui avait été retenu pour l'étude d'impact du Dossier de MADDEM déposé en 2009 pour le site de Brennilis.

Radioélément	Importance dans le spectre	Émission principale et période
^{137}Cs	53,5 %	Gamma (30 ans)
^{60}Co	0,7 %	Gamma (5,27 ans)
^3H	<i>Forfait déchets bétons (1,64 Bq/g)</i>	<i>Béta (12,3 ans)</i>
^{14}C	<i>Forfait déchets bétons (0,6 Bq/g)</i>	<i>Béta (5 730 ans)</i>
^{90}Sr	38,8 %	Béta (29,1 ans)
^{63}Ni	5,7 %	Béta (96 ans)
^{151}Sm	0,4 %	Béta gamma (90 ans)
^{154}Eu	0,2 %	Gamma (8,8 ans)
$^{121\text{m}}\text{Sn}$	0,2 %	Béta (55 ans)
^{125}Sb	0,2 %	Gamma (2,77 ans)
^{55}Fe	0,1 %	Béta (2,7 ans)

Tableau 1 : Spectre des radioéléments présents dans les déchets bétons de la STE (2009)

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Le spectre des déchets bétons de la STE n'est pas transposable directement aux sols situés sous le radier. Cependant, ce spectre donne une indication sur les proportions possibles que l'on pourrait retrouver dans le radier et les sous-sols. Il a été utilisé afin d'orienter les analyses à effectuer dans le radier et les sous-sols.

Pour l'étude qui nous concerne il a donc été choisi de se focaliser lors du diagnostic de sol sur la recherche des radionucléides prépondérants dans ce spectre : ^{137}Cs , ^{60}Co , ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{63}Ni et ^{55}Fe . ^{154}Eu , ^{125}Sb , ^{151}Sm ont été recherchés également via les spectrométries gamma complètes.

Enfin, d'autres analyses réalisées ont permis de dédouaner la présence d'autres radioéléments dans le radier et les sous-sols :

- des spectrométries gamma complètes ont été réalisées sur de nombreux échantillons (75) permettant de rechercher des émetteurs tels que $^{108\text{m}}\text{Ag}$, ^{241}Am , ^{227}Th (descendant du ^{227}Ac), ^{228}Ac (descendant du ^{232}Th), ^{210}Pb , etc. ;
- des spectrométries alpha ont également été réalisées permettant de rechercher ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{235}U , etc. ;
- des mesures de béta total ont été réalisées afin de garantir que la somme des émetteurs béta recherchés était cohérente avec elles.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

3.2. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

3.2.1. Géologie

Les formations géologiques rencontrées au droit de la STE sont les suivantes (à partir de 218 mNGF) :

- un remblai de propreté constitué de cailloutis granitiques et/ou de débris de béton (essentiellement dans les parties Sud et Est du radier) sur une épaisseur de 20 cm à 60 cm (non représentés sur la Figure 7 ci-dessous)
- des altérites (colluvions argileux ou limoneux, arènes granitiques sablo-graveleuse plus ou moins argileuses en place dont la compacité augmente avec la profondeur) constituant un horizon très hétérogène pouvant atteindre 4 m d'épaisseur
- du granite altéré et souvent fissuré ou fracturé. Les faciès très compacts sont atteints entre 6 et 15 m de profondeur à partir de la surface (soit 1 à 10 m sous le radier). Le granite est atteint vers 6/8 m de profondeur côté Ouest (soit à la cote 215 mNGF environ) et vers 15 m de profondeur côté Est (cote 208 mNGF). Ces faciès compacts se rencontrent aux environs de la cote 210 mNGF dans la partie centrale de la STE.
- du granite sain qui peut localement être fracturé à environ 206 mNGF ou moins.

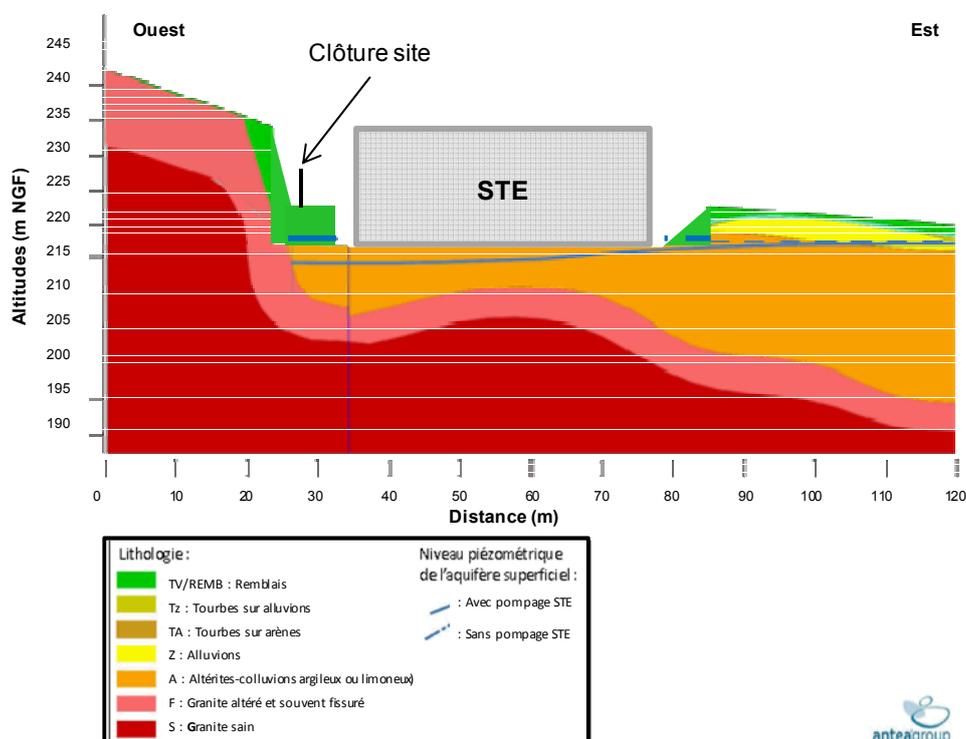


Figure 7 : Coupe géologique Est-Ouest au niveau de la STE

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

3.2.2. Hydrogéologie

La STE est située sur une zone de bombement de l'aquifère qui correspond à une zone de faille Est-Ouest avec circulations d'eau. Le sommet de l'aquifère en situation normale (hors rabattement) baigne les arènes et/ou la base des remblais sous la STE (cote de la nappe environ 218 mNGF).

La nappe est constituée de deux aquifères plus ou moins en continuité hydraulique :

- un aquifère superficiel circulant dans les arènes, alluvions et remblais, avec un toit de nappe à 218 mNGF, et une épaisseur estimée à 10/11 m en moyenne,
- un aquifère sous-jacent dans le granite altéré et le granite sain fracturé.

Le fonctionnement des aquifères dans ces milieux granitiques fracturés est complexe.

Le niveau statique naturel de la nappe sous la STE étant de 218 mNGF (voir Figure 8) alors que le point bas du radier est à 216,7 mNGF (côté Ouest), un **système de rabattement** par puits de pompage a été mis en place autour de la STE depuis 2000 afin de maintenir le niveau de nappe en toutes circonstances en dessous du point bas du radier. En effet l'allègement du bâtiment suite à la démolition de l'infrastructure le rendait plus sensible à la poussée hydrostatique de la nappe. L'objectif du système de rabattement a ainsi été fixé à 216 mNGF. En moyenne le niveau de la nappe au droit de la STE est de 214 mNGF et oscille entre 213 et 216 mNGF environ suivant la pluviométrie et la recharge de la nappe. La nappe est donc parfois à moins de 1 m sous le niveau le plus bas du radier (216,7 mNGF à l'Ouest de la STE).

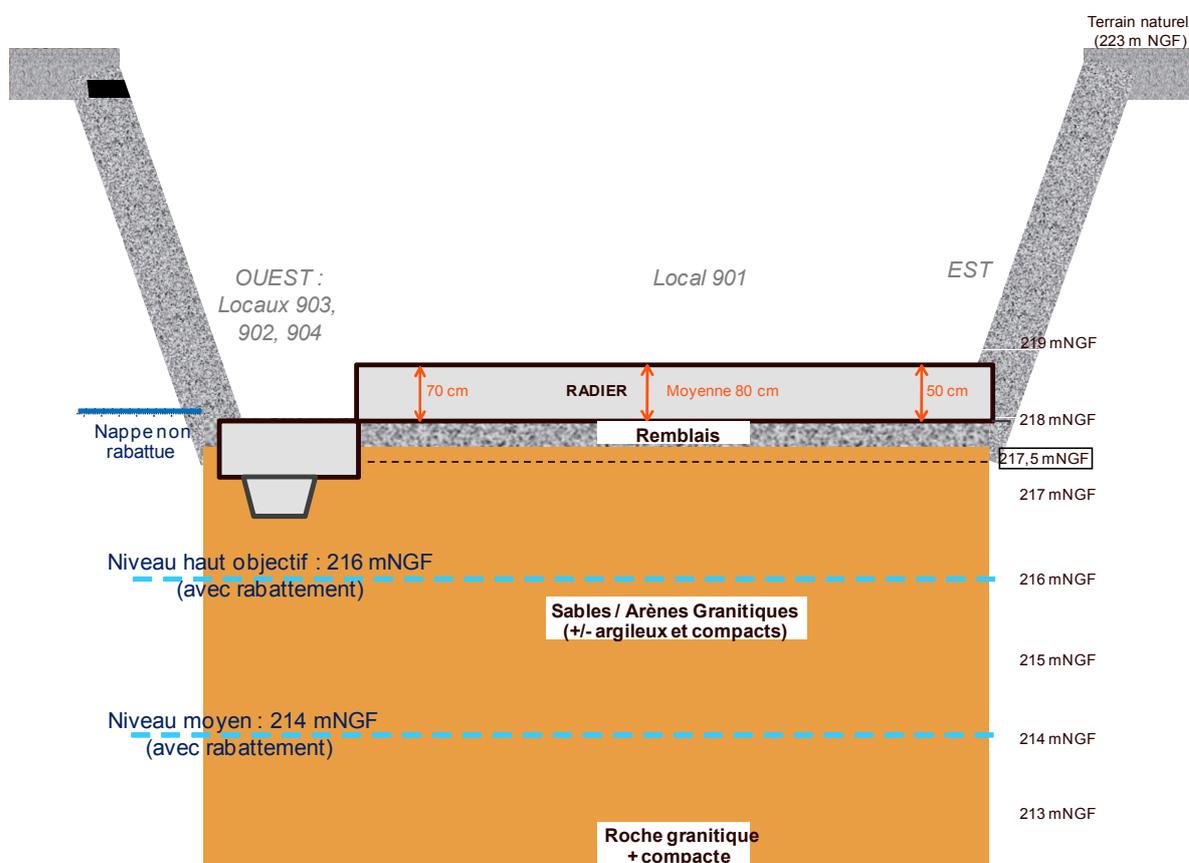


Figure 8 : Position de la nappe rabattue dans les sous-sols de la STE

	NOTE		
	PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B	Page 20/88

3.3. CONCLUSION

La STE de Brennilis est en cours de démantèlement (voiles et radier). Historiquement, lors de l'exploitation, divers incidents ont conduit à la contamination du radier du bâtiment (essentiellement ¹³⁷Cs). La STE est aujourd'hui entourée d'une zone de talus, d'un confinement nucléaire et d'une protection climatique implantés pour l'assainissement de la zone.

Les sous-sols de la STE sont constitués de remblais sur une épaisseur de 0,2 m à 0,6 m puis d'altérites (arènes granitiques) qui deviennent de plus en plus compactes en fonction de la profondeur.

Un système de rabattement de la nappe est en place depuis 2000 et son objectif est de ne pas dépasser la cote de 216 mNGF afin d'éviter la poussée de la nappe sur l'infrastructure en place. Le niveau moyen de la nappe rabattue est de 214 mNGF et oscille en moyenne entre 213 et 216 mNGF. Ce paramètre sera une contrainte importante pour la caractérisation des sols et lors d'éventuels travaux d'excavation de terres.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4. DIAGNOSTIC DE LA ZONE

4.1. SUIVI DE LA QUALITE DES EAUX DE NAPPE

Depuis la mise à l'arrêt définitif de la STE en 1985, des suivis de la qualité des eaux de nappe circulant sous le site ont été réalisés. La zone de la STE a été suivie spécifiquement depuis la mise en place du rabattement de nappe en 2000.

Conformément à la décision n° 2011-DC-0240, le suivi de la qualité des eaux issues de ces rabattements est actuellement réalisé de façon hebdomadaire au niveau des collecteurs suivants :

- collecteur de pompage sous la STE,
- collecteur de pompage sous le BCI,
- collecteur commun BCI-STE.

Aucune anomalie chimique ou radiologique n'a été détectée dans ces eaux sur les 15 dernières années.

4.1.1. Suivi des eaux issues du rabattement de nappe sous la STE

A partir des années 2000, une surveillance des eaux rabattues sous la STE a débuté. Les paramètres suivants ont été mesurés selon une fréquence hebdomadaire ou mensuelle sur les puits de pompage principaux (PP01, PP02, PP03 et PP04), le collecteur de pompage des eaux sous la STE et le collecteur de pompage commun BCI-STE :

- paramètres physico-chimiques : turbidité, Matières En Suspension (MES) et pH,
- analyses radiologiques : Bêta global, ⁴⁰K, spectrométrie gamma sur les eaux et les MES et ³H.

Depuis 2010 ont été ajoutées sur les eaux de rabattement des mesures de PCB, COV, HAP, HCT et métaux.

Concernant le suivi de la qualité chimique des eaux, 5 mesures de MES ont dépassé les 25 mg/L. Les pH légèrement acides mesurés dans les eaux proviennent quant à eux du contexte géologique granitique de la centrale.

Deux activités supérieures à la Limite de Détection (LD) en ⁶⁰Co ont été relevées ponctuellement au cours de l'année 2001 dans les eaux issues du rabattement sous la STE (1,0 et 1,2 Bq/L). Elles n'ont pas été confirmées par les mesures des semaines précédentes et suivantes. Elles sont par ailleurs proches de la Limite de Détection (LD).

En conclusion, les eaux de nappe souterraines rabattues au niveau de la STE sont propres chimiquement et radiologiquement (plus de 7 000 mesures physico-chimiques et radiologiques réalisées depuis 2000).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4.1.2. Suivi des eaux souterraines de la zone

De 1985 à 2010 : la surveillance radiologique des eaux souterraines du site concernait la proximité de l'Enceinte Réacteur, le Bâtiment des Combustibles Irradiés (BCI) ainsi que la station « Source de la vierge » située à proximité de la commune de Brennilis, au Nord de la centrale, mais n'a pas concerné directement les abords de la STE. Sur l'ensemble de la période, près de 2 500 analyses radiologiques ont été réalisées. Quelques activités supérieures à la limite de détection en tritium (³H) ont été détectées dans les eaux souterraines entre 1985 et 1993 (comprises entre 30 et 950 Bq/L). Celles-ci sont liées à l'exploitation de la centrale et à des fuites observées en 1988 (local Sulzer à proximité de l'enceinte réacteur). Depuis 1994, les mesures sont inférieures ou proches de la Limite de Détection (LD) ou du Seuil de Décision (SD) analytiques.

Depuis 2010 : de nouveaux piézomètres ont été mis en place sur le site de Brennilis, en particulier à proximité de la STE (piézomètres PZG, PZH et PZI situés en amont hydraulique du cours d'eau Ellez). Les eaux circulant sous la STE ont été surveillées également par les piézomètres PZ7, PZ9 puis PZ14 (voir localisation en Annexe 1).

Les paramètres et substances suivants sont mesurés selon une fréquence mensuelle :

- paramètres physico-chimiques : température, turbidité, MES, pH
- polluants organiques : HAP, HCT, COHV, PCB
- analyses radiologiques : Bêta global, ⁴⁰K, spectrométrie gamma sur les eaux et Matière En Suspension (MES), ³H.

Hormis des pH légèrement acides et des mesures de conductivité faibles caractéristiques des substrats granitiques, les résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques mesurés mensuellement montrent la bonne qualité des eaux de nappe.

Les mesures radiologiques (plus de 1 600 mesures depuis 2010) sont soit en dessous du Seuil de Décision (SD), soit en dessous des limites réglementaires concernant la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (alpha global < 0,1 Bq.L⁻¹, bêta globale < 1 Bq.L⁻¹ – hors ⁴⁰K – et ³H < 100 Bq.L⁻¹)¹, et montrent la propreté radiologique de la nappe.

4.1.3. Conclusion

Les eaux souterraines du site sont suivies depuis la mise à l'arrêt définitif des installations en 1985, et plus spécifiquement autour de la zone STE depuis les années 2000 où de nouveaux piézomètres et puits ont été créés. Toutes les mesures réalisées montrent la propreté chimique et radiologique des eaux de nappe.

A noter que dès aujourd'hui, les eaux rabattues sont en contact direct avec une partie du terme source présent sous la STE.

¹ Référence de qualité fixée par arrêté du 12 mai 2004. Dans le cas où cette valeur est dépassée, la Dose Indicative (DI) est calculée. Celle-ci doit être inférieure à 0,1 mSv/an. Cette dose conduit, pour un marquage en tritium pur, à une activité volumique de 10 000Bq/L en ³H (Guidelines for drinking-water quality – Fourth edition – WHO 2011)

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4.2. CARACTERISATION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STE

Le diagnostic du marquage s'est déroulé de façon itérative :

1/ Le radier a fait l'objet de caractérisations de surface en débits de dose qui ont permis d'identifier les zones les plus marquées par les radioéléments.

2/ Le radier et le sol sous-jacents de la STE ont fait l'objet d'une pré-caractérisation *in situ* qui a permis de mesurer la contamination et de cibler les sondages supplémentaires à mettre en œuvre (121 sondages expérimentaux – méthode TRUPRO - ; analyse de 184 échantillons dans le radier et 39 échantillons de sols sur 1m50 de profondeur ; recherche du ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ³H, alpha total, béta et gamma total).

3/ Le radier et le sol sous-jacent de la STE ont fait l'objet de caractérisations (40 sondages bétons et 34 sondages sols jusqu'à 4 m de profondeur) au droit des zones d'intérêts mises en évidence lors des phases précédentes. Cette campagne est détaillée dans les paragraphes suivants.

Une large campagne de caractérisation de la STE (3/) a été menée par la société Bouygues (juil-nov 2008) selon les méthodes classiques de sondage et d'analyses en laboratoire. Le choix des prélèvements a été orienté par les résultats de la campagne (NMNTi, campagne expérimentale réalisée avec le procédé américain TRUPRO) également en 2008.

Les sondages dans les sols sous-jacents au radier ont couvert l'ensemble de la dalle (~ 750 m²). Ainsi 34 sondages ont été réalisés. Répartis sur l'ensemble des locaux, les sondages ont ciblé les zones d'intérêts et notamment les rétentions ultimes des locaux de la STE (puisards 902, 903 et 904) :

- 13 des 34 sondages ont pénétré le sous-sol sur environ 2 m ;
- 21 sondages ont pénétré le sous-sol sur 3 à 4 m (soit 4 m 80 depuis la surface du radier).

Tous les sondages, dont la localisation est illustrée Figure 9 et Figure 10, ont été contrôlés en débit de dose, soit 180 échantillons de terres. Plus de la moitié (soit 98 de ces échantillons) ont ensuite été sélectionnés pour des analyses radiologiques en laboratoire. Le choix s'est porté en priorité sur les échantillons présentant des débits de dose supérieurs au bruit de fond (13 échantillons sur 180), sur les échantillons adjacents afin de borner l'extension d'un marquage éventuel, puis de façon aléatoire sur chaque sondage pour les autres échantillons.

A noter qu'aucun sondage profond n'a été réalisé dans les zones latérales. En effet, la problématique de marquage des terres extérieures de la STE provenant de la surface a déjà été traitée via le plan de gestion des terres extérieures et décrite dans une note présentant l'atteinte des objectifs. Les caractérisations puis les contrôles de fond de fouille après excavation, ont permis de valider l'absence de source de pollution résiduelle dans ces terres.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

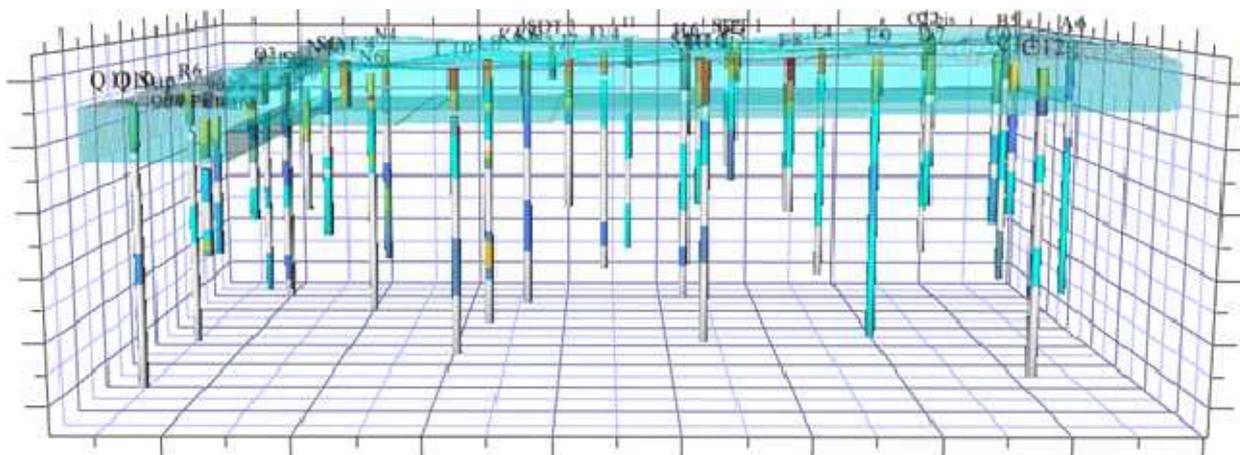


Figure 9 : Représentation 3D des sondages dans les terres (avec visualisation du radier en bleu) au droit des locaux de la STE

A noter également que les carottages ont été réalisés à la profondeur maximale permise par les contraintes techniques, soit 4 à 5 m de profondeur. En effet :

- la machine de forage était installée en sous-sol de la STE, avec des contraintes en terme d'espace disponible (notamment la hauteur sous plafond).
- même à l'air libre, on ne pourrait pas aujourd'hui obtenir des carottes plus profondes exploitables en raison de la présence de la nappe.

A raison d'une densité de sondages de 1 pour 25 m², et d'un échantillonnage ciblant les zones d'intérêts, le maillage des terres sous la STE est exceptionnellement riche et resserré. Cette densité de sondages est par ailleurs cohérente avec les proportions recommandées (1 pour 100 m²) par l'étude RECORD de 2016 « Méthodes d'estimation et d'optimisation des quantités de terres polluées à traiter » qui préconise par ailleurs l'utilisation des méthodes géostatistiques comme facteur de réduction d'erreurs dans le diagnostic.

Les résultats de caractérisation permettent de confirmer que la profondeur explorée est suffisante pour les besoins de l'étude. En effet :

- les couches de terres ayant une activité plus élevée que les autres sont situées immédiatement sous le radier et entre 3 m et 3 m 50. Or les sondages de sol vont jusqu'à 4 voire 5 m sous le niveau du radier de la salle principale.
- le retour d'expérience sur les chantiers précédents a montré que, pour les radioéléments en présence, la mobilité était réduite (¹³⁷Cs, ⁶⁰Co et ⁶³Ni). Pour indication, les coefficients de partage sol-eau (Kd) sont de 270, 640 et 400 L/kg respectivement dans les sols sableux (AIEA). Par ailleurs, d'après l'étude géostatistique réalisée sur les données Bouygues 2008 et NMNTi TRUPRO 2008, le ³H résiduel dans les terres est associé géographiquement au ¹³⁷Cs. Les autres radioéléments n'ont pas été détectés (⁵⁵Fe, ⁹⁰Sr) dans les terres ce qui

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

laisse présumer qu'ils étaient absents ou en très faibles proportions dans les effluents à l'origine de la contamination. Concernant le ¹⁴C, il a été mesuré dans de faibles proportions dans le radier mais pas dans les terres. En effet le milieu alcalin (pH élevé, carbonates) du radier entraîne la fixation du ¹⁴C dans les bétons.

En conclusion, le diagnostic réalisé permet d'avoir une connaissance des sous-sols de la STE complète et fiable.

4.2.1. Résultats des caractérisations

4.2.1.1. Géologie

Les résultats issus des sondages sont présentés Figure 10 et Figure 11.

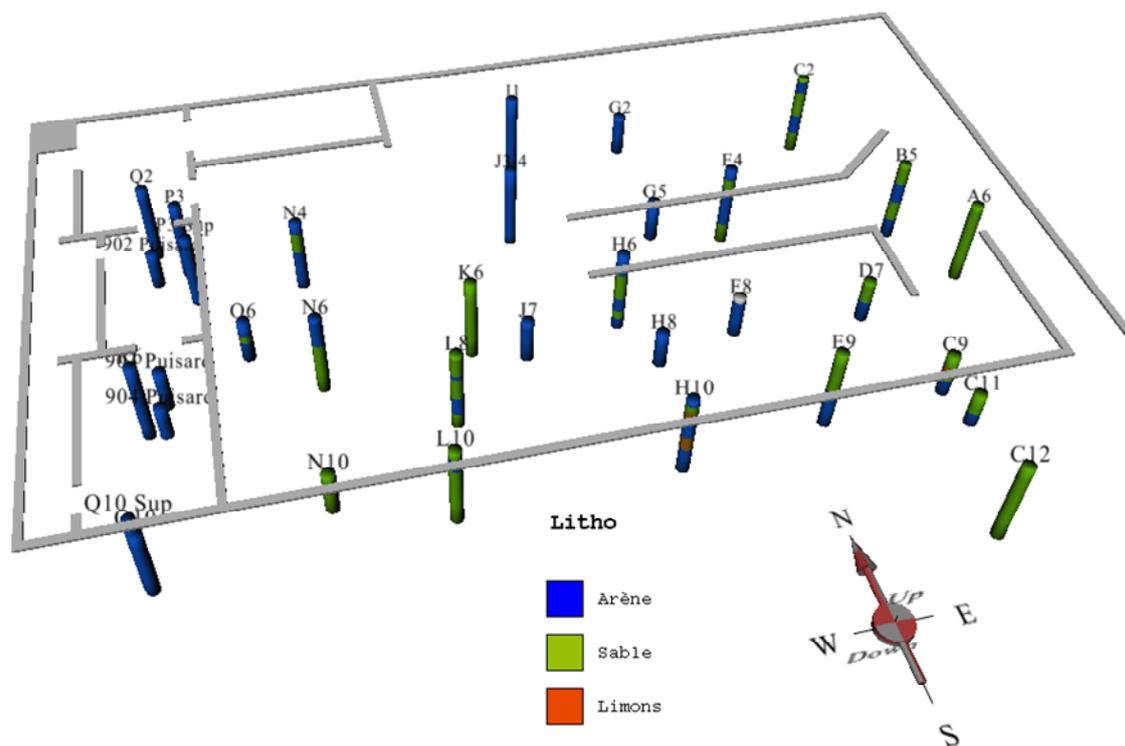


Figure 10 : Représentation 3D et visualisation des principales lithologies rencontrées au niveau des sondages réalisés au droit des locaux de la STE

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

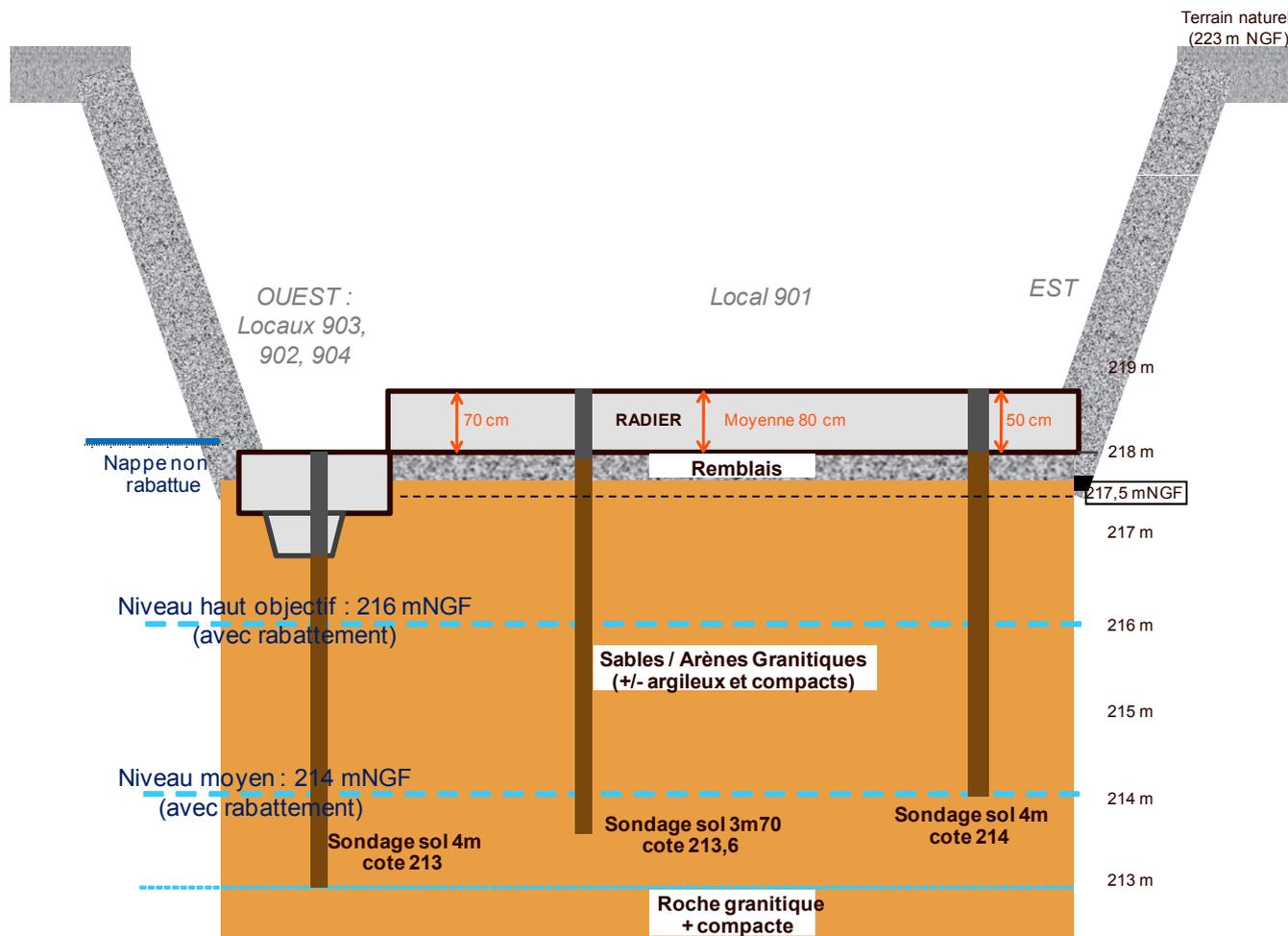


Figure 11 : Vue schématique des sondages sous la STE

Les terrains rencontrés via les sondages sous la STE ont confirmé les connaissances acquises avant 2008 : une épaisseur de béton variant de 0,50 à 1 m, puis un remblai de propreté sur une épaisseur variant de 20 à 60 cm, et ensuite d'arène granitique sablo-graveleuse plus ou moins compacte. Des horizons de sable plus ou moins argileux sont relevés essentiellement dans la partie Sud sur plusieurs sondages, à des profondeurs et à des épaisseurs très variables (à partir de 0,8 ou 2,80 m jusqu'à 1,75 ou 4,80 m). Des limons argileux ont été observés essentiellement sur un sondage, sur plusieurs mètres d'épaisseur.

La formation granitique a été observée à partir de 3,80 m jusqu'en fin de sondage à 4,80 m de profondeur.

En conclusion, le sous-sol au droit de la STE présente une forte hétérogénéité géologique.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4.2.1.2. Radioéléments dans les sols

Les analyses réalisées ont porté sur le ¹³⁷Cs et ⁶⁰Co (98 spectrométries gamma rapides), des spectrométries gamma complètes, alpha total (béton et sols), ainsi que sur le ⁹⁰Sr, le ³H (libre et lié), le ¹⁴C, le ⁵⁵Fe, le ⁶³Ni et bêta total.

Les résultats, exprimés en Bq/g de poids sec en novembre 2008, montrent un marquage faible mais diffus des terres sous la STE.

- **Césium 137**

Pour le ¹³⁷Cs, 88 mesures sur 98 étaient au-dessus de la limite de détection (LD ≈ 2 x 10⁻³ Bq/g). La médiane des valeurs est de **0,026 Bq/g**, la moyenne à 0,565 Bq/g.

11 échantillons sur les 98 analysés ont présenté une activité en ¹³⁷Cs supérieure à 0,5 Bq/g. Les marquages présentant une activité supérieure à 0,5 Bq/g sont d'extension très limitée, les échantillons sous-jacents ne montrant que de faibles ou très faibles marquages.

Les valeurs maximales sont rencontrées :

- dans les 50 premiers centimètres sous le radier, il est mesuré une valeur ponctuelle à 11,72 Bq/g dans la couche 0/20 cm du sondage N6. L'analyse de l'échantillon sous-jacent 20/40 cm montre une activité très faible en ¹³⁷Cs (0,009 Bq/g) ;
- à environ 3 m sous le radier, il est mesuré une valeur à 11,67 Bq/g sur le sondage L8. L'analyse des échantillons immédiatement supérieur (à 2,8 m) et inférieur (3,3 m) montre une activité faible en ¹³⁷Cs (respectivement 0,13 Bq/g et 0,08 Bq/g).

- **Cobalt 60**

Pour le ⁶⁰Co, 32 mesures sur 98 étaient au-dessus de la limite de détection (LD ≈ 1 x 10⁻³ Bq/g). La médiane des valeurs est de **0,0014 Bq/g**, la moyenne de 0,009 Bq/g. La valeur maximale est de 0,16 Bq/g (une valeur ponctuelle à 1,5 m environ sous le radier).

Sur l'ensemble des échantillons, la présence de ⁶⁰Co semble liée à celle de fortes teneurs en ¹³⁷Cs. En effet, la période du ⁶⁰Co étant de 5,3 ans, par rapport aux 30 ans du ¹³⁷Cs, seuls des points de forte contamination passée en ⁶⁰Co sont encore visibles lors du diagnostic et associés à des teneurs en ¹³⁷Cs plus élevées.

- **Tritium libre et lié**

Cinq échantillons de sols parmi les plus contaminés en ¹³⁷Cs ont été analysés en ³H. Les activités mesurées sont faibles, elles varient de la limite de détection (3 mesures sur 5) à 60 Bq/L pour le ³H libre et, pour le ³H lié, entre la LD et 0,68 Bq/g. La valeur la plus haute en ³H est mesurée sur l'échantillon le plus marqué en ¹³⁷Cs (sondage L8 à 3 m sous le radier).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

- **Nickel 63**

Deux échantillons de sol parmi les plus contaminés en ¹³⁷Cs ont été analysés et présentent des activités en ⁶³Ni de 0,033 et 0,48 Bq/g. Cette valeur la plus haute en ⁶³Ni est mesurée sur l'échantillon le plus marqué en ¹³⁷Cs (sondage L8 à 3 m sous le radier).²

- **Carbone 14**

Deux échantillons de sol ont été analysés parmi les plus contaminés en ¹³⁷Cs. Les mesures se situent à la LD (< 0,094 ou = 0,077 Bq/g). Le ¹⁴C n'a donc pas été retenu dans le spectre définitif des terres sous la STE.

- **Strontium 90**

Cinq échantillons de sols parmi les plus contaminés en ¹³⁷Cs ont été analysés et présentent une activité inférieure à la LD (variant entre 2,4 x 10⁻³ et 10⁻² Bq/g). Le ⁹⁰Sr n'a donc pas été retenu dans le spectre définitif des terres sous la STE. Il n'a pas été retrouvé non plus dans les analyses béton du radier.³

- **Fer 55**

Deux échantillons de sols parmi les plus contaminés en ¹³⁷Cs, ont été analysés et présentent des activités en ⁵⁵Fe inférieures aux LD (variant entre 0,55 et 0,6 Bq/g). Le ⁵⁵Fe n'a donc pas été retenu dans le spectre définitif des terres sous la STE.

- **Béta global**

Deux échantillons de sols parmi les plus contaminés en ¹³⁷Cs ont été mesurés et présentent des valeurs de 2,4 et 22 Bq/g. Pour chacun de ces échantillons, un rapide calcul montre une corrélation cohérente entre le comptage bêta global et la somme des activités des principaux émetteurs bêta détectables par comptage bêta.

4.2.1.3. Forfait retenu pour le ³H

Le ³H a été mesuré en laboratoire sur certains échantillons de sondages mais le jeu de données est réduit. Il a été décidé d'appliquer une hypothèse très majorante issue de l'analyse variographique des données ³H sur les bétons et sols prélevés lors de la campagne de pré-caractérisation *in situ* (procédé TRUPRO) (voir Figure 12).

² Concernant la représentativité des échantillons choisis pour l'analyse du ⁶³Ni, le postulat a été que le ⁶³Ni est associé géographiquement au ¹³⁷Cs dans les terres (*i.e.* ¹³⁷Cs est le traceur du marquage radiologique des terres). En effet :

- ces radioéléments ont la même origine dans le sol (infiltration depuis la dalle d'effluents radioactifs stockés dans les locaux en sous-sols STE),
- les Kd sont proches entre le ¹³⁷Cs (270 L.kg⁻¹) et le ⁶³Ni (400 L.kg⁻¹) dans les sols sableux.

C'est pourquoi il a été fait le choix de mesurer le ⁶³Ni sur l'échantillon de terres le plus marqué en ¹³⁷Cs dans le cas des terres de la STE afin de déterminer l'activité en ⁶³Ni.

³ Ce radioélément n'avait pas été détecté, ou au niveau de la limite de détection, dans les terres du chenal qui étaient impactées aussi par les effluents de la STE. On peut raisonnablement faire l'hypothèse que le ⁹⁰Sr, au même titre que le ⁵⁵Fe ou le ¹⁴C, était en très faible proportion ou absent des effluents ayant été à l'origine de la contamination du radier et des terres.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

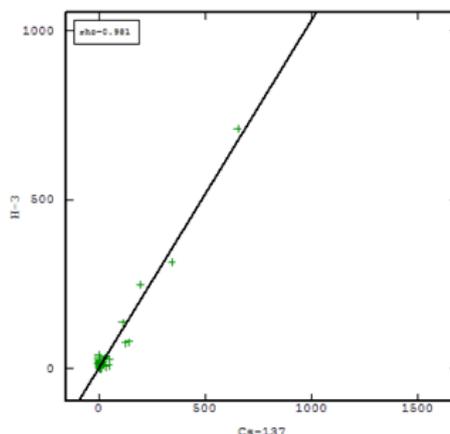


Figure 12 : Nuage de corrélation ^3H / ^{137}Cs (Bq/kg)

Cette analyse a conduit à considérer de façon très majorante le terme source en ^3H comme étant égal au terme source en ^{137}Cs pour les terres sous la STE alors que le ^3H est attendu et mesuré en plus faible proportion ⁴.

4.2.1.4. Forfait retenu pour le ^{63}Ni

Le ^{63}Ni a été mesuré dans les sols mais seulement sur 2 échantillons. Nous avons choisi de retenir la valeur maximale mesurée (0,48 Bq/g), et, orientés par l'étude géostatistique du terme source, de l'appliquer à toute la zone se situant sous la zone la plus contaminée du radier et jusqu'à une profondeur de 1 m 50, soit ~ 410 m³ de terres⁵.

⁴ Dans les sols, le ^3H est considéré comme un traceur de l'eau c'est-à-dire qu'il se comporte comme cette dernière en terme d'écoulement : ainsi quand il est présent dans les sols (hors de la présence de la nappe), on s'attend à ce qu'il soit entraîné rapidement (lixiviation via les eaux de pluie ou essuyage par les remontées de nappe), et quand il est en nappe, on s'attend à ce qu'il en suive les écoulements ce qui devrait engendrer sa migration et sa dilution. Dans le cas étudié ici, on constate un phénomène de piégeage mécanique du ^3H , vraisemblablement dans des zones où l'arène granitique présente une plus forte compacité, limitant ainsi sa migration. Ce phénomène a été mis en évidence grâce aux 5 échantillons analysés en ^3H : 3 de ces échantillons présentaient des teneurs supérieures à la LD. Afin de ne pas sous-estimer ce phénomène particulier, un ratio 1/1 a été retenu entre le ^3H et le ^{137}Cs , conformément au ratio observé dans les bétons du radier de la STE (la répartition des radionucléides dans les bétons du radier constitue en effet la situation initiale du terme source). Le ratio réel entre le ^3H et le ^{137}Cs mesuré dans les sols pour ces 3 échantillons est bien inférieur, de l'ordre de 1/17.

⁵ Il aurait été possible, à la place de cette hypothèse, d'utiliser le ratio du spectre déchets bétons de la STE. Celui-ci est de 9 environ en 2008 entre le ^{137}Cs et le ^{63}Ni (53,5%/5,7%). Si on applique le ratio de 9 aux terres sous la STE (ce qui est majorant par rapport aux ratios issus des mesures pour les sols STE de 1/24), on aurait obtenu une activité massique moyenne en ^{63}Ni de 0,04 Bq/g. La valeur de 0,48 Bq/g est donc majorante. Appliquer la valeur de 0,04 Bq/g à l'ensemble des terres sous la STE ou la valeur majorante de 0,48 Bq/g à la zone la plus marquée de la STE par le ^{137}Cs (d'après l'étude géostatistique) soit la zone centrale jusqu'à 1m50 de profondeur, aboutit à un terme source en ^{63}Ni du même ordre de grandeur. C'est la deuxième hypothèse qui a été retenue, les 2 approches sont cependant équivalentes vis à vis des scénarios d'excavation et d'exposition.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4.2.2. Absence de marquage chimique

L'historique des activités menées dans la STE montre *a priori* l'absence de sources potentielles de marquage chimique pour les terres sous-jacentes au radier. Le process utilisé pour le traitement des effluents arrivant dans la STE était l'évaporation, puis les effluents étaient stockés en fûts dans les locaux en sous-sols de la STE. Les concentrats issus des effluents étaient composés essentiellement de nitrates de sodium avec un pH de 8 à 10. La problématique des terres sous la STE est donc avant tout radiologique.

Les transformateurs contenant des PCB et les autres sources potentielles d'HAP/HCT (par exemple zone de dépotage de fuel) étaient situés sur le pourtour de la STE ou aux étages du bâtiment. Les marquages de sol à ces endroits ont été traités par le Plan de gestion des terres du pourtour de la STE transmis à l'ASN, ou via la démolition des structures.

Le suivi de la qualité chimique des eaux circulant sous la STE atteste également de la propreté chimique des terres. En effet, comme décrit dans le Plan de gestion, le suivi concerne à la fois les eaux de rabattement de la nappe sous la STE (depuis 2000 sur les puits de pompage ou le collecteur) mais également depuis 1997 les prélèvements dans les piézomètres situés spécifiquement autour de la STE (PZ7, PZ9) renforcé en 2000 puis en 2010 par de nouveaux piézomètres (dont PZ14). Aucune anomalie chimique n'a été relevée dans les eaux circulant sous la STE sur les 15 dernières années (voir paragraphe 4.1).

En l'absence d'historique relatif à un marquage chimique potentiel et compte tenu des résultats du suivi des eaux souterraines de la zone qui montre la propreté chimique de celles-ci, il n'y a pas eu d'analyses chimiques des terres lors du diagnostic en 2008.

4.2.3. Spectre final retenu

Les mesures ont montré uniquement la présence dans les sols du ^{137}Cs , ^{60}Co , ^3H et ^{63}Ni . Ce sont donc ces radioéléments qui ont été retenus dans le spectre de l'étude.

Les autres radioéléments du spectre initial tels que le ^{14}C , le ^{90}Sr , le ^{55}Fe , l' ^{154}Eu ou le ^{125}Sb n'ont pas été retenus.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4.3. RECONSTITUTION DES TERMES SOURCES ET STRUCTURATION DU MARQUAGE DES TERRES

4.3.1. Reconstitution des termes sources

Sur la base d'un modèle géostatistique (voir annexe 2) complet et des hypothèses retenues pour le ^3H et le ^{63}Ni , des estimations globales (classification globale et terme source) et locales (probabilité de dépassement de niveau d'activité) ont été obtenues sur les données de caractérisation de 2008. La décroissance radioactive a été appliquée pour mettre à jour les termes sources à mi-2015.

Par ailleurs les activités moyennes en ^{137}Cs et ^{60}Co ont été estimées grâce à la géostatistique sur tout le volume des terres, par couche de 50 cm à partir du dessous du radier.

Terme source résiduel médian en 2015		
	Radioéléments	TS (Bq)
Radier	^{137}Cs	$8,94 \times 10^9$
	^{60}Co	$5,92 \times 10^7$
	^3H	$7,19 \times 10^9$
	^{14}C	$7,64 \times 10^7$
	^{63}Ni	$1,41 \times 10^9$
	TOTAL	$17,7 \times 10^9$
Sols	^{137}Cs	$2,10 \times 10^9$
	^{60}Co	$1,61 \times 10^7$
	^3H	$1,69 \times 10^9$
	^{63}Ni	$2,49 \times 10^8$
	TOTAL	$4,05 \times 10^9$

Tableau 2 : Reconstitution des termes sources moyens en Bq du radier et des sols en 2015

Le terme source global médian des sols en ^{137}Cs est de 2,10 GBq en 2015. L'intervalle de confiance associé est [1,56 - 2,77 GBq]. Le terme source du ^3H a plus vite diminué que celui du ^{137}Cs entre 2008 et 2015 en raison de la période de décroissance radioactive.

Avec les hypothèses et forfaits majorants retenus, le ^{63}Ni et le ^3H représentent 48% du terme source Sols (le ^3H à lui seul 42%).

Le terme source médian total des sols est de 4 GBq, à comparer au terme source de 17,7 GBq pour le radier. **Le radier, dont l'intégralité sera retirée, représente environ 80% du terme source radier+sols (21,7 GBq).**

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4.3.2. Structuration du marquage des terres

4.3.2.1. Local 901

On retrouve en géostatistique, grâce à l'étude de la répartition géographique des marquages et des ratios entre le ^{137}Cs et le ^{60}Co , les deux populations identifiées pour le radier (voir historique au paragraphe 3.1.1) et qui marquent deux origines historiques différentes de la contamination. Le ^{137}Cs est prépondérant par rapport au ^{60}Co au centre de la pièce 901 et proportionnellement on retrouve un peu plus de ^{60}Co dans les pièces 902, 903 et 904. Ces ratios sont cohérents avec ceux observés dans la dalle béton. Par ailleurs, la confrontation des estimations géostatistiques avec les mesures de signal émergent effectuées sur la dalle en surface s'avère concluante, validant le modèle géostatistique pour le radier.

La Figure 13 présente les cartes de répartition dans le radier des activités massiques du ^{137}Cs reconstituées par géostatistique. Les contours des zones d'infiltration principales dans le radier sont tracés en jaune (radier supérieur) et en gris (radier inférieur).

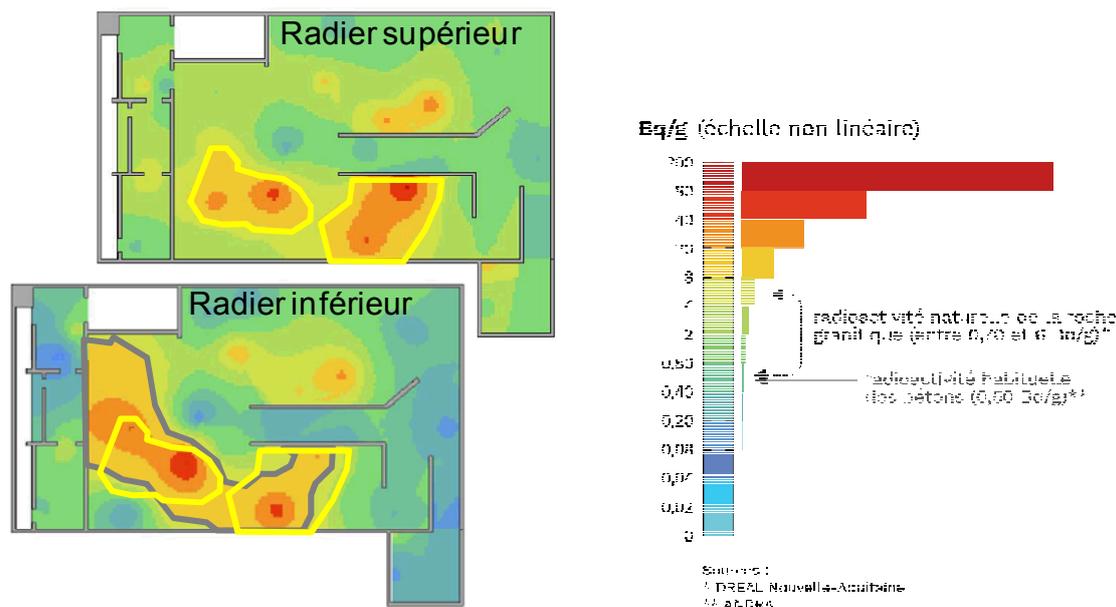


Figure 13 : Carte des activités massiques en ^{137}Cs obtenues par géostatistique dans la couche supérieure et inférieure du radier de la STE

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

La Figure 14 présente la carte de répartition des activités massiques du ¹³⁷Cs reconstituée par géostatistique, dans la couche de sol sous-jacente au radier. Les contours des zones d'infiltration principales dans les bétons sont reportés sur la couche de sol sous-jacente au radier (en jaune et en gris).

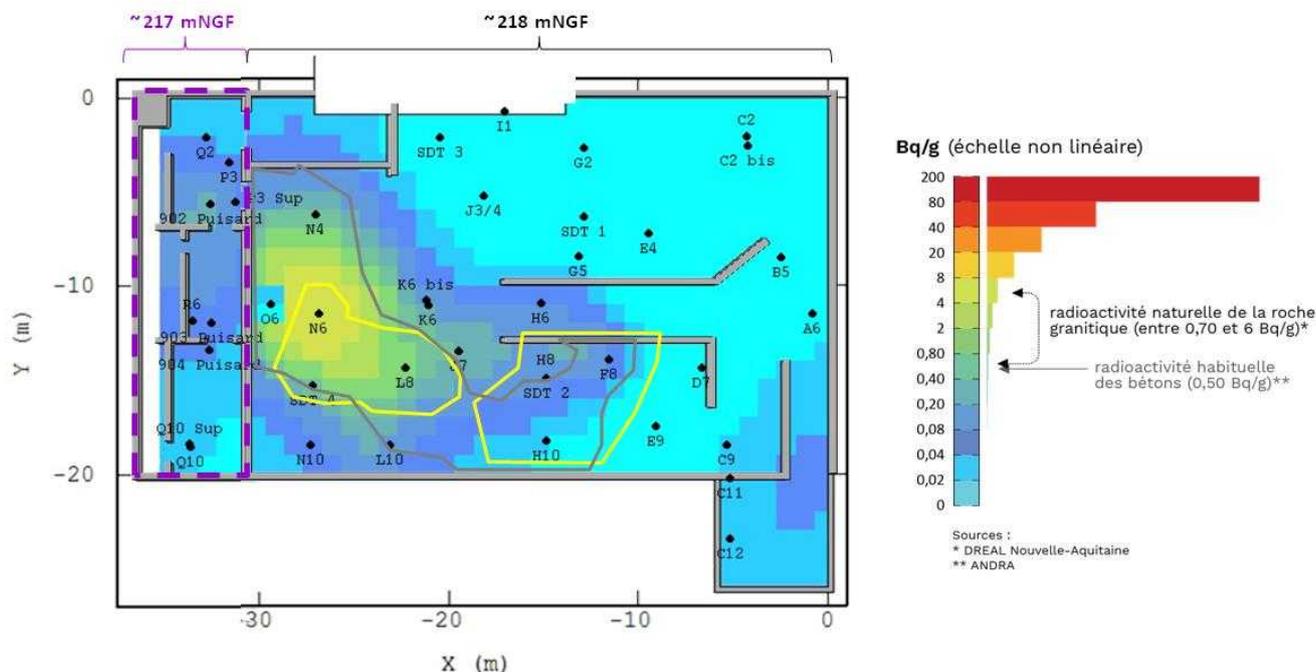


Figure 14 : Carte des activités massiques en ¹³⁷Cs obtenues par géostatistique dans les sols sous le radier

Nota : la gamme de valeur et l'échelle de couleur des activités dans les sols de la Figure 14 sont indexées sur la gamme des valeurs du ¹³⁷Cs dans le radier, en cohérence avec la Figure 13.

L'étude géostatistique des données dans la couche de sols sous-jacente montre bien le transfert de la contamination Ouest vers les sols (sondage N6 et L8 principalement). En revanche, la contamination du radier identifiée à proximité du voile Sud de la pièce 901 n'est pas retrouvée dans les sols sous-jacents (la valeur maximale en ¹³⁷Cs dans les sondages F8, E9 et H10 est de 0,15 Bq/g). Le marquage des sols se situe principalement sous le radier, dans la partie Ouest du local 901.

4.3.2.2. Locaux 902, 903 et 904

Au niveau des puisards des locaux 902, 903 et 904, les activités en ¹³⁷Cs des bétons en surface apparaissent fortement marqués (puisard 902 : 11 Bq/g, puisard 903 : 5,6 Bq/g, puisard 904 : 8,6 Bq/g) mais ces activités décroissent très rapidement avec la profondeur de prélèvement et sont faibles dans la couche de sols située sous le radier (puisard 902 : 0,78 Bq/g, puisard 903 : 0,12 Bq/g, puisard 904 : 0,03 Bq/g).

Ces puisards ne semblent pas avoir été une source d'infiltration significative vers les sols. Cependant, au droit du sondage réalisé au niveau du puisard 904, une activité de 2,4 Bq/g en ¹³⁷Cs est mesurée à environ 3m20 de profondeur. Là encore, le marquage est de faible extension, les échantillons supérieur (à 3 m) et inférieur (3m40) montrent en effet des activités plus faibles (respectivement 0,01 Bq/g et 0,47 Bq/g en ¹³⁷Cs).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4.3.2.3. Comportement du ¹³⁷Cs dans les terres sous la STE

Considéré comme très peu mobile dans les sols⁶, notamment comme ici en présence d'argile avec laquelle le ¹³⁷Cs a une affinité forte, la contamination en ¹³⁷Cs est observée jusqu'à -3m. Il ressort des points précédents et notamment du diagnostic (voir paragraphe 4.2.1.2) que les marquages verticaux observés dans les sondages sont de faibles épaisseurs, avec une alternance de couches marquées et saines (autour du sondage N6 et L8 notamment). La contamination observée en ¹³⁷Cs prend donc la forme de spots de petite dimension.

Les incidents à l'origine de ces marquages étant anciens, on peut avancer l'hypothèse qu'avant la mise en place du rabattement, le terme source présent dans les sols depuis le bas du radier (qui est le niveau haut de la nappe), ait été remobilisé et essuyé par les eaux de nappe. En effet, le pH légèrement acide des eaux de nappe sous la STE favoriserait une remobilisation du ¹³⁷Cs. Les terres situées immédiatement sous le radier ont été ponctuellement en contact avec la nappe et donc moins lixiviées. La présence de ³H sur l'échantillon le plus fortement marqué à 3 m de profondeur (sondage L8), au niveau de la zone de battement de la nappe rabattue, semble attester d'une faible circulation d'eau pouvant générer des spots résiduels.

Plus profondément, dans la nappe, le marquage résiduel est attendu plus diffus (phénomènes de dilution et migration) : la surveillance des eaux souterraines (piézomètres, puits STE) ne montre aucune anomalie radiologique.

4.3.2.4. Niveaux d'activité

Le repérage de la structuration du marquage des terres a été rendu possible grâce à des représentations 3D des dépassements de certains niveaux d'activité (Figure 15). Deux niveaux d'activité ont été utilisés préliminairement à titre exploratoire, 0,1 Bq/g et 0,5 Bq/g en ¹³⁷Cs, pour permettre d'illustrer la façon dont le marquage est réparti. Les volumes présentant une faible probabilité de dépassement de ces critères ne sont pas représentés. La profondeur de terre représentée sur la figure ci-dessous est de 5 m (correspondant aux sondages réalisés).

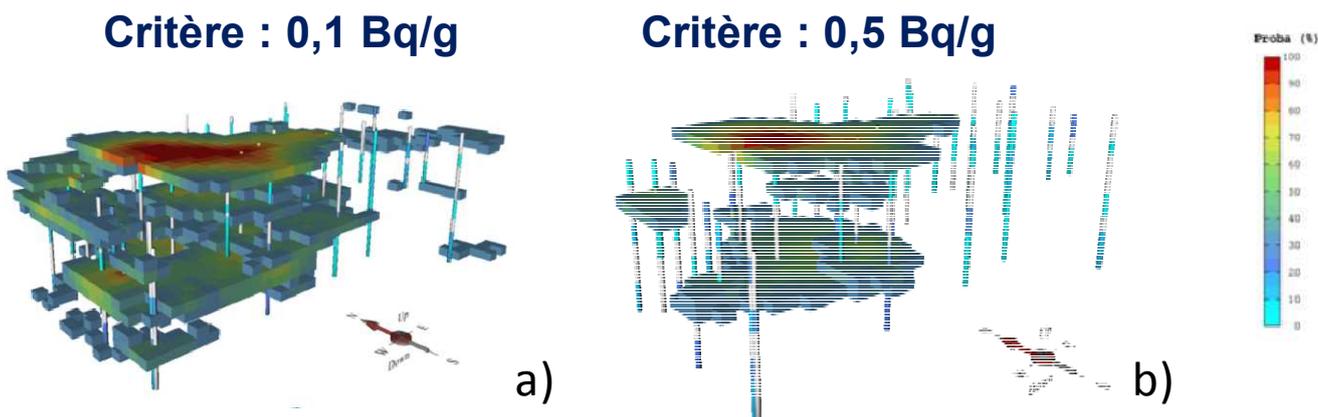


Figure 15 : Carte de risque de dépassement des niveaux d'activité de 0,1 Bq/g et 0,5 Bq/g en ¹³⁷Cs
 Sur les figures en rouge : un niveau de probabilité élevé de dépasser le critère donné dans les terres.

⁶ Fiche radionucléide IRSN, le césium-137 et son environnement (date de révision : 30/07/2005)

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Ainsi, on distingue sur la profondeur comme principales zones d'intérêt :

- la première couche de 50 cm de terres situées juste sous le radier dans la partie Ouest du local 901, et qui présente les niveaux d'activité et les risques de dépassement les plus élevés (moyenne estimée à 0,69 Bq/g en ¹³⁷Cs),
- une seconde zone située 3 m / 3,5 m sous le radier (moyenne estimée à 0,58 Bq/g en ¹³⁷Cs).

Cette répartition de la structure du marquage estimée par la géostatistique est cohérente avec l'analyse des données précédente, montrant les contaminations les plus fortes immédiatement sous la surface du radier puis entre 3m et 3m50. Ces volumes sont situés sous la zone d'infiltration principale du local 901, avec une probable extension sous les locaux 902, 903 et 904.

Entre ces deux couches, on observe un marquage diffus des terres, sur une gamme de valeur moins élevée (moyenne en ¹³⁷Cs par couche comprise entre 0,1 Bq/g et 0,3 Bq/g) ainsi que la présence, avec une probabilité élevée, de mailles de terres propres.

Les zones au Nord et à l'Est du local 901 présentent une probabilité très faible de marquage excédant ces niveaux d'activité.

4.3.3. Zones d'intérêts

Au regard de l'historique et du diagnostic précédent, et les excavations se faisant verticalement, deux surfaces ont été identifiées (Figure 16) pour cibler ensuite les volumes les plus marqués :

- La Zone 1 : zone de ~ 273 m² sous la pièce principale (901) accolée aux voiles Sud et Ouest,
- La Zone 2 : zone de ~ 84 m² sous toute la partie Ouest en décrochement du radier (locaux 902, 903 et 904).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

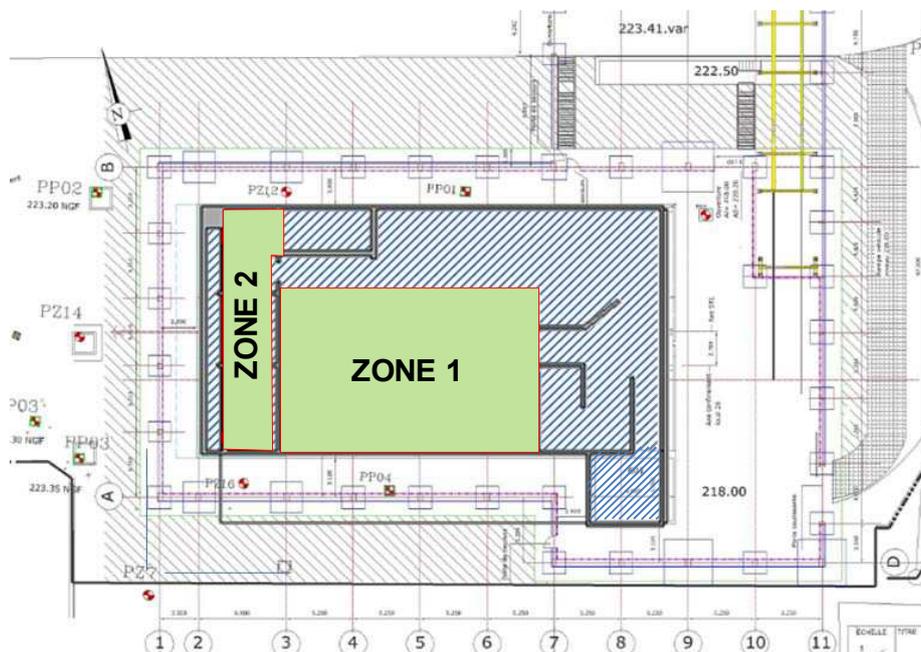


Figure 16 : Sélection préliminaire de 2 zones plus marquées

Dans le cas de la STE de Brennilis, tous les volumes excavés en profondeur seront considérés comme des déchets nucléaires, même s'ils se situent à l'interface entre deux zones plus marquées. Il est alors nécessaire d'intégrer dans le volume de déchets produits les volumes dits « d'accessibilité », c'est-à-dire des terres qui devraient être excavées (et donc gérées en déchets nucléaires TFA), alors qu'elles sont légèrement marquées.

4.3.4. Conclusion

Il ressort de l'étude géostatistique que le marquage des terres sous la STE de Brennilis est faible et diffus.

Des zones se démarquent :

- les zone 1 (partie Sud-Ouest du local 901) et zone 2 (locaux 902 à 904, en contrebas à l'Ouest) (voir Figure 16),
- la couche de terres 0/50 cm (moyenne estimée à 0,69 Bq/g en ¹³⁷Cs) et la couche à 3 m / 3 m 50 (moyenne estimée à 0,58 Bq/g en ¹³⁷Cs) (voir Figure 15).

Il existe un volume « d'accessibilité » (c'est à dire des déchets nucléaires non justifiés) important pour atteindre la zone située en profondeur.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

4.4. CONCLUSION DU DIAGNOSTIC

Eaux de nappe

Les eaux de nappe souterraines suivies depuis 2000 au niveau de la STE sont propres chimiquement et radiologiquement. Le niveau de la nappe est maintenu par un système de rabattement sous la cote de 216 mNGF.

Terres présentes sous le radier

La caractérisation des terres sous la STE a été réalisée en 2008 par 34 points de sondages de 2 à 5 m de profondeur sous le radier. Les radioéléments artificiels détectés ont été : ^{137}Cs , ^{60}Co , ^3H et ^{63}Ni . Le terme source a fait l'objet d'une étude géostatistique. Il ressort du diagnostic :

- un marquage des terres avec de faibles activités (médiane de 0,026 Bq/g en ^{137}Cs) et diffus,
- deux zones se démarquant légèrement : une couche située à 0/50 cm sous le radier (partie Sud-Ouest du local 901, moyenne estimée à 0,69 Bq/g en ^{137}Cs) et une couche à 3 m / 3,5 m (moyenne estimée à 0,58 Bq/g en ^{137}Cs) avec extension sous les locaux 902 à 904, en contrebas à l'Ouest,
- Le radier représente 80% du terme source (radier+sols) estimé à 21,7 GBq tous radioéléments confondus,

Le diagnostic apparaît ainsi cohérent avec l'historique (voir paragraphe 3.1.1), la connaissance des sols et le comportement de la nappe. La cartographie du marquage radiologique des terres sous le radier montre :

- que la source de marquage vient principalement du puisard de la salle centrale 901, avec une cohérence du transfert d'une partie de la contamination du radier vers les sols sous-jacents ;
- qu'il n'y a pas d'indication de transfert latéral des radioéléments dans les sols, vers les terres extérieures plus profondes. La contamination du radier au pied de mur Sud, n'est pas retrouvée dans les sols ;
- qu'une partie de marquage a migré plus profondément, vraisemblablement sous l'action de la nappe, et se présente sous la forme de spots de contamination de petite dimension.

Zones d'intérêts

En termes de quantité, répartition et vis-à-vis du nombre de mesures effectuées, le ^{137}Cs est le traceur principal du marquage des terres pour piloter les études de réhabilitation et gouverner des mesures de gestion. Il est de plus un contributeur principal à l'impact sanitaire.

Pour cibler ensuite les volumes les plus marqués à excaver, deux surfaces se démarquent, une sous la pièce principale (local 901) vers le voile Sud, jusqu'à au moins 3m50 de profondeur et une sous la partie Ouest en décrochement du radier, jusqu'à au moins 3m50.

Il existe un volume «d'accessibilité» (c'est à dire des déchets nucléaires non justifiés car seulement légèrement marqués) important pour atteindre la zone située en profondeur.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

5. ETUDE DE LA DEMARCHE DE REFERENCE : RETRAIT TOTAL DES TERRES

5.1. RAPPEL SUR LA DEMARCHE DE REFERENCE

L'ASN recommande dans sa doctrine diffusée en octobre 2012 ainsi que dans le guide 24 de 2016 d'adopter une démarche de référence qui consiste à retenir, lorsque cela est techniquement possible, l'assainissement complet des sites radiocontaminés, même si l'exposition des personnes induite par la pollution radioactive apparaît limitée.

5.2. DESCRIPTION DE LA DEMARCHE DE REFERENCE

L'intégralité du radier sera retiré soit 80% du terme source initial. Concernant les terres présentes sous le radier de la STE, celles-ci pourraient être potentiellement impactées par les radioéléments artificiels, même très faiblement, jusqu'au granite altéré ou sain. En effet, en fin de sondages (entre 4 et 5 m de profondeur) il existe un marquage résiduel en ¹³⁷Cs (valeurs allant de la LD sur de nombreuses mesures, à 0,2 Bq/g sur la valeur maximale). Ceci laisse supposer que des radioéléments ont pu migrer davantage en profondeur sur quelques mètres.

Les faciès très compacts sous la STE étant atteints aux environs des cotes 206 à 210 mNGF (voir Figure 17), on peut supposer de manière pénalisante, qu'un marquage diffus aurait pu atteindre ces niveaux (3 à 7 m de plus que les sondages réalisés) en raison du battement de la nappe dans cette zone). Des travaux d'excavation pourraient donc être nécessaires sur des profondeurs de 8 à 12 m sous le radier actuel du bâtiment.

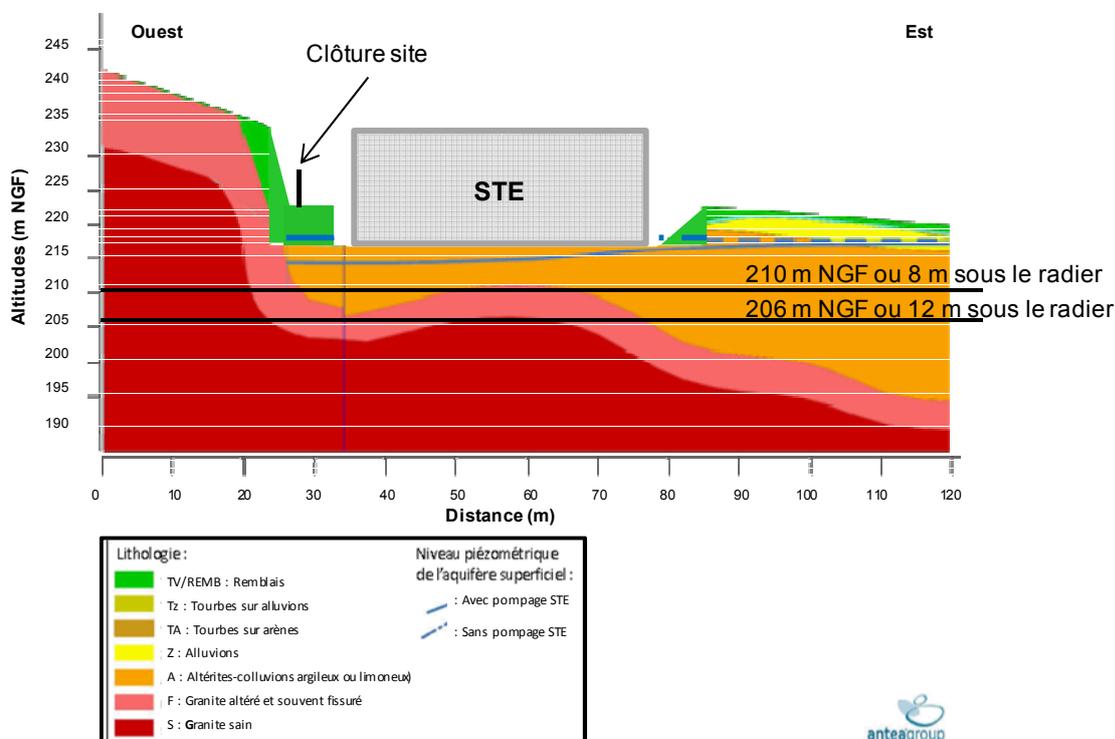


Figure 17 : Coupe géologique sous la STE et représentation des faciès compacts

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

5.3. FAISABILITE TECHNIQUE

Une analyse de la faisabilité des travaux montre des difficultés fortes de mise en œuvre.

5.3.1. Présence de la nappe

La nappe rabattue circule jusqu'à des niveaux compris entre les cotes 213 et 216 mNGF. Ceci est une condition qui rend impossible des excavations à 206 ou 210 mNGF. En effet les engins d'excavation ne peuvent pas intervenir sur une zone noyée par la nappe.

L'analyse du contexte hydrogéologique sous la STE montre que rabattre la nappe davantage est difficilement réalisable. En effet, la STE est située sur une zone de failles (granite altéré ou fracturé) et la nappe circule à ces niveaux dans des fissures de la roche mère. Les puits de pompage ne sont pas assez profonds (210 mNGF maximum) pour permettre de renforcer le rabattement actuel. Or la création de nouveaux puits serait contingente à beaucoup d'incertitudes sur le résultat attendu. En effet, comme le montrent les études et les essais d'implantations de puits qui ont été réalisés pour la mise en place du rabattement en 2000, à quelques mètres près, les puits ne sont pas productifs car l'eau circule dans un réseau complexe de failles. Ainsi actuellement les puits PP03 et PP03P réalisent la majeure partie du pompage. D'autres puits implantés à quelques mètres étaient totalement improductifs. Un renforcement du rabattement de la nappe n'est donc pas envisageable.

5.3.2. Sécurité des intervenants

Les conditions techniques d'excavation à une profondeur de 8 ou 12 m induisent par ailleurs des risques importants pour les intervenants (tenue des parois, risque de chute...). En effet, la zone de travaux est située sous une protection climatique (ce qui est indispensable pour protéger le chantier des pluies fréquentes en Bretagne) et il n'y a pas de recul pour réaliser des talus (d'autant que les limites de l'INB sont très proches du Sud de la STE). Les parois devraient donc être constituées verticalement ce qui implique des risques en terme de sécurité des travailleurs et impliquerait de plus la mise en place de moyens de manutention complexes à l'intérieur du confinement nucléaire.

Les difficultés techniques de mise en œuvre de la démarche de référence sont donc très importantes.

5.4. VOLUME DE DECHETS PREVISIONNEL ET IMPACT CO₂

Considérant que la STE fait une surface de ~ 750 m² et considérant un coefficient de foisonnement des terres de 1,3⁷, les volumes de déchets TFA potentiellement produits seraient de **8 000 à 12 000 m³** de terres foisonnées, donc des volumes très importants dont une majeure partie faiblement marquée, mais à considérer comme

⁷ Un coefficient de foisonnement de terres situé entre 1,2 et 1,4 est utilisé de manière courante. On le trouve cité par exemple dans le Rapport du BRGM de décembre 2013 (BRGM/RP-62856-FR) « Guide de caractérisation des terres excavées dans le cadre de leur réutilisation hors site en technique routière et dans les projets d'aménagement ».

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

déchets nucléaires⁸. Ceci est contraire aux objectifs du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR).

D'autre part, l'impact CO₂ inhérent aux transports de ces déchets serait de 1 600 à 2 300 Tonnes de CO₂, soit 439 à 627 tonnes d'équivalent C (voir paramètres utilisés au paragraphe 8.3). Avec un chargement moyen de camion à 15 tonnes, cela représente entre 840 et 1 200 camions sur la route, donc une augmentation significative du trafic routier.

Parmi les moyens considérés « possibles » d'évacuation des déchets, seul le transport par camion a été retenu. En effet, le site n'est pas connecté aux rails, pas plus que le centre de stockage de déchets de très faibles activités CSTFA de l'ANDRA. Il faudrait envisager un premier transport de terres par camion (du site de Brennilis jusqu'à Morlaix), ensuite un transport par rail, puis à nouveau un transport des containers par route pour arriver jusqu'au centre de stockage de l'ANDRA à Brienne-le-Château. Ceci implique, au-delà des coûts supplémentaires :

- deux ruptures de charges d'où des risques liés à la sécurité,
- la difficulté à organiser les rotations trains/camions. En effet il serait obligatoire d'avoir suffisamment de containers pour remplir rapidement un train qui serait mis à disposition par la SNCF et avec une fluidité/rapidité très importante sur le départ des camions.

Le transport par rail n'est donc pas envisageable pour les terres à Brennilis sur le plan opérationnel. Par ailleurs cette option ne serait pas économiquement raisonnable. C'est pourquoi l'impact environnemental n'a été présenté que pour le moyen de transport « routier ». L'impact CO₂ du transport par rail serait bien sûr plus faible que celui par camion.

Lors du transport par route, EDF est soucieux de l'environnement en maximisant le remplissage de chaque container transporté.

5.5. ESTIMATION DES COÛTS

Un calcul basé sur des estimations de coûts de terrassement pour une paroi verticale blindée a été réalisé.

Sur la base d'une excavation de 8 ou 12 m, le volume total des terres à excaver serait de 8 000 à 12 000 m³. Le coût total comprenant le traitement du déchet TFA (transport, stockage), les coûts des excavations et le coût du blindage de la fouille a été évalué entre 13 et 18 millions d'euros. Ce coût ne tient pas compte des fonctions support à mettre en place pour réaliser le chantier (manutention, accès sécurisés ...).

⁸ Les volumes d'accessibilité ne peuvent être définis de manière opérationnelle car la contamination est diffuse. Les deux couches de terres les plus marquées présentées dans le Plan de gestion (0-50 et 3m-3m50) ne se démarquent pas des autres volumes de terres au point de pouvoir distinguer des zones conventionnelles (K) entre elles. Les "mailles" de terres propres existent mais ne sont pas en continuité géographique ce qui rend impossible un découpage par micro-zonage 3D préalable. On peut les calculer ou les schématiser grâce à la géostatistique en se donnant des critères comme une activité en ¹³⁷Cs, par exemple <0,5 Bq/g ou 0,1 Bq/g (Figure 15) mais il reste toujours un risque de dépassement du critère considéré et ce ne sont pas de grandes zones franches et distinctes des autres. Le seul moyen pour « une gestion appropriée pour ne pas mélanger ces terres » serait un tri après excavation, mais cela n'est pas autorisé à ce jour par la réglementation.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

5.6. CONCLUSION

EDF étudie ici la démarche de référence qui consiste en un assainissement complet des terres afin de retirer tous les éléments radiologiques artificiels qui auraient pu être ajoutés dans les sols présents sous la STE du site. Les terres pourraient être potentiellement impactées, même très faiblement, jusqu'au granite sain (environ 206 mNGF, - 12 m) ce qui représente un volume d'environ 12 000 m³ de déchets TFA. Cette démarche de référence n'est pas techniquement réalisable car le rabattement de la nappe déjà mis en place sous la STE ne garantit une cote de nappe que de 216 mNGF, soit environ 1 à 2 m sous le radier. Par ailleurs il entraîne des risques pour les intervenants et une quantité massive de déchets TFA (avec les impacts CO₂ et trafic associés). Enfin, les coûts induits par un tel chantier seraient très importants. Un assainissement complet de ces terres n'est pas industriellement envisageable ni raisonnable en terme d'impacts sur les intérêts protégés.

Dans ces conditions, l'exploitant se doit d'aller aussi loin que possible dans le processus d'assainissement tout en préservant ces intérêts. Pour ce faire, il est nécessaire d'étudier la vulnérabilité des milieux et d'analyser la compatibilité actuelle des sols avec les usages afin de proposer la meilleure option de gestion.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

6. ETUDE DE VULNERABILITE DES MILIEUX ET SCHEMA CONCEPTUEL

La démarche de référence prescrite par la Doctrine ASN sur les sols est le retrait total des terres marquées radiologiquement. Cette démarche pose d'importantes difficultés dans le cas des sous-sols de la STE et l'exploitant doit étudier un assainissement poussé des terres. Dans ce cadre, il doit d'abord vérifier si l'état des sols est compatible avec les usages établis, envisagés ou envisageables. Un schéma conceptuel doit donc être établi.

6.1. USAGES SUR SITE ET HORS SITE

6.1.1. Sur site

Le site a accueilli une centrale nucléaire prototype industriel de la filière à eau lourde, mise en service en 1967 et arrêtée en juillet 1985. Les travaux de déconstruction ont débuté en 1997 et se poursuivent actuellement.

Usage actuel

L'usage actuel du site est donc celui d'un site industriel en cours de déconstruction. Plusieurs phases d'assainissement ont déjà été réalisées sur le radier de la STE. Il n'y a pas de prélèvement d'eau de nappe sur le site pour un usage domestique, industriel ou pour la consommation d'eau potable.

Suite au démantèlement de la STE, la zone sera remblayée par du remblai propre. Un dossier de demande d'arrêt du rabattement de la nappe a été soumis à l'ASN en juin 2017.

Usages futurs envisagés pour le site

La libération du site est envisagée à ce jour en 2032. L'usage futur à la fin du démantèlement et libération du site sera a priori industriel.

6.1.2. Hors site

Prélèvements d'eau en dehors du site

De manière générale, il n'y a pas de prélèvements d'eaux de surface dans l'Ellez, ni dans l'Aulne (en aval) entre sa confluence avec l'Ellez et son embouchure, pour des usages domestiques, industriels ou agricoles.

- D'après les données de l'Agence de l'eau, il n'y a pas de prélèvement d'eau à usage industriel dans un rayon de 10 km autour du site de Brennilis.
- D'après les données de l'Agence de l'eau, il n'y a pas de prélèvement d'eau d'irrigation dans un rayon de 10 km autour du site de Brennilis.
- L'utilisation des eaux à proximité de la centrale de Brennilis par les communes avoisinantes concerne les eaux de boisson et se fait principalement à partir de forages dit par l'Agence de l'eau « dans la nappe profonde » (2 à 6 m de profondeur). Il n'y a pas de prélèvement pour les eaux de boisson en eau « superficielle » dans un rayon de 10 km autour de la centrale⁹ : le puits de pompage le plus proche de la centrale est sur la commune de Brennilis à 3,2 km au Nord-Est du site. Il est réalisé en nappe à 6 m de profondeur.

⁹ Le captage de petit moulin réalisé dans la rivière Fao est situé dans le rayon de 10 km autour de la centrale mais n'est pas cité car les eaux de cette rivière ne sont pas en continuité hydraulique avec les eaux transitant au droit du site de Brennilis.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Activités

En ce qui concerne les autres usages de l'eau, les activités suivantes sont recensées :

- Sur l'Ellez, du barrage de Nestavel jusqu'à la confluence avec l'Aulne, la baignade ou d'autres activités nautiques ne sont pas pratiquées.
- La pêche est interdite, par Arrêté préfectoral, sur l'Ellez entre le barrage du lac St Michel et l'entrée du plan d'eau de St Herbot.

Seule la pêche pourrait être pratiquée illégalement dans cette zone. L'Ellez est une rivière classée à saumons et de 1^{ère} catégorie piscicole (salmonidés dominants).

6.2. EXPOSITIONS ET ENJEUX

Concernant l'identification des enjeux, la Décision n°2013-DC-0360 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base impose de choisir les hypothèses les plus réalistes possibles. Dans le cas de la STE de Brennilis, après la fin du démantèlement de celle-ci, la zone sera remblayée par 5 m de terrain propre (de la cote 218 à la cote 223 mNGF). Il n'y aura donc pas de voie d'exposition directe possible pour les usagers en surface du site, par exemple par irradiation externe, ingestion de terres ou inhalation de poussières. Le rabattement de la nappe devrait être arrêté (sur accord de l'ASN). La seule voie d'exposition possible des enjeux est alors via la nappe qui circule sous la STE. En l'occurrence, les mesures réalisées dans les piézomètres, les eaux de rabattement ou l'Ellez n'ont jamais montré la présence de radioéléments artificiels dans ces eaux.

Direction des écoulements dans la nappe

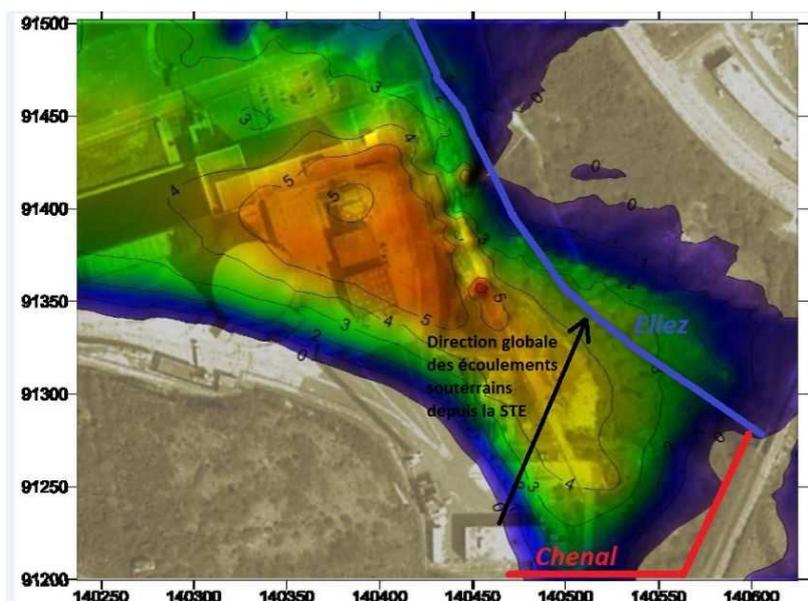


Figure 18 : Direction des écoulements issus de la modélisation hydrogéologique du site

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Les eaux de rabattement de la nappe sous la STE sont actuellement collectées et contrôlées. Elles sont rejetées dans le lac St Michel. En situation naturelle, c'est-à-dire hors rabattement de nappe, les eaux superficielles circulent sous le site dans les arènes, remblais et alluvions suivant un axe Sud/Ouest – Nord/Est (voir Figure 18) vers le cours d'eau Ellez situé à environ 130 m de la STE en bordure du site. Plus en profondeur, dans le substratum (roche mère plus ou moins altérée), les écoulements se font dans les réseaux de fissures et fractures du granite, également en direction du Nord-Est. Le transfert en surface est plus direct (l'Ellez est à 130 m), donc plus pénalisant en terme d'activité artificielle potentiellement transférée vers ce cours d'eau.

Expositions

D'après les usages actuels du site, le seul transfert réaliste possible est le transfert de radioéléments des sous-sols de la STE vers l'Ellez, dans une direction Nord-Est. L'utilisation des eaux superficielles pouvant conduire à une exposition étant la pratique de la pêche dans la rivière Ellez, le scénario d'exposition retenu pour le schéma conceptuel est donc celui d'un pêcheur pratiquant cette activité de manière illégale au droit immédiat du site.

Les voies d'exposition seraient l'ingestion de poisson contaminé et l'exposition externe sur les berges contaminées.

6.3. SCHEMA CONCEPTUEL

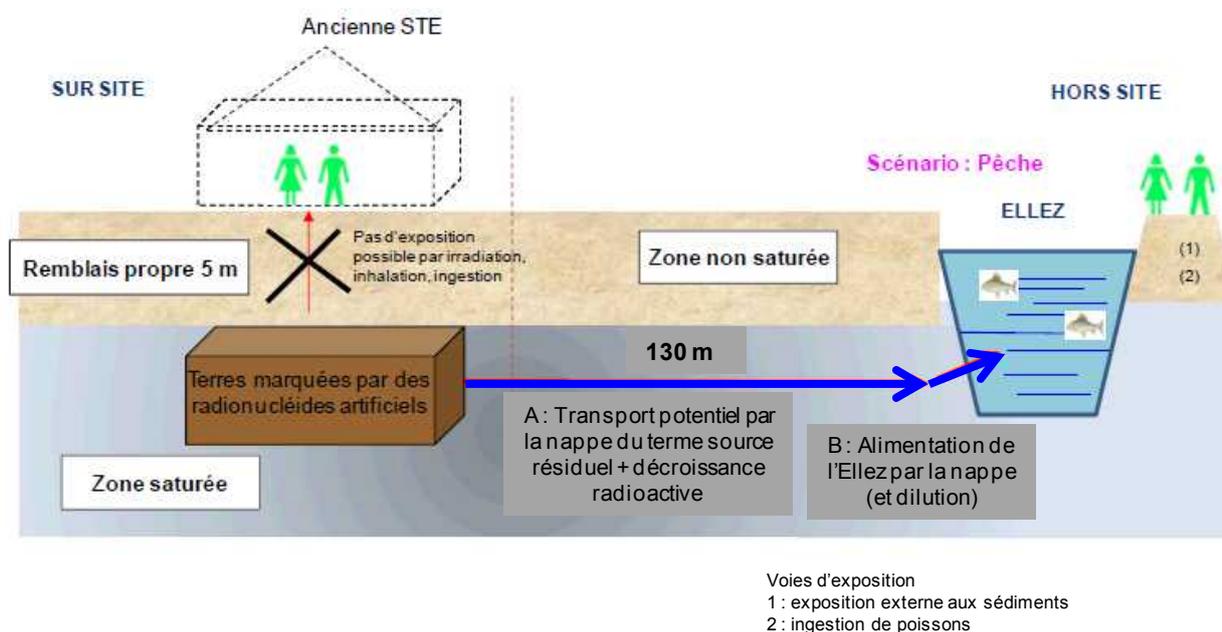


Figure 19 : Schéma conceptuel des usages de la zone

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

7. ETUDE D'IMPACT SANITAIRE DES TERRES EN PLACE

Afin d'étudier la compatibilité de l'état des sols avec tous les usages, deux types de scénarios ont été considérés pour l'Evaluation Quantitative des Expositions radiologiques : l'un réaliste, adapté au site de Brennilis, avec un pêcheur sur la rivière Ellez (scénario d'usage « Pêcheur »), et les scénarios « type IRSN » (issus du guide méthodologique de décembre 2011) pour la zone remblayée telle que prévue par les travaux. De manière très pénalisante les scénarios « type IRSN » ont également fait l'objet d'un calcul dans le cas d'une zone non remblayée (ce qui ne sera pas le cas).

7.1. SCENARIO REALISTE ADAPTE AU SITE : SCENARIO D'USAGE « PECHEUR »

Pour un pêcheur à proximité du site les voies d'exposition potentielles sont :

- L'exposition externe aux sédiments, sur les berges (exposition estimée à 200 h/an),
- L'exposition interne par ingestion de poissons pêchés dans l'Ellez. Il est considéré comme population de référence des adultes pêcheurs (17-60 ans) consommant le produit de leur pêche (15,5 kg/an). La consommation annuelle de poisson du groupe de référence est estimée à partir de l'enquête INCA99 - Base de données CIBLEX pour la Zone d'Étude et d'Aménagement du Territoire Ouest, à laquelle on applique de manière majorante un taux d'autoconsommation de 100% (il est réellement de 15 %).

7.1.1. Transfert des radioéléments vers l'Ellez

7.1.1.1. Modèle de transfert sol-nappe

- Modèle Argus

EDF ARGUS V3.5 est une solution analytique à plusieurs dimensions de l'équation de transport (dispersion-convection) en milieu poreux homogène (sol-nappe). Le mode utilisé ici est le « Mode 1D Rivière » qui considère un transport en une dimension dans les eaux souterraines (calcul de flux) puis une dilution des eaux de nappe par la rivière.

- Hypothèses :

- le rabattement de nappe sous la STE actuellement en place est arrêté (ce sera le cas à la fin du démantèlement de la STE, sous réserve de l'accord de l'ASN) ;
- le terme source des sols est supposé regroupé en un point, au milieu de la STE ;
- le terme source présent dans les sols est supposé être instantanément et en totalité en contact avec la nappe ;
- les transferts sont modélisés par un processus de convection-dispersion dans un aquifère homogène et isotrope, selon une trajectoire Nord-Est vers l'Ellez à 130 m ;
- la décroissance radioactive du terme source à mi-2015 est prise en compte.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

7.1.1.2. Paramètres de sol retenus

Les terrains traversés entre la STE et l'Ellez en direction Nord-Est comprennent principalement en surface des remblais puis rapidement les alluvions de nature sableuse de l'Ellez. La perméabilité retenue est la plus pénalisante pour les transferts de radioéléments, c'est-à-dire la perméabilité élevée de remblais à 1×10^{-3} m/s (1×10^{-4} m/s aurait été possible également car plus réaliste, mais moins majorant).

Le gradient hydraulique retenu a été de 0,01 (peu de données sont disponibles pour le site de Brennilis. Les études géologiques font état de valeurs assez faibles (0,66 à 1 %) ; la valeur de 1% est la plus pénalisante).

Les coefficients de distribution (Kd) retenus sont les suivants, considérant que les terrains sont sableux :

Radioéléments	Kd (L/Kg)	Type de sols	Source
¹³⁷ Cs	270	Sol sableux et/ou acide	Fiche IRSN et AIEA 1994 (TRS 364)
⁶⁰ Co	640	Sableux et/ou limoneux	Fiche IRSN et AIEA 2010 (TRS 472)
³ H	0 ¹⁰		
⁶³ Ni	400	Sol sableux et/ou acide	Fiche IRSN et AIEA 1994 (TRS 364)

Tableau 3 : Coefficient de distribution ou Kd (Bq.kg⁻¹ de sol sec par Bq.L⁻¹ d'eau)

Le détail des autres paramètres utilisés est donné en Annexe 3.

7.1.1.3. Résultats du transfert en nappe

Les résultats d'estimation des activités volumiques des radionucléides dans l'Ellez sont les suivants :

Radioéléments	Terme source des terres en place	Activité maximale dans l'Ellez	
	Bq	Bq/L	Temps d'arrivée (année)
¹³⁷ Cs	$2,10 \times 10^{+9}$	1×10^{-5}	164 ans
⁶⁰ Co	$1,61 \times 10^{+7}$	3×10^{-21}	182 ans
³ H	$1,69 \times 10^{+9}$	1,9	22 jours
⁶³ Ni	$2,49 \times 10^{+8}$	8×10^{-06}	266 ans

Tableau 4 : Estimation des activités volumiques des radionucléides dans l'Ellez

¹⁰ Le tritium reste sous forme dissoute dans le milieu aquifère ce qui se traduit par un Kd de 0 L.kg⁻¹, identique à celui de l'eau (aucune sorption (fixation) sur les particules solides du sol n'est considérée).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Les calculs ont été réalisés pour les terrains en place, dans l'hypothèse d'un arrêt brutal du rabattement de la nappe, entraînant l'injection instantanée en nappe de l'ensemble du terme source, ce qui est une approche très majorante.

L'activité maximale du ¹³⁷Cs calculée dans l'Ellez atteint environ 1×10^{-5} Bq/L, 164 ans après la dissolution du radioélément en nappe. A noter que cette activité n'est évidemment pas détectable en rivière avec les moyens de mesures actuelles. Le ⁶⁰Co aurait une activité maximale de 3×10^{-21} Bq/L (soit infinitésimale) au bout de 182 ans.

Le ³H serait le premier à arriver dans le cours d'eau (au bout de 22 jours) avec une activité inférieure à 2 Bq/L. L'activité du ³H est plus élevée que pour le ¹³⁷Cs en raison du Kd nul et donc du fait que la décroissance radioactive ne joue pas pendant le temps de transfert. Le ⁶³Ni atteindrait le cours d'eau au bout de 266 ans avec une activité de 8×10^{-6} Bq/L.

Les quatre radioéléments constituant le terme source ont été retenus pour la suite du calcul des conséquences radiologiques pour le scénario d'usage « Pêcheur » dans l'Ellez.

7.1.2. Calcul d'exposition du scénario d'usage « Pêcheur » à partir des concentrations en rivière

L'évaluation des conséquences radiologiques sur l'homme de la présence de radioéléments dans l'eau de l'Ellez a été réalisée ensuite pour les 4 radionucléides au moyen du code de calcul EDF BLIQID version 4.01 en considérant l'exposition externe aux sédiments et l'exposition interne par ingestion de poisson durant 1 an (voir en Annexe 3 le détail des paramètres retenus pour les expositions considérées).

Les résultats d'estimation des doses efficaces reçues sont les suivants :

Radioéléments	Activité des terres en place (Bq)	Activité dans l'Ellez (Bq/L)	Dose efficace due à l'Ingestion (mSv/an)	Dose efficace due à l'Exposition externe (mSv/an)	Dose efficace totale (mSv/an)
¹³⁷ Cs	$2,10 \times 10^{+9}$	1×10^{-5}	7×10^{-6}	2×10^{-8}	7×10^{-6}
⁶⁰ Co	$1,61 \times 10^{+7}$	3×10^{-21}	7×10^{-23}	9×10^{-23}	$1,5 \times 10^{-22}$
³ H	$1,69 \times 10^{+9}$	1,9	6×10^{-7}	0	6×10^{-7}
⁶³ Ni	$2,49 \times 10^{+8}$	8×10^{-6}	1×10^{-9}	0	1×10^{-9}
			7×10^{-6}	2×10^{-8}	Total = 8×10^{-6}

Tableau 5 : Doses efficaces reçues par ingestion et exposition externe (calcul BLIQID)

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

La dose efficace totale reçue pour le scénario Pêche est estimée à 8×10^{-6} mSv/an, ce qui est très faible. A titre de comparaison, la dose moyenne liée à la radioactivité naturelle en France est de l'ordre de 2,4 mSv par an. Cette valeur est plus de 100 000 fois inférieure à la limite fixée à 1 mSv/an pour une personne du public, par l'article R1333-8 du Code de la Santé Publique.

Le ^{137}Cs est le contributeur principal dans la dose reçue (92,3 %). La prise en compte du ^3H , du ^{60}Co ou du ^{63}Ni ne change pas l'ordre de grandeur de la dose reçue. La voie principale de l'exposition est l'ingestion du poisson (à 99,7 %).

7.1.3. Analyses des incertitudes

7.1.3.1. Terme source

Le terme source global médian pour les sols sous-jacents est de 2,10 GBq en ^{137}Cs à mi-2015. L'intervalle de confiance associé est [1,56 - 2,77 GBq] soit une incertitude de 30% environ.

L'hypothèse d'injection instantanée de tout le terme source en nappe (4 radioéléments), et le fait de considérer les activités maximales simultanées de tous les radioéléments dans l'Ellez pendant 1 an pour le calcul d'impact, sont des facteurs majorants pour la dose efficace calculée.

7.1.3.2. Influence de la perméabilité retenue

La nature des terrains a été considérée globalement comme étant sableuse et la perméabilité retenue a été la plus pénalisante en retenant celle des remblais à 1×10^{-3} m/s. D'après la modélisation hydrogéologique des sous-sols la valeur de 1×10^{-4} m/s aurait été également possible comme valeur majorante pour les faciès ayant la perméabilité la plus forte. Par ailleurs les perméabilités des couches d'alluvions ou d'altérites sont probablement comprises entre 1×10^{-6} et 1×10^{-8} m/s (voir Figure 20).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

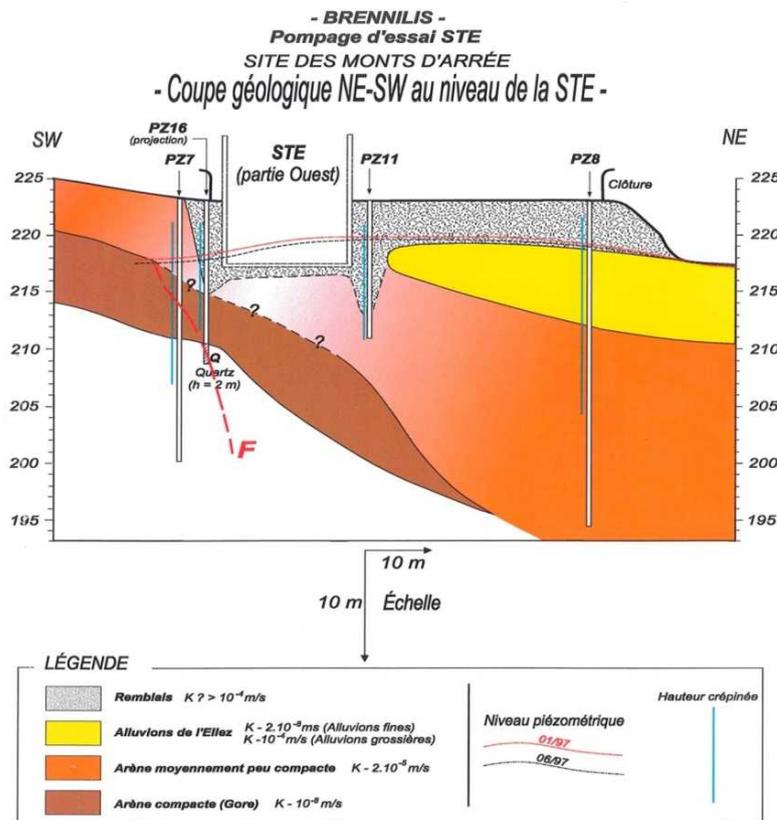


Figure 20 : Valeurs de perméabilités des terrains sous la STE

7.1.3.3. Influence des Kd

Des valeurs de Kd ont été mesurées par l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay sur des échantillons de roches et de sols issus de sondages réalisés sur le site de Brennilis, en 1997. Ces mesures indiquent des valeurs comprises entre 877 et 116 020 L/kg pour le ¹³⁷Cs. Les valeurs de Kd sur le site de Brennilis seraient donc plus élevées que celles utilisées pour les simulations présentées ici. Des Kd plus élevés induisent un facteur de retard (R)¹¹ également plus élevé, et entraînent par conséquent des niveaux maximum d'activité plus faibles que ceux estimés par la présente étude.

Par ailleurs le gradient hydraulique retenu à 1% est la valeur la plus pénalisante estimée pour le site.

7.1.4. Conclusion

L'impact sanitaire initial des terres est très faible (8×10^{-6} mSv/an pour le Scénario réaliste d'usage Pêcheur). Les résultats du calcul d'impact sanitaire pour un scénario réaliste adapté au site (scénario d'usage « Pêcheur ») sont considérés comme étant majorants.

¹¹ La sorption (fixation) des substances sur les particules solides du sol a pour effet d'entraîner un retard dans le transport de ces substances dans le milieu aquifère. Ce phénomène se traduit dans l'équation de transport de masse dans les eaux souterraines par l'intégration d'un coefficient de retard (R).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

7.2. SCENARIOS TYPES IRSN

7.2.1. Outil de calcul utilisé

L'outil de calcul utilisé est l'application Excel « Impact » élaboré par le CEA. Les scénarios « sols » considérés sont issus de ceux du guide IRSN « Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives », version de décembre 2011. Les scénarios ont été adaptés de la manière suivante :

Résidence : Une famille demeure une grande partie de son temps dans une maison individuelle avec jardin et potager situés sur le site contaminé. L'individu de référence du point de vue de l'exposition radiologique est un enfant de 3 à 7 ans. On suppose que la moitié des légumes qu'il consomme provient du potager. Il n'y a pas de puits. Le budget temps se décompose en 12h de sommeil, 9h en intérieur et 3h en extérieur.

Bureau : Il s'agit d'un nouveau bâtiment construit sur un site réhabilité pour une utilisation professionnelle. Le bâtiment dispose à ses abords de surfaces de type espaces verts. Les personnes exposées sont des adultes. Le temps de présence annuel est de 230 jours se répartissant pour chaque jour en 6,5h à l'intérieur et 2h à l'extérieur.

Maraîchage : Il s'agit d'un site dont la surface est réutilisée pour une activité agricole de type maraîchage mais sans considérer aucune activité d'élevage. Il n'y a pas de surfaces couvertes ni de puits. L'individu de référence est un adulte travaillant sur l'exploitation. On considère que la totalité des légumes qu'il consomme provient de l'exploitation. Le budget temps est de 7,5h par jour, 230 jours par an.

Ecole : Le site est un établissement scolaire. Le bâti dispose à ses abords de surfaces couvertes de type allées ou parkings, d'espaces verts, mais pas de puits ni de potager ni de plan d'eau. Les enfants de 3 à 7 ans constituent le groupe de référence. Ils passent 8h par jour à l'école dont 6h à l'intérieur et 2h à l'extérieur (cour) pendant 200 jours par an.

Parking : Il s'agit d'un site privé ou public dont la surface est destinée au parking de véhicules. Le parking est supposé non gardé. Toute la surface est couverte d'un revêtement qui piège le marquage des terres au-dessous. Les personnes exposées sont des adultes. Le temps de présence considéré est de 1h par jour, 230 jours par an.

Complexe sportif : le site dont le bâti est neuf est réaménagé pour une utilisation de type complexe sportif (stade et vestiaires). Le bâti dispose, à ses abords, de surfaces couvertes de type allées ou parkings, d'espaces verts mais pas de puits ni de potager ni de plans d'eau. On considère que la plus grande partie est non couverte avec des vestiaires couverts. L'individu de référence est un enfant (8 à 12 ans) passant 520h par an sur le site (5h par jour, 2 jours par semaine) dont 455h sur la partie non couverte. Il est supposé y pratiquer une activité sportive.

Base de loisirs : Le site est réaménagé pour une utilisation de type base de loisirs (pelouses, jeux d'enfants) ouverte au public. On considère une base de loisirs comportant des espaces verts mais pas de parties couvertes ni de plan d'eau. L'individu de référence est un enfant de 3 à 7 ans passant 520h par an sur le site.

Friches : Le site est abandonné donc l'accès est possible. Tous les bâtiments ont été déconstruits. Des enfants peuvent y faire des incursions à des fins ludiques. Le groupe de référence est constitué d'enfants de 8 à 12 ans qui sont supposés exposés durant 300h par an (6h par jour pendant 50 jours).

Chantier : Un chantier est établi sur le site à des fins de réaménagement visant à la construction d'un bâtiment. Le marquage est présent uniquement dans les terres. Le groupe de référence est constitué des ouvriers travaillant sur le chantier pendant 6 mois (115 jours). L'empoussièrement est important. Le budget temps des travailleurs se répartit chaque jour en 6h d'exercice lourd et 1,5h d'activités diverses.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

A chaque calcul, l'impact radiologique annuel est donné pour tous les scénarios sur la base d'une activité massique moyenne de la couche de terres affleurante (50 cm d'épaisseur) en Bq/g pour chaque radionucléide considéré. Les scénarios de l'application « Impact » ne considèrent ni plans d'eau, ni puits, ni piscines. Les facteurs de dose pour l'irradiation externe proviennent du rapport Federal Guidance n°12 de l'EPA, les facteurs de doses pour l'ingestion et l'irradiation (DPUI) proviennent de l'Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants. Les autres paramètres retenus sont exposés en Annexe 4.

Les scénarios les plus réalistes pour le site de Brennilis à vocation industrielle en 2032 sont les scénarios « bureau », « parking », « chantier » ou « friches ».

7.2.2. Données d'entrée

L'étude géostatistique a permis de reconstituer les termes sources, mis à jour à l'horizon envisagé pour la libération du site en 2032 (aujourd'hui la zone n'est pas accessible à des usagers potentiels pour ce type de scénario puisque située sous le radier de la STE). Par ailleurs la zone sera remblayée dans la continuité des travaux actuels par 5 m de remblais.

Pour le ³H et le ⁶³Ni, il a été conservé les hypothèses forfaitaires initiales en appliquant la décroissance radioactive.

Radioéléments	Terme source (Bq)	Activité moyenne de la couche de terre affleurante (Bq/g)
	MAJ 2032	MAJ 2032
¹³⁷ Cs	1,43 10 ⁺⁹	0,470
⁶⁰ Co	1,83 10 ⁺⁶	3,65 x 10 ⁻⁴
³ H	6,65 10 ⁺⁸	0,218
⁶³ Ni	2,21 10 ⁺⁸	0,406

Tableau 6 : Activités des radioéléments utilisés pour le calcul d'impact Scénario « Types IRSN »

7.2.3. Hypothèse usage futur réaliste : Zone remblayée par 5 m de terrain propre

La zone sera remblayée dans la continuité des travaux de 2017 par 5 m de remblais propre. Les voies d'exposition retenues dans les scénarios « type » sont alors coupées (exposition externe, inhalation, ingestion). Dans un contexte réaliste, l'impact pour ces scénarios est nul.

Scénarios Type IRSN : Pour une zone remblayée								
Impact en mSv/an								
Résidence	Bureau	Maraichage	Ecole	Parking	Friches	Chantier	Complexe sportif	Base de Loisirs
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 7 : Dose efficace reçue pour la zone STE remblayée

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

7.2.4. Hypothèse usage futur très pénalisant : la zone est en accès direct

Le calcul d'impact a été réalisé dans le cas d'une zone non remblayée en accès direct pour les personnes.

Scénarios Type IRSN : Pour une zone non remblayée								
Impact en mSv/an								
Résidence	Bureau	Maraichage	Ecole	Parking	Friches	Chantier	Complexe sportif	Base de Loisirs
0,13	0,027	0,11	0,031	0,004	0,016	0,055	0,025	0,027

Tableau 8 : Dose efficace reçue pour la zone STE non remblayée

Les impacts pour les scénarios les plus proches de ce qui peut être envisagé comme usages pour le site de Brennilis « chantier », « parking », « bureau » ou « friches » varient entre **0,004 et 0,055 mSv/an** pour une zone qui serait accessible à tous, non remblayée. A titre de comparaison, la dose moyenne liée à la radioactivité naturelle en France est de l'ordre de 2,4 mSv/an. Cette valeur est plus de 10 fois inférieure à la limite fixée à 1 mSv/an pour une personne du public, par l'article R1333-8 du Code de la Santé Publique.

L'impact pour le scénario le plus pénalisant étudié (Résidence) est de 0,13 mSv/an. Ceci voudrait dire que l'ancienne zone de la STE a été excavée des 5 m de remblais propre (de 223 à 218 mNGF) pour créer une zone d'habitation sous 218 mNGF, ce qui n'est pas du tout réaliste, vu la présence naturelle de la nappe à ce niveau.

7.3. CONCLUSION

L'impact sanitaire initial des terres est très faible (8×10^{-6} mSv/an pour le Scénario réaliste d'usage Pêcheur) ou nul (pour les scénarios type IRSN sur zone remblayée).

Pour des scénarios des plus extrêmes et non réalistes, à 5 m de profondeur, ne considérant pas de remblaiement de la zone, les résultats des scénarios « types IRSN » varient de 0,004 et 0,055 mSv/an.

L'état initial des sols est compatible avec tous les usages étudiés (du plus réaliste au plus majorant). Aucune mesure de gestion n'est justifiée par la préservation des intérêts protégés par la Loi (Arrêté INB).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

8. OPTIMISATION DES MESURES DE GESTION

L'état initial des terres sous la STE est compatible avec tous les usages étudiés (du plus réaliste au plus majorant). Cependant, afin de mener un assainissement poussé en cohérence avec la doctrine ASN, EDF a réalisé une étude afin de définir les travaux d'excavation possible en fonction des contraintes de nappe. Il s'agit également d'optimiser les excavations en fonction de la répartition du marquage des terres pour réduire au maximum le terme source tout en prenant en compte les impacts sur les intérêts protégés (en particulier le volume de déchets TFA, les impacts CO₂) et la sécurité des travailleurs.

8.1. OPTIMISATION DES EXCAVATIONS VIS-A-VIS DU TERME SOURCE, DECHETS TFA ET IMPACTS

8.1.1. Options d'excavation des terres étudiés

Le diagnostic de la zone par sondages a montré que la majeure partie du terme source était contenue dans le radier puis dans les 50 premiers cm de terres sous-jacentes. Une deuxième zone légèrement plus marquée que la moyenne du volume, a été identifiée vers 3 m de profondeur (soit 8 m sous la surface naturelle). Par ailleurs la nappe oscille entre 213 et 216 mNGF.

Par conséquent il a été étudié comme possibles options d'excavation : soit de laisser les terres en place, soit de retirer les 50 premiers cm sur l'ensemble de la STE. Il a été étudié également d'excaver jusqu'à - 2 m (216 à 215 mNGF suivant les points bas du radier, risque de présence de la nappe) ou d'excaver jusqu'à - 4 m (214 à 213 mNGF, risque de présence de la nappe).

Deux surfaces avaient été retenues sur le plan, à l'issue du diagnostic (voir paragraphe 4.3.3 et Figure 16), pour cibler les volumes les plus marqués. Trois zones d'excavation ont donc été considérées dans l'étude d'optimisation :

- l'ensemble de la STE (en rayé sur la Figure 16 ; le décrochement Ouest (locaux 902, 903 et 904) est d'ores et déjà plus de 50 cm en dessous de la partie centrale du radier) ;
- la Zone 1 de ~ 273 m² = zone centrale sous la pièce principale 901, jusqu'au voile Sud (voir Figure 16) ;
- la Zone 2 de ~ 84 m² = sous toute la partie Ouest en décrochement du radier (locaux 902, 903 et 904).

A l'issue du retrait du radier, les options d'excavation des sols étudiés sont alors détaillées dans le Tableau 9, par profondeur d'excavation croissante, au regard des zones précédentes :

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Options d'excavation	Description	Justification
Situation initiale Sols : Terres en place	Terres laissées en place à l'issue du retrait du radier (aucune excavation)	Etude de l'impact des terres en place avant travaux en vue de l'optimisation des volumes excavés et déchets TFA produits
Option 1 : Retrait 0-50 cm	Excaver les premiers 50 cm de terres sous le radier de la STE (locaux 901 et 801 ; le décrochement Ouest (locaux 902, 903 et 904) est d'ores et déjà plus de 50 cm en dessous de la partie centrale du radier)	Couche la plus marquée suite aux conclusions du diagnostic (paragraphe 4.4).
Option 2 : Retrait Zone centrale (1) sur 2 m	<u>Option 1</u> (retrait 50cm) + Excavation de la <u>Zone centrale</u> (Zone 1) sur <u>2 m de profondeur</u>	Retrait des terres sous la zone d'infiltration principale (option intermédiaire entre situation initiale et option 4)
Option 3 : Retrait Zone étendue (1 + 2) sur 2 m	<u>Option 1</u> (retrait 50cm) + Excavation d'une <u>Zone étendue</u> (Zone 1 + Zone 2), sur <u>2 m de profondeur</u>	Retrait des terres sous la zone d'infiltration principale (Option 2) et <u>de la partie Ouest</u> (option intermédiaire entre situation initiale et option 5)
Option 4 : Retrait Zone centrale sur 4 m	<u>Option 1</u> (retrait 50cm) + Excavation de la <u>Zone centrale</u> (Zone 1) sur <u>4 m de profondeur</u>	Retrait de la couche marquée à 3m – 3m50 sous la zone d'infiltration principale
Option 5 : Retrait Zone étendue (1 + 2) sur 4 m	<u>Option 1</u> (retrait 50cm) + Excavation d'une <u>Zone étendue</u> (Zone 1 + Zone 2), sur <u>4 m de profondeur</u>	Retrait de la couche marquée à 3m – 3m50 sous la zone d'infiltration principale (Option 4) et <u>de l'extension Ouest</u>

Tableau 9 : Options optimisée d'excavation des sols

Nota : Pour les options optimisées 2 à 5, l'excavation des 50 premiers centimètres de terres est incluse en base.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

8.1.2. Termes source résiduels associés et volume de déchets TFA produits

Pour chaque option d'excavation, il a été étudié avec l'aide de la géostatistique, la diminution du terme source résiduel (pour les quatre radioéléments présents, avec mise à jour en 2015), les activités moyennes résiduelles en ¹³⁷Cs et ⁶⁰Co des couches de terres affleurantes, et les volumes de déchets TFA produits (non foisonnés).

Options d'excavation	Déchets TFA produits (non foisonnés) (m ³)	Terme source résiduel Sols MAJ mi-2015 (GBq)	Activités moyennes résiduelles de ¹³⁷ Cs MAJ mi-2015 (Bq/g)	Activités moyennes résiduelles de ⁶⁰ Co MAJ mi-2015 (Bq/g)
Situation initiale Sols : Terres en place	0	4,05	0,689	3,2 10 ⁻³
Op1 : Retrait 0-50 cm	250	3,35 (- 17%)	0,167	2,1 10 ⁻³
Op2 : Retrait Zone centrale (1) sur 2 m	660	3,07 (- 24 %)	0,208	1,7 10 ⁻³
Op3 : Retrait Zone étendue (1 + 2) sur 2 m	744	2,95 (- 27 %)	0,225	1,5 10 ⁻³
Op4 : Retrait Zone centrale sur 4 m	1206	2,07 (- 49%)	0,305	2,7 10 ⁻³
Op5 : Retrait Zone étendue (1 + 2) sur 4 m	1458	1,73 (- 57 %)	0,289	2,4 10 ⁻³

Tableau 10 : Terme source, déchets TFA et activité massiques résiduelles en fonction des options d'excavation

La production de déchets TFA croît très fortement en fonction des profondeurs excavées (+ 500 % entre 50 cm excavés et - 4m sur les zones (1+2)). Elle atteint alors 1458 m³ sachant que l'ensemble du volume exploré sous la STE par les sondages représente potentiellement 3400 m³.

Deux points d'inflexion sont observés pour la réduction du Terme source résiduel (voir Figure 21) : en excavant les 50 premiers cm de terres puis en envisageant des options de retrait à - 4 m de profondeur (car la seconde couche de terres légèrement plus marquée située à environ 3 m de profondeur est alors retirée).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

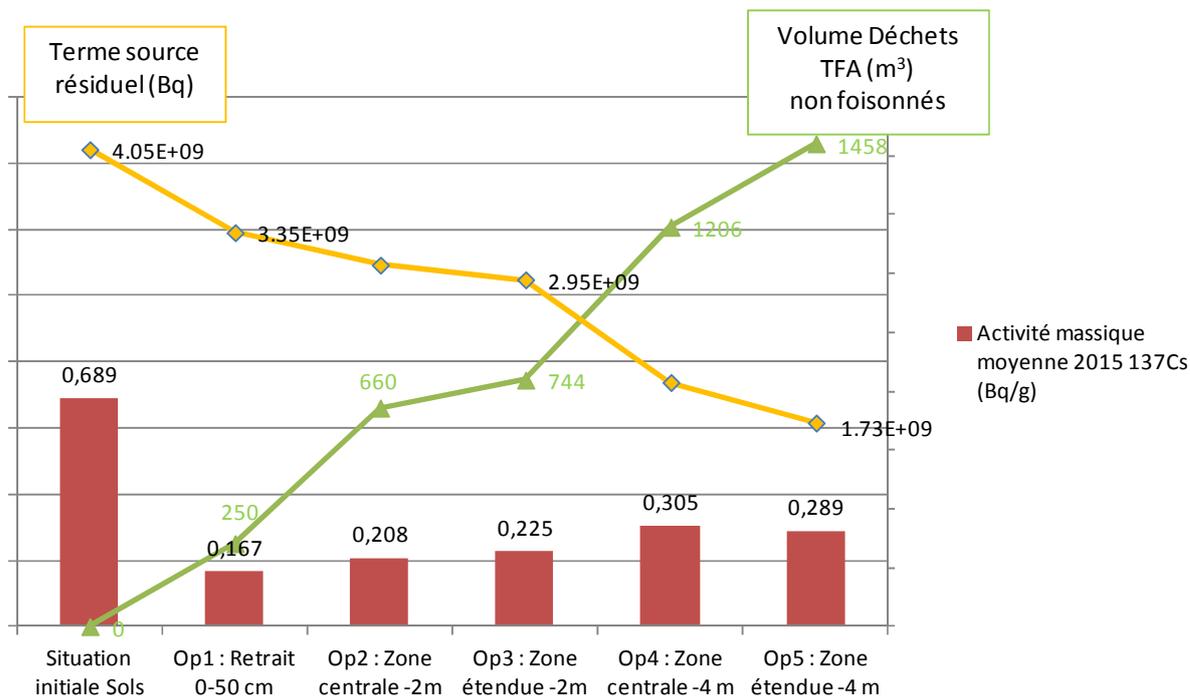


Figure 21 : Représentation du terme source, déchets TFA et activités massiques résiduelles en fonction des options d'excavation

En excavant les 50 premiers cm, le terme source Sols est abaissé de 17%.

Le terme source global résiduel des quatre radioéléments dans les sols est alors de 3,35 GBq, ce qui correspond à 15% du terme source initial Radier + sols (21,75 GBq).

En excavant les zones les plus marquées jusqu'à 4 m de profondeur, 8 % du terme source initial Radier + Sols serait toujours présent sous la STE malgré la production de 1458 m³ de déchets TFA. Il resterait ainsi 43 % du terme source initial Sols (1,73 GBq). Ceci est dû aux volumes importants de terres restant (environ 2 000 m³) associé à un marquage faible et diffus.

L'excavation des 50 premiers centimètres de terres permet d'abaisser l'activité massique résiduelle en ¹³⁷Cs dans les terres de 76%. Une fois cette couche excavée, l'activité moyenne résiduelle de la couche de terres affleurante suivante (par passe de 50 cm) est stable (autour de 0,25 Bq/g en ¹³⁷Cs) et peut même ré-augmenter légèrement en profondeur en raison de la répartition du marquage dans les terres.

En conclusion, il n'y a pas d'intérêt particulier à l'excavation en profondeur sur la réduction de l'activité moyenne résiduelle des terres restantes affleurantes, alors que le volume de déchets TFA augmente fortement.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

8.1.3. Impacts sanitaires résiduels

Les impacts sanitaires résiduels ont été calculés en considérant les 4 radioéléments présents, pour le scénario réaliste du site (scénario d'usage « pêcheur ») et pour des scénarios pénalisants « type IRSN » sur zone non remblayée à l'horizon 2032.

Options d'excavation	Scénario d'usage	Scénarios Type IRSN <u>Pour une zone non remblayée</u> (horizon 2032)								
		Impact en mSv/an								
	Pêcheur	Résidence	Bureau	Maraichage	Ecole	Parking	Friches	Chantier	Complexe sportif	Base de Loisirs
Situation initiale : Terres en place	8 x 10 ⁻⁶	0,13	0,027	0,11	0,031	0,004	0,016	0,055	0,025	0,027
Op1 : Retrait 0-50 cm	6 x 10 ⁻⁶	0,030	0,007	0,025	0,007	0,001	0,004	0,013	0,006	0,007
Op2 : Retrait Zone centrale sur 2 m	6 x 10 ⁻⁶	0,037	0,008	0,030	0,009	0,001	0,005	0,017	0,007	0,008
Op3 : Retrait Zone étendue sur 2 m	6 x 10 ⁻⁶	0,040	0,009	0,033	0,010	0,001	0,005	0,018	0,008	0,009
Op4 : Retrait Zone centrale sur 4 m	4 x 10 ⁻⁶	0,054	0,012	0,045	0,014	0,001	0,007	0,024	0,011	0,012
Op5 : Retrait Zone étendue sur 4 m	3 x 10 ⁻⁶	0,051	0,011	0,042	0,013	0,001	0,007	0,023	0,010	0,012

Tableau 11 : Impacts sanitaires en fonction des options d'excavation

Pour toutes les options d'excavation, l'impact du scénario réaliste d'usage « pêcheur » reste dans des gammes de valeurs extrêmement faibles (entre 3 et 8 x 10⁻⁶ mSv/an).

Pour les « scénarios Type » du Guide IRSN sur zone non remblayée, on constate, comme pour les activités massiques, une diminution des impacts suite au retrait de la première couche de 0-50 cm (- 76%), voir Figure 22. Les valeurs passent de 0,03 à 0,13 mSv/an pour le scénario le plus pénalisant « Résidence ».

Ensuite, selon les différentes options d'excavation, les impacts restent globalement constants ou augmentent légèrement (maximum 0,054 mSv/an pour le scénario Résidence) car les activités massiques résiduelles des couches affleurantes en profondeur sont parfois plus élevées que celles présentes en surface.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

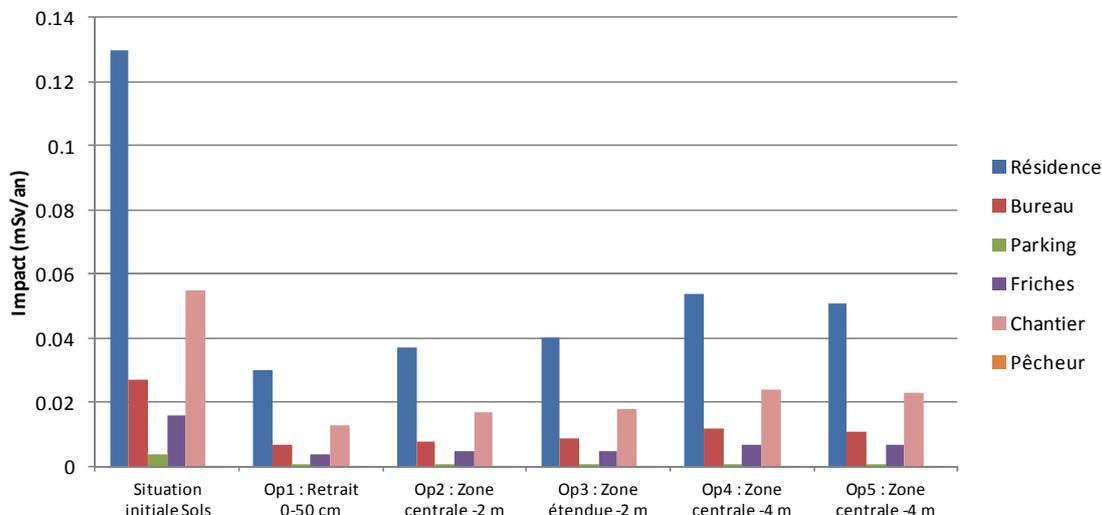


Figure 22 : Impacts sanitaires en fonction des options d'excavation (pour une zone non remblayée)

8.1.4. Synthèse

L'excavation des 50 premiers centimètres de terres permet d'abaisser le terme source Sol de 17%, l'activité massique résiduelle dans les terres de 76%, et par conséquent les impacts « type » IRSN. Leur valeur maximale se situe alors à 0,054 mSv/an (Scénario Résidence). Pour toutes les options d'excavation, l'impact du scénario d'usage « pêcheur » reste dans des gammes de valeurs extrêmement faibles (entre 3 et 8 x 10⁻⁶ mSv/an).

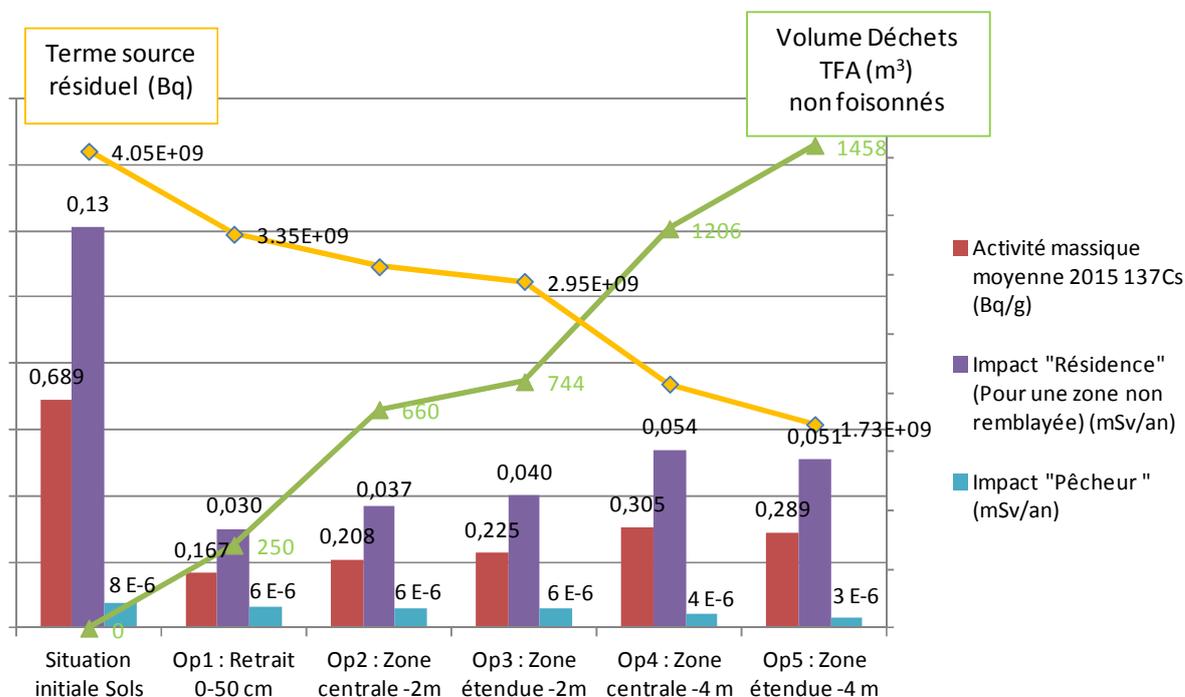


Figure 23 : Synthèse de l'optimisation des activités et impacts en fonction des options d'excavations

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B	Page 59/88

En excavant 50 cm, le terme source global résiduel des quatre radioéléments est de 3,35 GBq, ce qui correspond à 15% du terme source initial Radier + Sols, et 83% du terme source initial Sols. 48% du terme source résiduel Sols est dû au ³H et au ⁶³Ni, majorés forfaitairement.

Il n'y a pas d'intérêt particulier à une excavation plus en profondeur sur la réduction de l'activité moyenne résiduelle des terres restantes et les impacts associés.

On note par ailleurs une forte augmentation du volume de déchets TFA produits en fonction des profondeurs excavées.

Les options d'excavation à - 2 ou - 4 m ne sont pas réalisables en raison de la présence potentielle de la nappe.

En conclusion, l'excavation des 50 premiers centimètres de terres sous le radier présente un gain significatif dans l'optimisation de la réduction du terme source et des impacts sanitaires, contrairement à des options d'excavation plus profondes. Elle est par ailleurs techniquement réalisable.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

8.2. OPTIMISATION « REDUCTION DU TERME SOURCE/COUTS »

L'optimisation des mesures de gestion des terres sous la STE a aussi intégré l'optimisation des coûts (qui traduisent ici la production de déchets TFA donc l'impact environnemental) versus la réduction du terme source global des terres. Un profil de coûts affiné selon différentes options d'excavation a été fourni par une société de terrassement (par parois clouées ou par talutage, pour différentes profondeurs jusqu'à - 5 m).

Les options retenues (voir Tableau 9) pour l'étude de cet impact ont découlé des précédentes analyses réunies. Elles concernent :

- l'emprise totale de la STE : l'option 1 consiste à excaver les 50 premiers centimètres de l'ensemble de la zone STE. Une excavation de l'ensemble de cette zone, sur 2 ou 4 m de profondeur, a également été étudiée ;
- la zone 1 (voir Figure 16) : les options 2 et 4 correspondent à une excavation de la zone centrale sur 2 et 4 m de profondeur respectivement ;
- la zone 1 et la zone 2 (voir Figure 16) : les options 3 et 5 correspondent à une excavation de la zone centrale et de la zone de décrochement située à l'Ouest sur 2 et 4 m de profondeur respectivement.

Nota : pour les options 2 à 5, l'excavation des 50 premiers centimètres de terres sur toute la surface de la STE est incluse en base. Ces options ne prennent pas en compte la présence de la nappe.

L'analyse coût-bénéfice s'est alors focalisée sur la minimisation d'une fonction-objectif simple, combinant la réduction de l'empreinte radiologique et la maîtrise des montants financiers correspondants (chaque partie ayant un poids de 50 %). Différentes études de sensibilité ont été menées sur le niveau d'activité, le niveau de risque (probabilité de dépassement), la répartition entre les deux contributions de la fonction-objectif, le profil de coûts en fonction de la profondeur et la prise en compte des volumes d'accessibilité. Les résultats des calculs d'efficacité des options d'excavation en terme d'optimisation / réduction du terme source/coûts sont les suivants :

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Options d'excavation	Paroi talutée	Paroi clouée
Op1 : Retrait 0-50 cm	6 779	-
Emprise totale 2 m	1 209	1 225
Emprise totale 4 m	152	133
Op2 : Retrait Zone centrale (1) sur 2 m	3 374	-
Op3 : Retrait Zone étendue (1 + 2) sur 2 m	2 564	2 685
Op4 : Retrait Zone centrale (1) sur 4 m	1 566	-
Op5 : Retrait Zone étendue (1 + 2) sur 4 m	991	783

Tableau 12 : Efficacité des différentes options d'excavation (en MBq/M€)

(Activité totale actualisée à mi-2015)

L'option la plus efficace est le retrait des 50 premiers centimètres de terres sous le radier. En effet, cette couche concentre une partie de la radioactivité.

La mise en place d'une paroi clouée jusqu'à 4 m de profondeur pénalise légèrement l'efficacité d'un scénario profond en raison d'un coût plus important. Le retrait en profondeur sur la totalité de l'emprise de la STE pénalise également l'efficacité en raison d'une moins bonne sélectivité des zones contribuant le plus au terme source.

8.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES DIFFERENTS SCENARIOS D'EXCAVATION

L'estimation a été faite de l'impact des gaz à effet de serre (GES) des options d'excavation en se focalisant sur la partie transport des déchets TFA potentiellement produits. Les paramètres retenus sont présentés dans le tableau suivant :

Type	Impact / Quantités
Chargement moyen d'un camion	15 tonnes
Taux d'utilisation du moyen de transport (en charge et à vide)	50%
Distance au centre de stockage (Soulaines – Aube)	730 km
Facteur d'émission en CO _{2e} du transport ¹²	0,175 kg CO _{2e} ¹³ /tonne.km

Tableau 13 : Paramètres utilisés pour le calcul d'émission de CO_{2e} dû au transport de déchets

¹² Facteur d'émission : adapté du chiffre 0,105 kg CO_{2e}/tonne.km (Base carbone de l'ADEME) pour « Fret routier, poids lourds, ensemble articulé, 40 t, camion remorque grand volume 40 t, carburant et amortissement de la fabrication du véhicule », avec une charge véhicule de 15 t au lieu de 25.

¹³ CO_{2e} ou équivalent CO₂ : afin d'être comparées les unes avec les autres, les émissions des différents GES peuvent être exprimées en CO_{2e} (calculées par équivalence avec une quantité de CO₂ qui aurait le même potentiel de réchauffement global).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Les résultats des estimations de l'impact carbone sont les suivants :

Options d'excavation	Déchets TFA (non foisonnés) (m ³)	Déchets TFA (tonnes)	GES produit (tonnes de CO _{2e})	Equivalent carbone (tonnes éq C)
Situation initiale Sols : Terres en place	0	0	0	0
Op1 : Retrait 0-50 cm	250	586	75	20
Op2 : Retrait Zone centrale sur 2 m	660	1 544	197	54
Op3 : Retrait Zone étendue sur 2 m	744	1 741	222	61
Op4 : Retrait Zone centrale sur 4 m	1 206	2 822	361	98
Op5 : Retrait Zone étendue sur 4 m	1 458	3 412	436	119

Tableau 14 : Résultats des calculs d'impact CO_{2e} du transport de déchets

(d = 1,8, coefficient de foisonnement = 1,3)

Suivant les options d'excavation retenues, le chantier d'assainissement entrainerait la production de 600 à environ 3 500 tonnes de déchets TFA. Ces déchets seraient transportés par camion au centre de stockage TFA de l'ANDRA (CIRES). De 39 camions (Op1 : retrait 0-50 cm) à 227 camions (Op5 : retrait zone étendue sur 4 m) seraient nécessaires. Outre l'augmentation du trafic routier, ceci produirait un impact CO_{2e} estimé de 75 à 436 tonnes de CO_{2e}, soit environ **20 à 119 tonnes d'équivalent carbone**.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

9. PROPOSITION DE GESTION

Le marquage des terres situées sous le radier de la STE de Brennilis est faible et diffus.

La mise en œuvre de la démarche de référence de l'ASN (retrait de tout marquage) pose d'importantes difficultés techniques et sécuritaires. Elle entraînerait par ailleurs la production massive de déchets TFA pour des terres souvent non marquées, ce qui est contraire aux recommandations du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR).

L'étude des éléments d'aide à la décision pour le plan de gestion de ces sols a consisté tout d'abord en une analyse de la compatibilité des sols avec tout usage. Les résultats ont montré que **l'état actuel du sol était compatible, quels que soient les usages étudiés**. L'impact sanitaire du scénario réaliste d'usage « Pêcheur » pour le site de Brennilis est de 8×10^{-6} mSv/an.

Pour déterminer l'assainissement le plus pertinent et efficace, EDF a intégré une approche d'optimisation, en prenant en compte la réduction du terme source, les contraintes techniques (nappe, géologie, talutage), les intérêts protégés (volumes de déchets TFA produits, impacts sanitaires résiduels, impact CO₂, trafic routier) et la sécurité des travailleurs. La présence de la nappe à 1 m ou 2 m sous le radier reste l'élément de contrainte principale pour les travaux.

L'analyse de la répartition du terme source par couche et par rapport à trois surfaces d'intérêt (totalité de l'emprise de la STE, zone centrale, décrochement Ouest) a permis de mettre en place différentes options d'excavation.

Les principaux résultats des études ont été :

- le retrait des 50 premiers centimètres de terres sous le radier présente un avantage marqué sur la réduction des activités massiques moyennes et sur l'impact sanitaire résiduel des « scénarios type » du Guide IRSN. Il présente également un avantage d'efficacité dans la diminution du terme source global,
- quelles que soient les options d'excavation retenues, l'impact du scénario d'usage « Pêcheur » reste dans les gammes du négligeable ($< 8 \times 10^{-6}$ mSv/an),
- excaver des volumes de terres au-delà de 50 cm n'entraîne pas de gain sur les impacts sanitaires alors que les volumes de déchets TFA produits augmentent de manière très significative ainsi que les impacts CO₂ associés.

L'assainissement poussé retenu est donc l'excavation des 50 premiers centimètres de terres présentes sous le radier, car elle est techniquement réalisable (présence de la nappe). Par ailleurs elle représente un gain dans l'optimisation de la réduction du terme source et des impacts sanitaires, contrairement à des options d'excavation plus profondes. Cette mesure est également une mesure raisonnable en termes d'impact environnemental (volume de déchets TFA produit, impact CO₂ du transport) et de risques pour les intervenants.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

10. GESTION DU CHANTIER

La présence de la nappe sera un facteur limitant incontournable lors des travaux. Ceux-ci ne pourront avoir lieu si la nappe venait exceptionnellement à dépasser le niveau de 216 mNGF ou à mettre en danger la sécurité des intervenants (tenue des parois, stabilité des engins d'excavation...).

10.1. MODALITES DE SUIVI DES TRAVAUX

La surveillance des prestataires garantit que la conformité aux exigences définies, notamment celles concernant la technique, la qualité, la sûreté, la sécurité radioprotection, l'environnement et les déchets, est mise en œuvre au travers de procédures adaptées.

Parmi les exigences générales de qualité et de sécurité « classiques », des exigences particulières concernant la radioprotection, la gestion des déchets (conventionnels et radiologiques), la propreté radiologique, l'environnement et la qualité sont prises en compte. Ces exigences concernent notamment :

- l'emploi de personnel DATR et habilité RP pour l'excavation des terres et pour la gestion et le conditionnement des déchets nucléaires associés,
- la mise en place de contrôles réguliers de contamination surfaciques (débits de dose) des engins et des surfaces excavées et à excaver,
- la mise en place de dispositions pour empêcher toute dissémination de contamination depuis les zones marquées vers les zones propres,
- la mise en place de dispositions pour la protection de tous les piézomètres et puits existants.

10.2. FILIERES DE GESTION DES TERRES EXCAVEES

Comme expliqué précédemment, les terres issues des zones à déchets nucléaires (la zone qui sera excavée sera identifiée en zone à production possible de déchets nucléaires (ZppDN) de manière temporaire) seront gérées en filière nucléaire. Elles seront envoyées au CIREs en tant que déchets très faiblement actifs (TFA). Les déchets respecteront donc les spécifications ANDRA correspondantes.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

10.3. ETAT FINAL DE LA ZONE

L'état final visé de la zone d'étude est le suivant :

- les zones de marquage des terres sont traitées tel que prévu au Plan de gestion,
- la zone qui a été traitée est délimitée en profondeur par une frontière visuelle (remblais de couleur, geogrille...),
- l'ensemble des déchets nucléaires produits est conditionné sur le chantier et évacués du site ou entreposé dans des zones dédiées de l'INB en attente d'évacuation,
- la zone est remblayée par 5 m de remblais propre.
- par la suite le rabattement de nappe est arrêté. Ceci fait l'objet d'un dossier de demande spécifique à l'ASN, dossier dans lequel sont précisées les modalités de surveillance des eaux souterraines¹⁴.

10.4. MEMOIRE DE L'OPERATION

La documentation d'exploitation nécessaire au maintien de l'historique est conservée et archivée par EDF suivant un classement défini sur un support conforme aux normes en vigueur. L'accessibilité à ces données repose sur une organisation qui prend en compte le besoin de restitution documentaire à long terme.

La mémoire des opérations réalisées sur la zone STE et sur le marquage résiduel des terres est conservée pour les futurs usagers potentiels du site lors de sa libération.

Les servitudes d'utilité publiques seront proposées par l'exploitant pour validation par l'ASN lors du déclassement final de l'INB, conformément à l'article 40 du Décret 2007-1557 du 2 novembre 2007 dit « Décret Procédures ».

¹⁴ L'absence de migration de la contamination sera surveillée via le suivi de la qualité de la nappe. La surveillance de la nappe actuellement réalisée au niveau de la STE en application de la Décision n°2011-DC-240 de l'ASN du 1^{er} septembre 2011 consiste en une surveillance physico-chimique et radiologique hebdomadaire, complétée par une surveillance radiologique mensuelle par spectrométrie gamma.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

11. VERIFICATION DE L'ATTEINTE DES OBJECTIFS

Ce chapitre détaille les critères de vérifications, associés à l'atteinte des objectifs de réhabilitation, proposés par EDF.

11.1. VERIFICATION DE LA MESURE DE GESTION OPEREE

Conformément à la démarche d'assainissement poussé définie dans ce plan de gestion des terres, l'excavation des 50 premiers centimètres de terres sera mise en œuvre par des engins de terrassement.

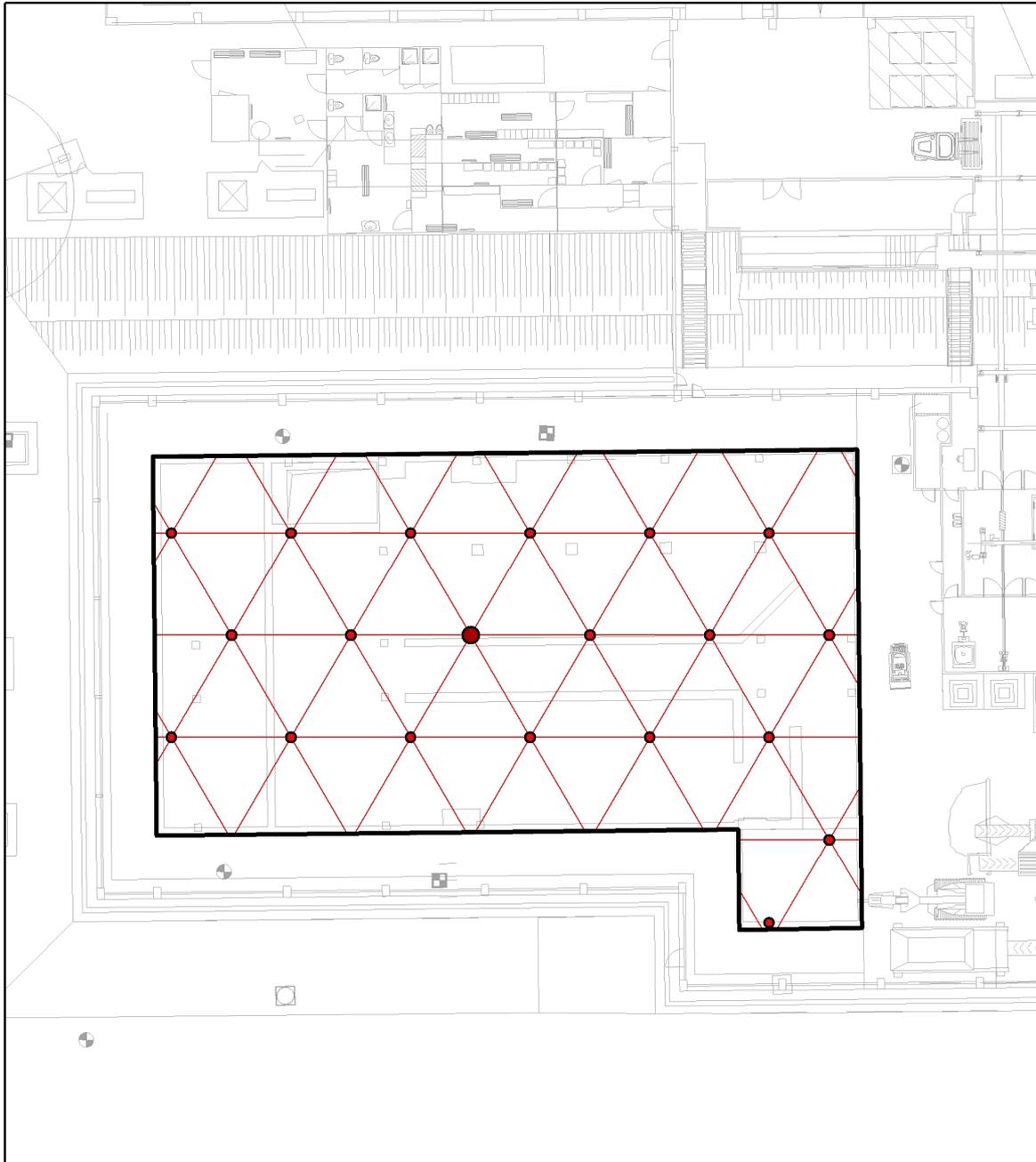
Des relevés par un géomètre expert après retrait des 50 cm de terres permettront de vérifier l'atteinte de la cote 217,5 mNGF en fonds de fouille.

11.2. VERIFICATION DE LA COHERENCE AVEC L'ESTIMATION ISSUE DE L'ETUDE GEOSTATISTIQUE

A l'issue du retrait de 50 cm de terres sous le radier des contrôles finaux seront réalisés. L'objectif de ces contrôles finaux est de vérifier la cohérence du diagnostic avec les observations en fin de travaux d'assainissement, et ainsi confirmer la robustesse de l'étude présentée dans le plan de gestion des terres situées sous la STE.

Sur la base de la déclinaison de la méthode MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) élaborée par les 4 agences fédérales américaines (EPA, DOE, NRC et DOD), 20 contrôles finaux sont proposés. Ceux-ci seront réalisés selon la méthode de contrôle (ex : spectrométrie gamma *in situ* ou en laboratoire) la plus représentative en fonction des conditions locales, suivant un maillage triangulaire (échantillonnage non biaisé, distance inter-points : 6,6 m), construit à partir d'un point de départ aléatoire (voir Figure 24). Cette méthode garantit la possibilité d'un traitement statistique et géostatistique représentatif des résultats.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B



<p>Maillage MARSIMM</p> <ul style="list-style-type: none">● Point zone étude (calculé)● Point 0 (aléatoire)▭ Emprise STE▭ Maillage triangulaire	
	 <p>Emetteur: DIPDE/DEED/CIN/IN-BEI Reproduction Interdite © 2017</p>

Figure 24 : Exemple d'emplacement des 20 contrôles finaux en fond de fouille

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

Pour ces 20 contrôles finaux, les substances suivantes seront recherchées :

- pour l'ensemble (20) des contrôles finaux : ^{137}Cs ¹⁵

On vérifiera que l'activité massique moyenne¹⁶ en ^{137}Cs des 20 contrôles finaux en fond de fouille après excavation, est bien conforme à celle prévue initialement par la géostatistique sur la base du diagnostic, soit 0,17 Bq/g comprise entre 0,05 et 0,48 Bq/g (niveau de confiance de 90%¹⁷).

Si la moyenne des mesures en fond de fouille n'était pas dans l'ordre de grandeur de la fourchette annoncée (soit moyenne > 0,5 Bq/g ^{137}Cs), EDF se réinterrogera sur la cohérence des valeurs obtenues et étudiera la nécessité de réaliser de nouvelles investigations.

Dans la démarche d'optimisation proposée, il n'y a pas de gestion des points chauds particulière car il n'y a pas d'objectif d'assainissement en Bq/g après l'excavation des 50 cm de terres. En effet, il ne s'agit pas d'un assainissement complet.

A l'occasion de la réalisation des contrôles finaux, si une mesure en fond de fouille venait à dépasser en spectrométrie gamma rapide 2 fois le haut de la fourchette prévue pour la moyenne des activités en ^{137}Cs (i.e. 1 Bq/g en ^{137}Cs), il sera procédé, par des moyens simples de chantier, au retrait localisé de la terre autour du point de prélèvement.

- pour 5 des contrôles finaux :
 - ^{60}Co , ^3H (libre et lié) et ^{63}Ni
 - Le spectre retenu pourra ainsi être vérifié.
 - HCT, HAP, BTEX, COHV, PCB, ETM

La propreté chimique des terres sous la STE pourra ainsi être vérifiée.

Les limites de détections (LD) et de quantification (LQ) seront proportionnées à l'objectif et aux enjeux de ces contrôles finaux.

¹⁵ Le ^{137}Cs est le traceur principal de marquage et a permis de piloter les études (nombreuses mesures ayant permis le traitement géostatistique). Pour le ^{60}Co en fond de fouille, la moyenne estimée par la géostatistique est de 0,002 Bq/g, comprise entre 0,001 et 0,004 Bq/g avec un niveau de confiance de 90%. Cette valeur est très proche des limites de détection (entre 0,001 et 0,003 Bq/g). Par ailleurs les incertitudes de mesures sont importantes sur les valeurs les plus basses mesurées, de l'ordre de 25 à 50%. C'est pourquoi seul le ^{137}Cs est retenu pour la vérification de la cohérence avec l'estimation issue de l'étude.

¹⁶ L'utilisation d'une moyenne est plus représentative que les activités maximales des « points chauds » : en effet dans les études d'impact, avec scénarios d'usage type IRSN, on raisonne avec des activités moyennes de la zone complète et non sur les valeurs maximales, car les cibles évoluent sur toute la zone.

¹⁷ Avec ce niveau de risque, la valeur moyenne mesurée a 5% de probabilité d'être en-dessous de 0,05 Bq/g, et 5% de probabilité d'être au-dessus de 0,48 Bq/g.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

11.3. CARTOGRAPHIE DE LA DOSE EFFICACE EN FOND DE FOUILLE

A la fin des excavations de terre, une mesure de débit de dose¹⁸ ambiant sera réalisée à bout de bras (~ 70 cm de hauteur) en fond de fouille sur toute la surface de la STE afin de disposer de la cartographie de l'état final de la zone.

11.4. SYNTHÈSE DES CONTRÔLES FINAUX

Le tableau suivant récapitule les objectifs de réhabilitation proposés, leur déclinaison et les critères de vérification.

Objectifs de réhabilitation	Déclinaison	Vérification
Mesure de gestion opérée	Excavation des 50 premiers cm de terres sur toute la surface de la STE	Relevé dimensionnel par un géomètre expert : atteinte de la cote 217,5 mNGF
Cohérences avec les hypothèses et les résultats de l'étude	Vérification de la moyenne des activités massiques en ¹³⁷ Cs en fonds de fouille	Moyenne des activités mesurées en ¹³⁷ Cs (20 contrôles finaux) comprise dans la gamme 0,05 Bq/g à 0,5 Bq/g
	Vérification du spectre retenu	Recherche des radioéléments du spectre retenu sur 5 des 20 contrôles finaux (⁶⁰ Co, ³ H (libre et lié) et ⁶³ Ni)
	Vérification de la propreté chimique	Recherche de substances chimiques sur 5 des 20 contrôles finaux (HCT, HAP, BTEX, COHV, PCB, ETM)
Etat final après excavation	Cartographie de la dose efficace	Mesure de débit de dose à bout de bras en fond de fouille

Tableau 15 : Synthèse des contrôles finaux

¹⁸ A noter que les mesures obtenues ne sont pas directement comparables aux valeurs des scénarios IRSN présentées au paragraphe 7.2. En effet, ces scénarios tiennent compte de l'exposition uniquement aux 4 radioéléments de l'étude (non prise en compte des radioéléments présents naturellement dans les sols) et prévoient des temps d'expositions non continu aux terres à nue ainsi que d'autres voies d'expositions (inhalation, interne par ingestion, ...).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

12. CONCLUSION

Les caractérisations sous la STE ont montré :

- la prépondérance du terme source du radier qui représente 80% du terme source global (radier+sols),
- un marquage des terres de faible activité (médiane de 0,026 Bq/g en ¹³⁷Cs) et diffus sur 5 m de profondeur : deux zones se démarquant légèrement :
 - une couche de 0/50 cm située immédiatement sous le radier (moyenne estimée à 0,69 Bq/g en ¹³⁷Cs),
 - une couche à environ 3 m / 3 m 50 de profondeur (moyenne estimée à 0,58 Bq/g en ¹³⁷Cs).

Les terres présentes sous la STE pourraient être potentiellement marquées, même très faiblement, jusqu'au granite sain, ce qui représenterait un volume théorique d'excavation de 8 000 à 12 000 m³ dont une grande partie n'étant que des terres d'accessibilité aux couches les plus marquées. Pour autant, réglementairement la totalité de ces volumes seraient évacués en déchets TFA. Par ailleurs, cette démarche de référence d'excavation totale n'est pas réalisable car le rabattement de la nappe déjà mis en place sous la STE ne permet pas d'abaisser celle-ci à plus de 2 m sous la base du radier actuel. Ainsi, pour la gestion de ces terres il convient de réaliser un assainissement poussé et optimisé pour prendre en compte les intérêts protégés. On note enfin, que l'impact sanitaire des terres en place, même en l'absence de toute excavation après retrait du radier, est compatible avec tous les usages étudiés (8 x 10⁻⁶ mSv/an pour le scénario d'usage réaliste du site).

Les études d'optimisation de l'assainissement des sols par retrait d'un volume de terre de plus en plus important, montre un gain significatif sur l'activité massique résiduelle pour une excavation des premiers 50 cm. Le retrait massif de 2 ou 4 m de terres supplémentaires ne met pas en évidence de gains supplémentaires en termes d'impact ou d'activité massique résiduelle, alors que les volumes de déchets TFA produits et les coûts augmentent proportionnellement au volume excavé. Les options d'excavation à - 2 ou - 4 m ne sont pas réalisables en raison de la présence de la nappe.

La mesure de gestion retenue est, outre le retrait du radier, l'excavation des 50 premiers cm de terres qui concentrent une partie du terme source. Ainsi, à la fin de la mise en œuvre de ce plan de gestion, c'est plus de 83% du terme source initial (radier + sols) qui aura été retiré.

A l'issue des travaux de retrait du radier puis des terres, des contrôles seront réalisés sur les terres naturelles en fonds de fouille afin (1) de vérifier l'atteinte *a minima* de la profondeur d'excavation cible (cote 217,5 mNGF), (2) de s'assurer de la cohérence des observations avec les éléments du diagnostic initial et de l'étude présentée et (3) de tracer l'état final de la surface des terres en fin de chantier.

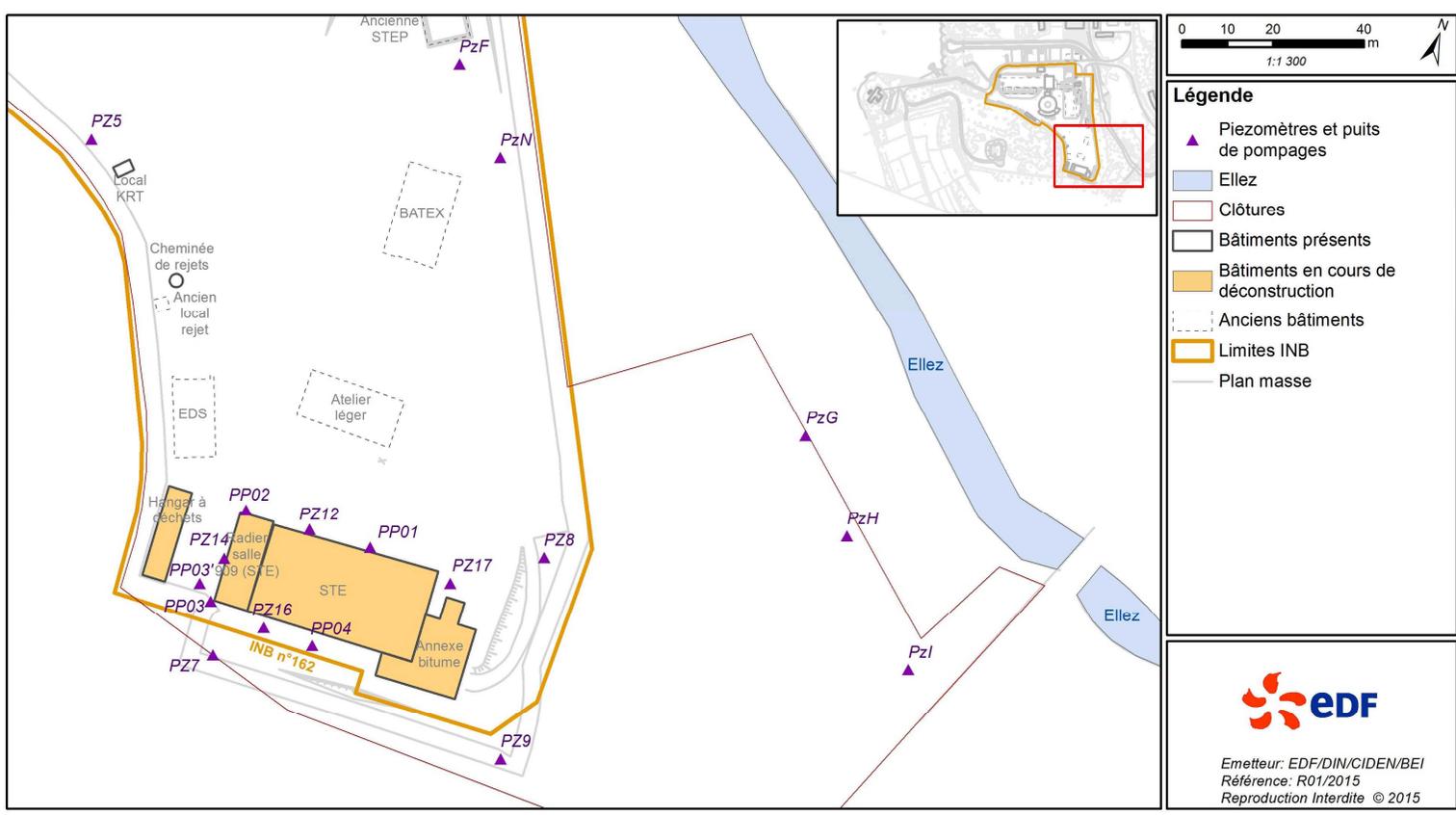
	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B	Page 71/88

ANNEXES

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

**ANNEXE 1 : LOCALISATION DES PIEZOMETRES ET PUIXS DE POMPAGE A PROXIMITE DE LA
 STE**



Ce document contient des informations sensibles relevant du secret et juridiquement protégées. Il est réservé à l'usage exclusif des personnes désignées comme destinataires du document et/ou autorisées à y accéder. Il est illégal de photocopier, distribuer, divulguer, ou d'utiliser de toute autre manière les informations contenues dans ce document sans accord du service émetteur.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

ANNEXE 2 : LA GEOSTATISTIQUE

La géostatistique a pour objet l'étude de tout phénomène quantitatif se développant de façon structurée dans l'espace et/ou le temps. Cet outil, historiquement développé en vue de l'estimation de réserves minières, est ensuite utilisé pour l'estimation de nombreux gisements, où son efficacité est démontrée. Dès les années 80, les champs d'application ne cessent de s'étendre à de nombreux domaines industriels : exploration pétrolière, hydrogéologie et risque environnemental en particulier lié aux sites pollués.

Dans le contexte des sites et sols pollués, la géostatistique permet d'optimiser les échantillonnages, d'améliorer les cartographies de contaminations, d'estimer la probabilité de dépassement de critères et d'évaluer des volumes de déchets ou matériaux contaminés tout en quantifiant les incertitudes associées.

Le traitement géostatistique s'appuie sur plusieurs étapes d'exploration et de traitement des données (les mesures de la variable à étudier doivent être localisées dans un repère spatial (x, y, z)) :

1/ Analyse exploratoire des données

Cette première analyse permet d'obtenir des informations primordiales, concernant notamment :

- la robustesse des données d'entrée ;
- la localisation des zones de forte et de faible activité ;
- les informations purement statistiques : activité moyenne ou médiane, dispersion autour de cette tendance centrale, quantiles, etc.
- le pourcentage de valeurs supérieures à un seuil d'intérêt.

2/ Analyse de la structure spatiale des données

L'intérêt premier de la méthodologie géostatistique repose sur la prise en compte de la continuité spatiale du phénomène lors de sa prédiction en des points n'ayant pas fait l'objet de mesures. En tout premier lieu, cette continuité spatiale est évaluée expérimentalement à partir des données disponibles (en présence d'un phénomène structuré, la variabilité spatiale augmente avec la distance jusqu'à une distance maximale où cette variabilité se stabilise). Cette variabilité spatiale est alors modélisée en fonction de la distance.

A noter, que pour une même distribution statistique, différentes structures spatiales sont possibles (voir Figure 25). L'analyse de la structure spatiale des données menée en géostatistique permet de mettre en évidence la structure spatiale ou non du phénomène.

Dans un premier temps, il s'agit donc de s'assurer que le phénomène que l'on observe a en effet une répartition dans l'espace structurée (et non une répartition aléatoire). Pour cela, on réalise un variogramme qui représente sur un graphique la variabilité d'une observation à l'autre en fonction de leur éloignement dans l'espace. C'est la physionomie du variogramme qui permet de conclure.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

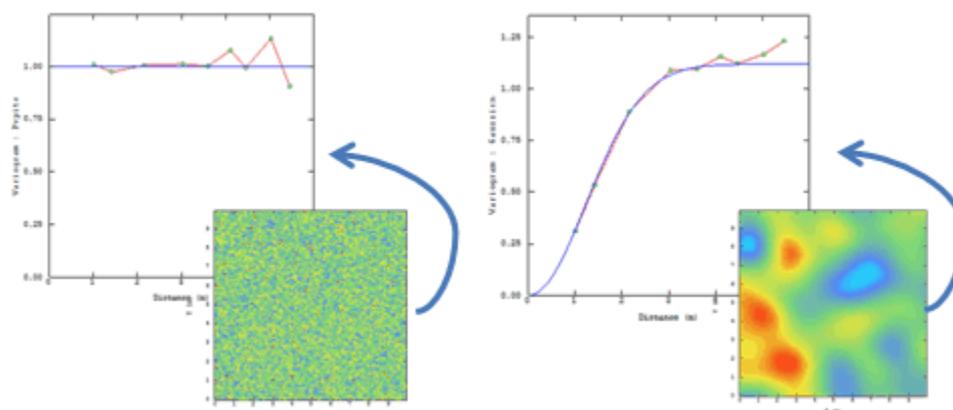


Figure 25 : Exemple de 2 structures spatiales différentes pour une même distribution statistique

Dans l'exemple de droite (voir Figure 25), à partir des points de mesures (points verts et tracé en rouge), une courbe continue (tracé bleu) peut être ajustée et elle est ensuite utilisée pour reconstituer les valeurs estimées en tous points de l'espace. A gauche : phénomène qui a des conséquences tout à fait aléatoires dans l'espace : ici le « géo » des géostatistiques n'apporte rien, à droite phénomène qui s'exprime avec des relations dans l'espace entre points voisins.

L'existence d'une structuration spatiale doit être prise en compte et rend inadéquates les approches statistiques classiques, qui supposent l'indépendance entre les activités mesurées au sein de la zone d'étude.

3/ Interpolation des données

L'estimation de l'activité massique ou surfacique est obtenue à partir des mesures de l'étape 1/ et du modèle de variabilité spatiale déterminé en étape 2/. On obtient alors une représentation de la distribution spatiale de la contamination en tenant compte des données et de la structure spatiale modélisée. Celle-ci ne tient pas compte de l'incertitude d'estimation qui lui est associée.

4/ Analyse de risque

Un avantage essentiel des techniques d'estimation géostatistique par rapport aux interpolateurs classiques réside dans la quantification de l'incertitude associée à l'estimation, incertitude qui existe toujours et est inéluctable. Cette quantification est rendue possible par la modélisation de la structure spatiale.

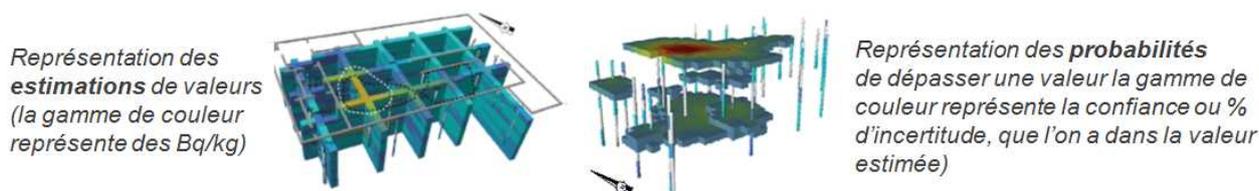


Figure 26 : Exemple de répartition des estimations et incertitudes dans une étude géostatistique

Ainsi, la géostatistique est un outil efficace et pertinent pour élaborer des cartographies lorsque les phénomènes observés sont structurés dans l'espace, ce qui est le cas dans le cadre du marquage des terres sous la STE (les substances ont migré dans les bétons puis les sols, après déversements accidentels).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

ANNEXE 3 : DESCRIPTION DES PARAMETRES POUR L'ETUDE D'IMPACT DU SCENARIO D'USAGE PECHEUR

LOGICIEL EDF ARGUS V3.5

Paramètres liés à la nappe

	Quantité	Unité	Commentaire
Perméabilité horizontale	1 x10 ⁻³	m/s	Majorant, correspond aux remblais
Porosité efficace	0,15	sans unité	
Dispersivité longitudinale	3	m	
Gradient hydraulique	0,01	sans unité	
Masse volumique des matériaux sous-jacents	1 800	Kg/m ³	Correspond à la densité retenue dans le calcul geostatistique sous la STE

Paramètres liés à la Rivière Ellez

Paramètre	Quantité	Commentaire
Débit Ellez à l'étiage	0,87 m ³ /s	
Largeur rivière	5 m	
Profondeur rivière	1 m	
Distance de bon mélange	0,1 m	
Flux de sédimentation	0	
Distance à l'exutoire	1 m	
Kd rivière	0	on ne considère pas ici les équilibres qui pourraient se faire entre l'eau et les Matières en suspension, ceci est pris en charge ensuite par BLIQID

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

LOGICIEL EDF BLIQID

Données

Le code Bliqid prend en compte dans son calcul les radioéléments fils.

Présentation de l'étude

Titre : **Adulte Pêcheur calcul normé pour obtenir 1 Bq/L en rivière données CIBLEX**

Nom de la centrale : **Brennilis**

Type de rejet : **Rivière**

Liste des isotopes

	<i>Constante de décroissance radioactive (an⁻¹)</i>
H3	0.0561
CO60	0.131
CS137	0.0231
NI63	0.00722

Activité rejetée annuellement (CALCUL NORME pour obtenir 1 Bq/L en rivière)

	<i>Activité (Bq/an)</i>
H3	2.74E+10
CO60	2.74E+10
CS137	2.74E+10
NI63	2.74E+10

Données générales

Débit de la rivière : **0.87 m³/s**

Débit de la rivière en période d'irrigation : **0.87 m³/s**

Type de rejet : **en clarinette**

Distance de bon mélange : **0.0001 km** (*nota : 1 m ou 10 cm donne le même résultat*)

Pluviométrie : **1629 mm/an**

Concentration en carbone stable :

- sous forme organique dissoute : **0 kg/l**
- sous forme minérale dissoute : **3E-05 kg/l**

Temps de séjour des sédiments : **1 an**

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

	<i>Coefficient de partage (l/kg)</i>
H3	0.03
CO60	43000
CS137	9500
NI63	10000

(nota : Co et Cs mis à jour avec AIEA TRS 472 tableau 53 - Le ³H et le ⁶³Ni sont négligés ensuite dans l'exposition externe aux sédiments donc non mis à jour ici)

Flux apparent de sédimentation : **2 kg/m².an**

Densité apparente du sol en place : **1600 kg/m³**

Tritium

	<i>Poisson</i>
<i>Teneur en eau kg d'eau/kg de frais</i>	0.75
<i>Coefficient de fixation du tritium sur la matière organique (s.d.)</i>	0.64

Facteurs de concentration du poisson (Bq/kg de poisson)/(Bq/l)

	<i>Fcp</i>
CO60	400
CS137	3000
NI63	71

(Nota : nous retenons les valeurs relatives aux « muscles » et non « corps entier » dans le tableau AIEA TRS 472)

Alimentation de l'Homme

Choix des aliments

	<i>Consommation humaine annuelle (kg/an)</i>	<i>Durée de consommation du produit frais (mois)</i>	<i>Durée moyenne de stockage (mois)</i>
<i>Poisson</i>	15.5	12	0

(nota : la ration est issue de l'enquête CIBLEX INCA 99 pour un adulte 17-60 ans)

Taux d'autoconsommation : **1 [s.d.]**

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

Voies d'exposition

Exposition interne par ingestion :

- Distance à laquelle les poissons sont pêchés : **0.05 km**

(nota : ce paramètre est peu sensible, par exemple si l'on se rapproche de la berge en prenant 1 m au lieu de 5 les résultats sont inchangés.)

Exposition externe aux sédiments :

- Distance à laquelle l'individu est présent sur les rives (pêche) : **0.05 km**
- Temps de présence sur les berges : **200 h/an**

Facteurs de dose et constantes de décroissance

Facteurs de dose

	<i>Facteur de dose efficace due à l'ingestion Sv/Bq</i>	<i>Facteur de dose efficace due à une exposition externe à une surface contaminée (Sv/h)/(Bq/m²)</i>
H3		0
CO60	3.40E-09	8.46E-12
CS137	1.30E-08	2.00E-12
NI63	1.50E-10	0

(Nota : le facteur de dose efficace d'exposition externe à une surface contaminée est issu de la base ECRIN (et identique au Federal Guidance n°12))

Résultats

Concentration moyenne de l'eau de la rivière

A 0.05 km :

- Distance à laquelle l'individu est présent sur les rives (pêche)
- Distance à laquelle les poissons sont pêchés

Nota : Le calcul est ici normé pour obtenir 1 Bq/L en rivière

	<i>Concentration moyenne Bq/l</i>
H3	1.00E+00
CO60	1.00E+00
CS137	1.00E+00
NI63	1.00E+00

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

Activité des matières en suspension et des sédiments

A 0.05 km :

- Distance à laquelle l'individu est présent sur les rives (pêche)
- Distance à laquelle les poissons sont pêchés

	<i>Activité massique des matières en suspension (Bq/kg)</i>	<i>Activité surfacique des sédiments (Bq/m²)</i>
H3	3.00E-02	5.83E-02
CO60	4.30E+04	8.06E+04
CS137	9.50E+03	1.88E+04
NI63	1.00E+04	1.99E+04

Activité massique du poisson (Bq/kg)

	<i>Activité massique du poisson</i>
H3	9.10E-01
CO60	4.00E+02
CS137	3.00E+03
NI63	7.10E+01

Activité ingérée annuellement (Bq/an)

	<i>Poisson</i>
H3	1.41E+01
CO60	6.20E+03
CS137	4.65E+04
NI63	1.10E+03

Dose efficace due à l'ingestion

	<i>Dose efficace due à l'ingestion (Sv/an)</i>
H3	3.13E-10
CO60	2.11E-05
CS137	6.04E-04
NI63	1.65E-07

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

Dose efficace due à l'exposition externe (Sv/an)

	<i>Sur les rives</i>
<i>H3</i>	0
<i>CO60</i>	2.73E-05
<i>CS137</i>	1.50E-06
<i>NI63</i>	0

Dose totale (Sv/an) pour 1 Bq/L en rivière

	<i>Dose efficace due à l'ingestion (Sv/an)</i>	<i>Dose efficace due à l'exposition externe (Sv/an)</i>	<i>Dose efficace totale (Sv/an)</i>
<i>H3</i>	3.13E-10	0	3.13E-10
<i>CO60</i>	2.11E-05	2.73E-05	4.83E-05
<i>CS137</i>	6.04E-04	1.50E-06	6.06E-04
<i>NI63</i>	1.65E-07	0	1.65E-07

Note sur le Tritium :

La concentration en ³H sous forme d'eau tritiée dans le poisson est considérée dans BLIQID comme égale à la concentration moyenne en tritium dans l'eau de rivière. L'activité spécifique en tritium de la matière organique du poisson est à l'équilibre avec celle de la matière organique végétale consommée par le poisson, elle-même en équilibre avec l'activité spécifique de l'eau. L'activité massique du poisson est donc dépendante de la concentration en tritium dans l'eau, de la teneur en eau du poisson (ici 0,75 kg d'eau/kg de frais) et du coefficient de fixation de tritium sur la matière organique du poisson (0,64 s.d.). Dans le calcul, on dissocie la partie « eau tritiée » et la partie « tritium organique » car les facteurs de dose due à l'ingestion sont différents. L'activité massique en tritium correspond à la somme des deux contributions.

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

ANNEXE 4 : DESCRIPTION DES PARAMETRES UTILISES POUR LES SCENARIOS D'USAGE TYPE DU GUIDE ASN/IRSN DE 2011

	Résidence	Bureau	Maraisage	Ecole	Parking	Friches	Chantier	Complexe sportif	Base de loisirs
Age de l'individu de référence (années)	3 à 7	30 (adulte)	30 (adulte)	3 à 7	30 (adulte)	8 à 12	30 (adulte)	8 à 12	3 à 7
Empoussièremment intérieur (mg/m ³)	0.01	0.001		0.001				0.001	
Empoussièremment extérieur (mg/m ³)	0.02	0.01	0.5	0.01		0.5	1	0.5	0.1
Débit respiratoire sommeil (m ³ /h)	0.24								
Débit respiratoire repos (m ³ /h)	0.32	0.54	0.54	0.32			0.54	0.38	0.32
Débit respiratoire exercice léger (m ³ /h)	0.57	1.5	1.5	0.57		1.12	1.5		0.57
Débit respiratoire exercice lourd (m ³ /h)		3	3				3	2.2	
Nombre de jours par an considérés	365	230	230	200	230	50	115	104	104
h/j sommeil int	12								
h/j repos int	3	2.17		2				0.625	
h/j exercice léger int	6	4.33		4					
h/j exercice lourd int									
h/j repos ext	1	1	0.75	0.67	1.00		2.25		1
h/j exercice léger ext	2	0.75	0.75	1.33		6	0.56		4
h/j exercice lourd ext		0.25	6				6.19	4.375	
Quantité de terre ingérée par inadvertance (g/an)	9.1		9.2	5.0		2.5	4.6	4.6	10.4
Degré d'autarcie des produits végétaux cultivés (de 0 à 1)	0.5		1						
Intérieur	dalle 10cm	dalle 20cm	sans objet	dalle 10cm	sans objet	sans objet	sans objet	dalle 10cm	sans objet
Extérieur	terre à nu	terre à nu	terre à nu	terre à nu	bitume	terre à nu	terre à nu	terre à nu	terre à nu

L'application « Impact » utilise les coefficients de dose pour l'exposition externe du rapport Federal Guidance et les valeurs de DPUI (dose par unité d'incorporation) de l'arrêté de 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

L'application « Impact » utilise les équations présentées dans le guide IRSN (2011). En fonction des besoins et de la finalité de l'outil, les équations ont été regroupées et simplifiées en 6 équations.

1) Exposition interne par inhalation (équations (1) (2) (3) (4) (11) (12) du guide IRSN)

$$E = A * F * Em * 10^{-3} * Dr * BT * N * DPUI_{inhalation}$$

E : Dose efficace (Sv.an⁻¹)

A : Activité des structures ou des sols (Bq.g⁻¹)

Em : Empoussièremment (mg.m⁻³)

F : Fraction inhalable des aérosols (sans dimension)

Dr : Débit respiratoire selon l'activité considérée et l'individu (enfant/adulte, homme/femme) (m³.h⁻¹)

BT : Budget temps consacré à l'activité considérée (h.j⁻¹)

N : Nombre de jours considérés (j.an⁻¹)

DPUI_{inhalation} : Dose efficace par unité d'incorporation par inhalation, Sv.Bq⁻¹

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

2) Exposition externe à l'air (équations (5) (6) (7) (8) (13) (14) du guide IRSN)

$$E = A * Em * 10^{-3} * BT * N * 3600 * CD$$

E : Dose efficace (Sv.an⁻¹)

A : Activité massique dans les structures ou dans les sols (Bq.g⁻¹)

Em : Empoussièrément (mg.m⁻³)

BT : Budget temps consacré à l'activité considérée (h.j⁻¹)

N : Nombre de jours considérés (j.an⁻¹)

CD : Coefficient de dose par exposition externe immersion à l'air (Sv.s⁻¹.Bq⁻¹.m³)

3) Exposition externe au dépôt (équations (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) du guide IRSN)

$$E = A * \rho * 10^{+3} * BT * N * 3600 * CD * Fd$$

E : Dose efficace (Sv.an⁻¹)

A : Activité massique dans les structures ou dans les sols (Bq.g⁻¹)

ρ : Masse volumique du sol (kg.m⁻³)

BT : Budget temps consacré à l'activité considérée (h.j⁻¹)

N : Nombre de jours considérés (j.an⁻¹)

CD : Coefficient de dose par exposition externe au dépôt épaisseur infinie, (Sv.s⁻¹.Bq⁻¹.m³)

Fd : Facteur d'atténuation apporté au rayonnement d'un radionucléide par la couverture d'une surface (sans dimension). Sans couverture, ce facteur est égal à 1.

4) Exposition interne par ingestion d'aliments du potager (équation (27) du guide IRSN)

$$E = A * \sum(Ft * Q * Ta) * 1000 * DPUI_{\text{ingestion}}$$

E : Dose efficace (Sv.an⁻¹)

A = Activité massique du sol dans le potager (Bq.g⁻¹)

Ft : Facteur de transferts racinaires ((Bq/kg végétal frais)/(Bq/kg sol sec))

Q : Régime alimentaire (kg.an⁻¹)

Ta = Degrés d'autarcie

DPUI_{ingestion} : Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion, (Sv.Bq⁻¹)

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

5) Exposition interne par ingestion de terres par inadvertance (équation (30) du guide IRSN)

$$E = A \times Q \times DPUI_{\text{ingestion}}$$

E : Dose efficace (Sv.an⁻¹)

A = Activité massique du sol (Bq.g⁻¹)

Q : Quantité consommée (g.an⁻¹)

DPUI_{ingestion} : Dose efficace par unité d'incorporation par ingestion, (Sv.Bq⁻¹)

6) Exposition externe aux parois (équations (9) et (10) du guide IRSN)

$$Dose_{\text{ext-R}} = A_s \times 10^4 \times BT \times N \times FD_{30\text{cm}} \times 10^{-6} \times \left(\frac{30}{R \times 100} \right)^2 \times S_{\text{sphère}}$$

Avec :

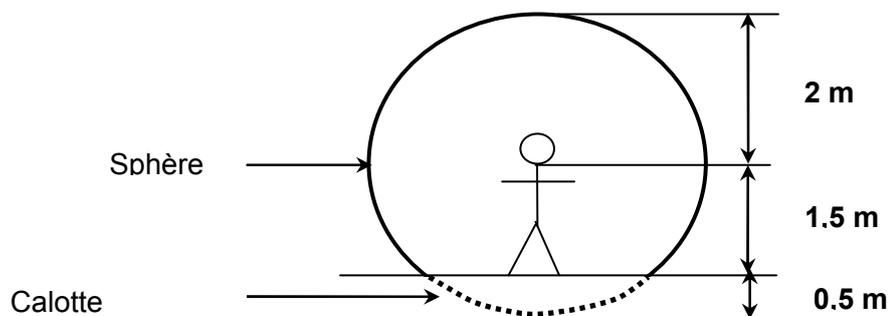
- R : Rayon de la sphère (en m)
- Dose_{ext-R} : Dose due à l'irradiation à distance des parois (Sv.an⁻¹)
- A_s : Activité surfacique (Bq.cm⁻²)
- 10⁴ : Facteur de conversion (cm².m⁻²)
- BT : Budget temps passé à l'intérieur du bâtiment (h.j-1)
- N : Nombre de jours considérés (j.an-1)
- FD_{30cm} : Facteur de dose à 30 cm (μSv.h⁻¹.Bq⁻¹)
- 10⁻⁶ : Facteur de conversion (Sv.μSv⁻¹)
- S_{sphère} : Surface de la sphère considérée (m²)

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

Détermination de $S_{\text{sphère}}$

Le travailleur est considéré comme au centre d'une sphère de 2 m de rayon coupée par un plan à 50 cm de haut.



La surface d'exposition s'exprime donc de la façon suivante :

$$S_{\text{sphère}} = 4\pi R^2 - 2\pi hR$$

Avec :

- $S_{\text{sphère}}$: Surface d'exposition (m²)
- R : Rayon de la sphère (m)
- h : Hauteur de la calotte (m)

Les valeurs calculées dans les feuilles « calcul d'impact » correspondent à des doses totales efficaces (en $\mu\text{Sv/an}$) dues à l'ensemble des 3 voies d'atteinte (exposition externe, ingestion, inhalation).

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

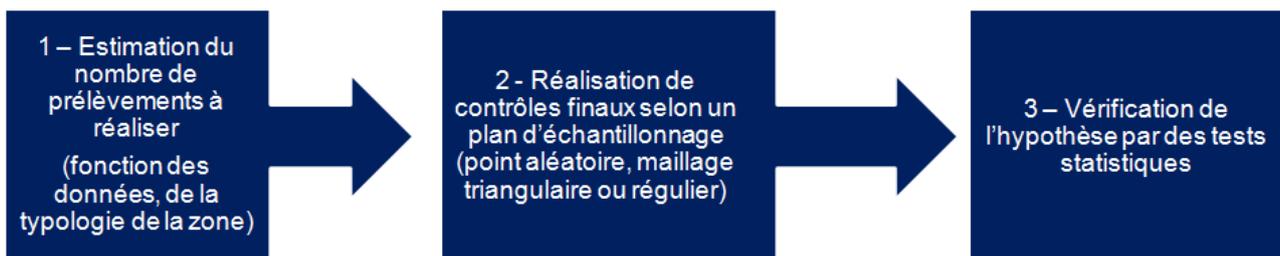
ANNEXE 5 : DECLINAISON DE LA METHODE MARSSIM POUR LA REALISATION DES CONTROLES FINAUX

La méthode MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) a été élaborée par 4 agences fédérales américaines (EPA, DOE, NRC, DOD). Cette méthode dispose d'un retour d'expérience international important avec des applications sur plusieurs sites nucléaires dans le monde (USA, Espagne, Suède, Japon, etc.).

L'intérêt de l'approche MARSSIM est qu'en tant qu'approche statistique, elle permet de prendre en compte :

- les variations de la mesure nucléaire ;
- le bruit de fond existant des radioéléments artificiels ;
- les incertitudes inhérentes au domaine.

Cette méthode permet de valider la conformité d'un assainissement par rapport à son objectif d'assainissement préalablement défini, en 3 étapes principales :



- **Etape 1 : Application de la méthode MARSSIM pour la détermination d'un nombre adapté et représentatif de prélèvements pour la réalisation de contrôles finaux**

Le nombre de prélèvements nécessaires est déterminé par un test statistique (test d'hypothèses), choisi en fonction de la présence ou non du (ou des) radionucléide(s) dans le bruit de fond. Ce test tient compte de la distribution du marquage (moyenne, dispersion).

Le guide MARSSIM présente deux tests statistiques de rejet d'hypothèse (« Sign test » et « Wilcoxon Rank Sum test »).

Pour les terres situées sous la STE, compte tenu des résultats du diagnostic, le traceur retenu est le ¹³⁷Cs. Le nombre de prélèvements nécessaires est déterminé avec la distribution de ce radionucléide. En l'absence de ¹³⁷Cs dans le bruit de fond des sols en profondeur sous la STE, on utilise alors le test de Sign à 1 seul jeu d'échantillons (test non paramétrique).

1) Méthodologie pour l'estimation du nombre de prélèvements nécessaires

Pour tout test d'hypothèses, il faut d'abord choisir les taux acceptables d'erreur de décision de type I (α) et de type II (β) lorsqu'on répond à la question « La zone réhabilitée est-elle conforme au critère de réhabilitation ? ».

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

1) α erreur de 1^{ère} espèce = dire que la réponse est OUI alors que la réponse correcte est NON (dire que la zone est « conforme » alors qu'elle ne l'est pas)

2) β erreur de 2^{nde} espèce = dire que la réponse est NON alors que la réponse correcte est OUI (dire que la zone n'est pas « conforme » alors qu'elle l'est)

Les conséquences de ces 2 erreurs sont différentes et les méthodes pour contrôler ces 2 types d'erreur sont différentes : il est donc important de spécifier les niveaux acceptables de ces 2 types d'erreur.

Représentation des erreurs de décision pour un déclassement :

		H ₀ : L'activité résiduelle dans la zone réhabilitée est supérieure au critère de réhabilitation	
		Décision	
		Rejette H ₀ (est inférieur au critère)	Accepte H ₀ (dépassé le critère)
État réel de la zone d'étude	Est inférieur au critère	Pas d'erreur	Non déclassement d'une zone conforme (erreur de 2 ^{nde} espèce)
	Dépasse le critère	Déclassement d'une zone non conforme (erreur de 1 ^{ère} espèce)	Pas d'erreur

- probabilité de faire une erreur de 1^{ère} espèce = α . Cette valeur représente le risque de déclasser une zone non conforme au critère de réhabilitation = niveau de signification du test ; α sera pris faible avec des valeurs de 2,5% ou 5%.

- probabilité de faire une erreur de 2^{nde} espèce = β . $(1-\beta)$ est la probabilité de rejeter H₀ quand elle est fautive, et représente la puissance du test ; cette erreur a des conséquences financières sur l'entreprise mais pas de conséquence pour le public (en général prise égale à 5 à 10%).

Pour les substances non présentes dans le bruit de fond (ce qui est le cas du ¹³⁷Cs dans les terres sous la STE), on utilise alors le test de Sign à 1 seul jeu d'échantillons qui permet de déterminer le nombre de prélèvements à réaliser pour la « zone réhabilitée » grâce à l'équation suivante :

$$N = \frac{(Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta})^2}{4 (\text{Sign } p - 0.5)^2}$$

- *Sign p* représente la probabilité qu'une mesure aléatoire de la zone d'étude soit inférieure à l'objectif de réhabilitation lorsque la médiane de la zone d'étude est au niveau de la LBGR (Lower Bound of the Grey Region). Cette valeur est donnée en fonction de l'amplitude relative Δ / σ ;
- $Z_{1-\alpha}$ et $Z_{1-\beta}$, sont les percentiles des erreurs de décision choisies et sont des valeurs statistiques standard ;
- L'amplitude relative Δ / σ est calculée suivant : $\Delta = \text{critère de réhabilitation}/2$ et $\sigma = \text{estimation de la dispersion des valeurs dans la zone réhabilitée}$. Δ / σ est une expression de la résolution des

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

mesures en unités d'incertitude de la mesure. Idéalement le rapport Δ / σ doit être compris entre 1 et 3 (et ramené à 3 si ce rapport est supérieur à 3, ce qui équivaut à une dispersion très faible des données).

Le tableau suivant extrait de MARSSIM propose pour différents triplet $\{\alpha, \beta, \Delta / \sigma\}$ le nombre N de prélèvements par application de la formule précédente.

Δ/σ	$\alpha=0,025$					Δ/σ	$\alpha=0,025$				
	β						β				
	0,01	0,025	0,05	0,10	0,25		0,01	0,025	0,05	0,10	0,25
0,1	3470	2907	2459	1999	1313	1,2	28	32	37	22	15
0,2	879	735	622	503	333	1,3	25	29	34	21	14
0,3	398	333	281	227	150	1,4	23	27	33	19	12
0,4	230	192	162	131	87	1,5	20	26	32	17	12
0,5	152	126	107	87	58	1,6	20	24	31	17	11
0,6	110	92	77	63	42	1,7	28	23	29	16	11
0,7	83	70	59	48	33	1,8	27	22	29	16	11
0,8	66	57	48	39	26	1,9	26	22	28	16	10
0,9	57	47	40	33	22	2,0	26	21	28	16	10
1,0	48	40	34	28	18	2,5	23	20	27	14	10
1,1	42	35	30	24	17	3,0	23	20	27	14	9

Tableau 16 : Estimation du nombre N de prélèvements nécessaires en fonction du triplet $\{\alpha, \beta, \Delta / \sigma\}$ (tableau issu de la méthodologie MARSSIM)

2) Application aux terres en fonds de fouille après assainissement

Les taux acceptables d'erreur de décision choisis ici sont les valeurs usuelles, recommandées dans la méthodologie MARSSIM, à savoir :

- Erreur de 1^{ère} espèce $\alpha = 2,5\%$
- Erreur de 2^{ème} espèce $\beta = 5\%$

Ces taux sont les mêmes que ceux utilisés lors des contrôles finaux du chenal de Brennilis.

Le critère de réhabilitation (DCGL dans MARSSIM) retenu ici est le critère de vérification du modèle géostatistique, à savoir la valeur moyenne maximale admissible : $\sim 0,5$ Bq/g. Par exemple, si cette valeur est vérifiée en tout point, alors la moyenne des valeurs sera dans la gamme prédite par le modèle géostatistique.

La dispersion des valeurs σ est déterminée à partir des mesures et simulations effectuées sur les terres en fonds de fouille sur lesquelles seront effectués les contrôles finaux.

	Critère [Bq/g]	$\Delta =$ Critère/2 [Bq/g]	$\sigma =$ Dispersion [Bq/g]	Amplitude relative Δ / σ	Nombre de prélèvements nécessaires
Terres en fonds de fouille (0 – 25cm)	0,5	0,25	0,11	2.3	17
Terres en fonds de fouille (25 – 50cm)	0,5	0,25	0,19	1.3	24

	NOTE PLAN DE GESTION DES TERRES SITUÉES SOUS LE RADIER DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE BRENNILIS		
	DIPDE_2ED-ENV	Référence : D305615001831	Indice : B

ANNEXE

En conclusion, le nombre minimal de prélèvements nécessaires est compris dans une gamme de :

- 17 mesures, en considérant les terres en fonds de fouille (0-25cm)
- à 24 mesures, en considérant la couche 25-50 cm (dispersion plus forte)

Les prélèvements seront réalisés sur la couche supérieure. Pour tenir compte de l'hétérogénéité avec la couche sous-jacente, le nombre de prélèvements est augmenté à 20 sondages sur les terres en fonds de fouille (Ceci équivaut à une mesure pour 30 m². Avec les données issues du diagnostic, la densité de mesures sur cette couche est d'une mesure pour 15 m²).

Ce nombre est cohérent avec les valeurs guides de la méthode MARSSIM qui préconisent un nombre de prélèvements de 20 à 30 pour le contrôle de chaque zone (< 2 000 m²). Ce nombre est aussi cohérent avec les 25 contrôles finaux surfaciques réalisés pour le chenal (> 1 000 m²).

- **Etape 2 : Echantillonnage des 20 contrôles finaux en fond de fouille**

Selon la méthodologie MARSSIM, les points de contrôles sont déterminés par maillage triangulaire construit à partir d'un point de départ aléatoire. Ce type de maillage est plus apte à détecter des zones réduites à activité élevée.

Les points de surveillance sont choisis de manière systématique avec un point de départ aléatoire. Le nombre n (N ou N/2 en fonction du test statistique choisi), calculé grâce aux tests statistiques, est utilisé pour calculer la distance L entre 2 points du maillage systématique. A est l'aire de la zone réhabilitée.

$$L = \sqrt{A/(0.866 n)} \text{ pour un maillage triangulaire (= 6,6 m dans le cas de la STE)}$$

Le maillage sera adapté à la configuration de la STE : au besoin, des points de mesures supplémentaires seront ajoutés pour assurer une couverture de l'ensemble des locaux.

- **Etape 3 : Vérification de l'hypothèse**

On vérifiera alors que l'activité massique moyenne en ¹³⁷Cs issue de ces mesures est bien conforme à celle présentée dans le Plan de gestion. La moyenne des contrôles doit se situer dans l'intervalle associée à la moyenne prévue initialement par la géostatistique sur la base du diagnostic.

Ainsi, pour le ¹³⁷Cs en fonds de fouille, la moyenne des activités mesurées devra être cohérente avec celle estimée par la géostatistique, soit 0,17 Bq/g, comprise entre 0,05 et 0,48 Bq/g avec un niveau de confiance à 90%.

En fonction de l'épaisseur supplémentaire excavée, cette gamme de valeurs attendue pourra être adaptée à la couche sur laquelle reposeront les contrôles finaux.