ACRO

ASSOCIATION POUR LE CONTRÔLE
DE LA RADIOACTIVITÉ DANS L'OUEST

2020

L'héritage de Tchernobyl et la voie navigable transeuropéenne E40

Etude pour la Frankfurt Zoological Society

Janvier 2020

ACRO | 138 rue de l'Eglise – 14200 Hérouville St Clair – France | (+33) 2 31 94 35 34 | acro.eu.org | acro@acro.eu.org

DEMANDE	
Objet	Etude d'impact
Demandeur	Frankfurt Zoological Society
Offer	PR190521(01)-SZF-v1

REALISATION	
Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest 138, rue de l'Eglise 14200 Hérouville Saint-Clair France www.acro.eu.org phone: +33 (0) 2.31.94.35.34 / email: acro@acro.eu.org SIRET 950 369 868 00027 | APE 7120 B	
Auteurs	David Boilley, Ala Pigrée et Pierre Barbey
Photo de couverture	Rivière Pripiat © Olga Kaskevich

DOCUMENT	
Date d'édition	Janvier 2020
Identification	RAP_E40_fr
Version	01
Pages	49 pages
Title	L'héritage de Tchernobyl et la voie navigable transeuropéenne E40

CONDITIONS	
ACRO :	La reproduction du document n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral

Résumé

La voie navigable transeuropéenne E40 vise à relier la mer Noire à la mer Baltique, via les rivières Dniepr et Pripiat. Mais, tout le bassin versant du Dniepr a été contaminé par l'accident de Tchernobyl de 1986. De plus, le Pripiat traverse la zone d'exclusion de Tchernobyl et passe juste à côté de la centrale nucléaire accidentée. La présente étude vise à donner une première évaluation de l'impact radiologique des travaux de construction et de maintenance de l'E40.

Les deux radioéléments importants du point de vue de la santé sont le césium-137 et le strontium-90. Le césium-137 se lie aux sédiments argileux tandis que le strontium-90 est plus mobile. En outre, l'américium-241, le noyau fils du plutonium-241, est très toxique et sa contribution croissante devrait dominer l'impact radiologique à l'avenir.

Deux points chauds radiologiques de l'AIEA sont sources de risques pour ce projet. La plaine d'inondation de la rivière Pripiat dans la zone d'exclusion de Tchernobyl constitue une menace si elle est inondée par la construction d'un barrage. Le bassin de refroidissement de Tchernobyl représente aussi une menace en cas de rupture du barrage qui le sépare de la rivière Pripiat. En outre, le réservoir de Kiev, fortement contaminé par le césium-137, risque de devenir un autre point chaud si les sédiments sont perturbés.

Selon l'analyse des risques, les travailleurs en charge des travaux de construction dans la zone d'exclusion de Tchernobyl seraient les plus exposés : leur exposition externe pourrait atteindre des doses supérieures à 10 mSv/an et être proche de la limite européenne fixée à 20 mSv/an. La contamination de l'eau potable, des poissons et l'utilisation de matériaux de dragage comme engrais dans les champs pourraient entraîner une exposition supplémentaire de la population qui dépend du Pripiat et du Dniepr.

Les conventions d'Aarhus et d'Espoo, ainsi que les principes de la radioprotection de la CIPR, exigent des études environnementales et radiologiques, une justification du projet et la participation des parties prenantes et du grand public au processus de décision. Rien n'a été réalisé jusqu'à présent.

La construction de l'E40 aura un impact radiologique sur les ouvriers du BTP et sur la population qui dépend des rivières. Les risques pour les travailleurs dans la zone d'exclusion de Tchernobyl sont inacceptables. De plus, le bassin de refroidissement et les sites de stockage des déchets radioactifs à proximité de la rivière Pripiat n'ont pas été démantelés. Enfin et surtout, l'AIEA recommande de laisser les sédiments contaminés du réservoir de Kiev en place, afin d'éviter l'exposition de la population en aval. Dans ce contexte, la construction de l'E40 n'est pas réalisable.

Sommaire

Résumé **3**

Sommaire **4**

1. Introduction **6**

2. Etat de la contamination radioactive le long de la voie E40 ..... **9**

2.1. L'ensemble du bassin versant du Dniepr est contaminé par l'accident de Tchernobyl *9*

2.2. Caractéristiques de la contamination de l'environnement *10*

2.2.1. Principaux radioéléments 10

2.2.2. Cartes et bases de données 12

2.2.3. Contamination le long de la cascade du Dniepr 12

2.3. Impact des inondations du lit majeur du Pripiat et mesures de remédiation *14*

2.4. Points chauds radiologiques *15*

2.5. Les conclusions et recommandations de l'AIEA *16*

3. Travaux de construction et de maintenance liés au corridor fluvial E40 ..... **18**

3.1. Description *18*

3.2. Travaux de dragage *20*

3.3. Principaux impacts radiologiques *21*

4 Scénarios d'exposition et doses **23**

4.1. Principes fondamentaux de la protection radiologique *23*

4.1.2. Principes de la CIPR 23

4.1.2. Implication des parties prenantes et participation du public 25

4.1.3. Limites de dose et niveaux de référence 26

4.2. Estimation de la dose actuelle due à la contamination du bassin versant du Dniepr *26*

4.3. Estimation des doses d'exposition liée à la voie navigable E40 ..... *28*

4.3.1 Travailleurs dans la zone d'exclusion de Tchernobyl 28

4.3.2. Contamination des eaux du Dniepr 29

4.3.3. En amont de la zone d'exclusion de Tchernobyl 32

5 Conclusions **33**

Bibliographie **35**

Littérature grise : *35*

Publications scientifiques : *37*

Annexe : Cartes de la contamination **38**

Cartes Biélorusses *38*

Cartes de la contamination de la zone d'exclusion de Tchernobyl de 2009 38

Césium-137 : 38
Strontium-90 : 39
Plutonium-238,239,240 : 40
Plutonium-241 : 41
Américium-241 : 42
Cartes de la contamination en césium du Sud du Bélarus de 2016 43
Oblast de Gomel : 43
Oblast de Brest : 44
Reconstruction de la carte de contamination en césium le long de la rivière Pripiat (2016) 44
Cartes Ukrainiennes *45*
Zone d'exclusion 45
Césium-137 (Mai 2011) 45
Strontium-90 (Mai 2011) 46
Isotopes du plutonium 47
Américium-241 48

1. Introduction

La voie navigable internationale E40 vise à relier la mer Baltique et la mer Noire, de Gdansk à Kherson, en passant par la Pologne, la Biélorussie et l’Ukraine. Voir la figure 1. Actuellement, la route n'est navigable que de la mer Noire jusqu'à la frontière entre la Pologne et le Bélarus. Le Dniepr est navigable pour les grands navires (voie navigable de classe V). Il ne nécessite que quelques travaux de dragage et la modernisation des écluses. Le principal défi consiste à moderniser les autres sections. La Biélorussie souligne l'importance de l'E40 et prévoit un important programme de modernisation des infrastructures hydrotechniques et des voies de transport.

Figure 1 : *Carte du projet de voie fluviale E40. Extrait de [UNECE2012].*

Il y a très peu de documents disponibles sur ce vaste projet. Les informations proviennent principalement d'un rapport d'étude de faisabilité coordonné par l'Institut maritime de Gdansk [MIG2015]. À notre connaissance, aucune étude d'impact environnemental exhaustive n'a été réalisée jusqu'à présent, à l'exception d'une étude indépendante sur l'impact sur les conditions hydrologiques et environnementales des rivières et des zones humides voisines [FZS2019]. La voie navigable E40 doit traverser la Polésie, la plus grande région sauvage d'Europe. Son développement est susceptible de poser un risque élevé de dégradation des étendues naturelles du Pripiat dans le parc national Pripiatsky (Прыпяцкі нацыянальны парк). En outre, une partie du projet comprend la modernisation de la rivière Pripiat qui coule au pied de la centrale nucléaire de Tchernobyl et traverse la réserve radio-écologique d'État de Polésie (Палескі дзяржаўны радыяцыйна-экалагічны запаведнік) dans la zone d'exclusion de Tchernobyl qui est fortement contaminée par divers radioéléments. Les figures 2, 3 et 4 montrent les dépôts surfaciques en césium-137, strontium-90 et plutonium-239-240 qui dominent la contamination radioactive. D'autres cartes sont disponibles en annexe, à la fin du document. De plus, le plutonium-241 se désintègre en américium-241 qui atteint actuellement des niveaux significatifs. En aval de cette région, environ 8 millions d'Ukrainiens boivent l'eau du Dniepr, et jusqu'à 20 millions mangent des aliments irrigués avec l'eau du Dniepr.

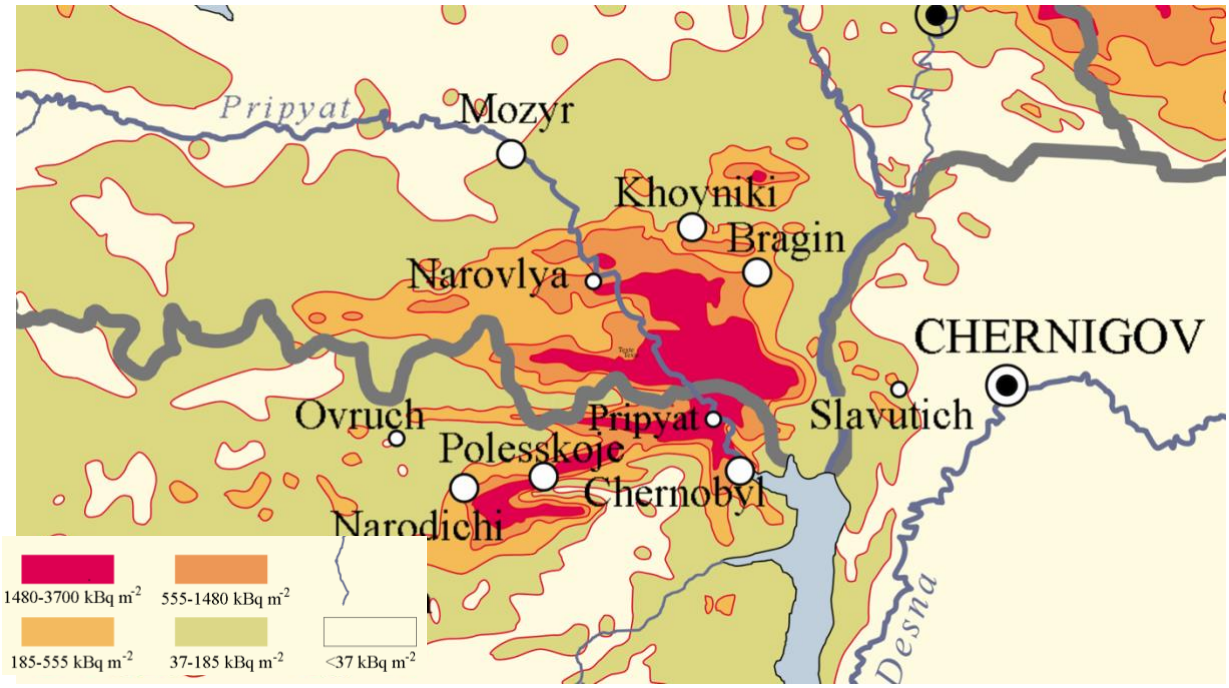

Figure 2 : *Carte des dépôts surfaciques de césium-137 le long de la rivière Pripiat près de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Extrait de [UNSCEAR2000].*

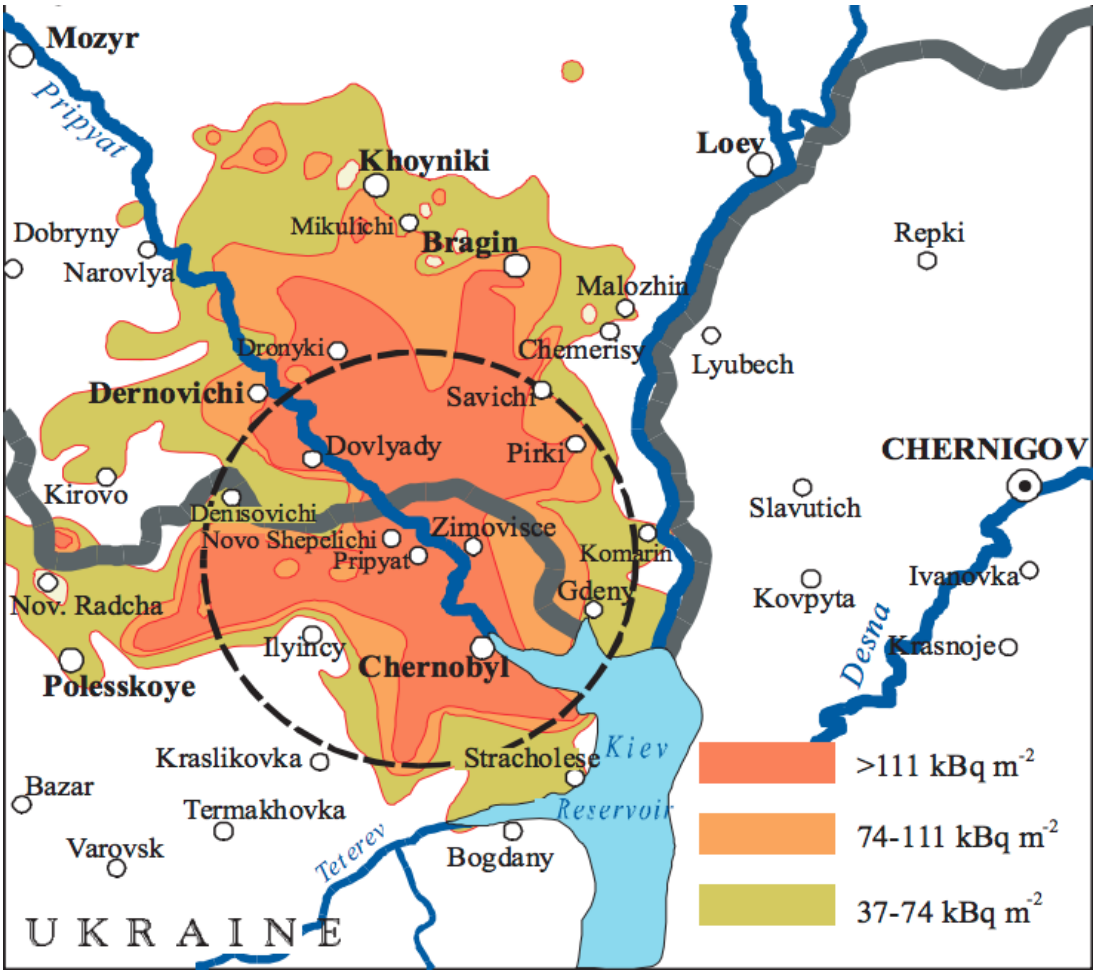

Figure 3 : *Carte des dépôts surfacique de strontium-90 le long de la rivière Pripiat près de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Extrait de [AIEA2006b].*

Figure 4 : *Carte des dépôts surfaciques de plutonium le long de la rivière Pripiat près de la centrale nucléaire de Tchernobyl : en orange les zones où les dépôts de plutonium-239-240 dépassent 3,7 kBq/m2. Extrait de [AIEA2006b].*

Par conséquent, une évaluation des incidences radiologiques du projet de voie navigable E40 aurait dû être réalisée par ses promoteurs et ses partisans et aurait dû être soumise aux parties prenantes et au public, comme l'exige la convention d'Aarhus sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement[1]. Cette consultation devrait être transfrontalière, comme le prévoit la convention d'Espoo[2], acceptée par la Biélorussie et ratifiée par la Pologne et l'Ukraine[3]. Comme cela n'a pas été fait jusqu'à présent, le présent rapport a pour principal objectif de fournir une première évaluation de l'impact radiologique du projet de la voie navigable E40.

Le "Livre bleu" des Nations unies, qui identifie les goulets d'étranglement dans le réseau des principales voies navigables européennes d'importance internationale, ne mentionne jamais la radioactivité pour l'E40 : le seul problème semble être un faible tirant d'eau maximal [UNECE2017].

1 https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/documents/cep43e.pdf
2 https://www.unece.org/env/eia/about/eia_text.html
3 https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-4&chapter=27&lang=en

2. Etat de la contamination radioactive le long de la voie E40

Cette section se base principalement sur les références [AIEA2006a, AIEA2006b, Onishi2007].

2.1. L'ensemble du bassin versant du Dniepr est contaminé par l'accident de Tchernobyl

La centrale nucléaire de Tchernobyl se trouve le long de la rivière Pripiat, au nord de l'Ukraine, dans le bassin du Dniepr et tout près de la frontière avec le Bélarus. L'accident de Tchernobyl, survenu le 26 avril 1986, a libéré de grandes quantités de radioéléments dans l'atmosphère et dans le bassin de refroidissement. Ce bassin, aujourd'hui séparé de la rivière Pripiat par un barrage, a été fortement contaminé lors de l'accident et par le déversement ultérieur de déchets liquides radioactifs. Les retombées radioactives se sont concentrées dans le bassin hydrographique supérieur du Dniepr, en territoire russe et biélorusse, et dans l'ensemble du bassin hydrographique du Pripiat. Voir les cartes en annexe. De nombreux efforts de recherche et d'assainissement ont eu pour but la minimisation du transfert de radioéléments de la zone d'exclusion de Tchernobyl vers le Dniepr voisin afin de réduire les risques radiologiques liés à l'utilisation de l'eau.

Le Dniepr, le plus grand fleuve d'Ukraine, fournit 64 % des besoins en eau du pays et est largement utilisé pour l'irrigation. Environ 30 % de l'eau consommée dans le bassin du Dniepr est utilisée pour l'agriculture (l'eau d'irrigation prélevée sur le Dniepr représente près de 4 700 millions de m^3 par an). Le Dniepr irrigue environ 1,6 million des 2,6 millions d'hectares (ha) de terres agricoles en Ukraine (au milieu des années 1990).

Les plus grandes surfaces irriguées sont utilisées pour la culture de céréales (riz, blé d'hiver et de printemps, et orge) et de fourrage (maïs, pois, betterave à sucre, trèfle et luzerne). Les légumes (pommes de terre, tomates, concombres, choux, oignons, carottes, betteraves rouges...) et les fruits sont moins cultivés dans les zones irriguées.

Le réservoir de Kiev, le plus en amont de la cascade du Dniepr qui comprend 6 réservoirs, est le plus contaminé par l'accident de 1986. En conséquence, les poissons du réservoir de Kiev sont ceux qui contribuent le plus à la dose d'exposition individuelle effective de la population.

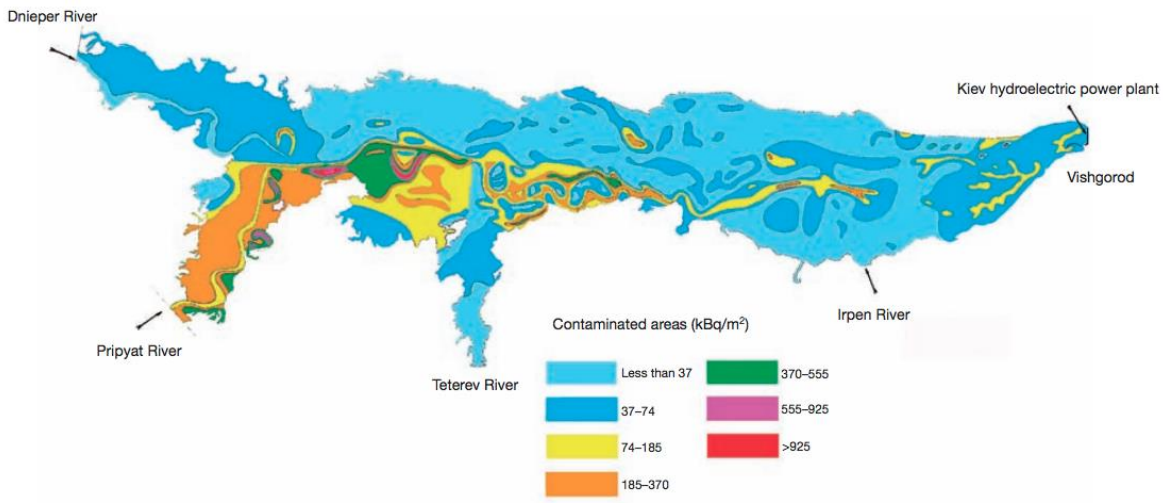

Figure 5 : *Dépôts en césium-137 dans les sédiments du réservoir de Kiev. Reproduit de [AIEA2006b].*

2.2. Caractéristiques de la contamination de l'environnement

2.2.1. Principaux radioéléments

De nos jours, le césium-137 (^{137}Cs, demi-vie de 30 ans) et le strontium-90 (^{90}Sr, demi-vie de 29,1 ans) sont les radioéléments les plus importants du point de vue de l'environnement et de la santé publique[4]. Selon l'AIEA [IAEA2006a], les inventaires estimés dans les principaux fleuves et affluents du bassin versant du Dniepr sont d'environ 19 PBq de ^{137}Cs et 2,2 PBq de ^{90}Sr (1 PBq = 10^{15} Bq). Ces deux éléments se comportent différemment dans l'environnement et dans le corps humain. Le césium se comporte comme le potassium et le strontium comme le calcium (qui se fixe préférentiellement dans les os). Ainsi, le césium a une affinité pour les minéraux argileux que l'on trouve fréquemment dans les sols naturels. Sa liaison aux sédiments retarde sa migration horizontale et verticale. Le strontium est moins fermement lié aux minéraux et est donc plus mobile dans l'environnement.

Le césium-137 a tendance à se fixer aux sédiments argileux, qui se déposent au fond des réservoirs, en particulier celui de Kiev qui est le plus en amont. Une faible fraction du ^{137}Cs s'écoule à travers la cascade en raison de ce processus et, par conséquent, sa concentration actuelle dans les eaux qui pénètrent dans la mer Noire est indiscernable du bruit de fond. Cependant, pour le strontium-90, bien que sa concentration diminue avec la distance de la source (principalement en raison de la dilution), environ 40 à 60% passent à travers la cascade et atteignent la mer Noire.

[4] Le césium-137, et son descendant à vie courte, le baryum-137m (^{137m}Ba), émettent des rayonnements bêta et gamma ; le strontium-90, et son descendant à vie courte, l'yttrium-90 (^{90}Y), émettent un rayonnement bêta dur.

Comme le montrent la figure 4 et les cartes en annexe, la contamination au plutonium affecte également la zone d'exclusion de Tchernobyl. Le plutonium-241, dont la demi-vie est de 14 ans, se désintègre en américium-241 (^{241}Am). Ce dernier est un émetteur alpha-gamma avec une demi-vie de 432 ans. Il s'accumule donc progressivement dans l'environnement en raison des différences de demi-vie. A son tour, l'américium-241 se désintègre en neptunium-237 (^{237}Np), qui a une demi-vie de $2,1x10^6$ ans et s'accumule aussi, mais à un rythme plus lent. Ce sont tous des radionucléides très toxiques, classés comme les plus dangereux, en raison de leur double nocivité : la radioactivité et les effets de poison des métaux lourds. L'américium-241 est plus dangereux lorsqu'il est inhalé que lorsqu'il est ingéré et il s'accumule dans le foie et la moelle osseuse, après avoir été transporté par le sang. Il a un effet nocif nettement plus important que le ^{90}Sr et le ^{137}Cs, surtout en cas de contamination interne.

Les concentrations maximales en plutonium observées dans la rivière Pripiat durant les premiers jours de l'accident étaient d'environ 370 mBq/L (10 pCi/L), mais elles sont tombées à 7,4 mBq/L (0,2 pCi/L) en août 1986. Elles étaient quatre ordres de grandeur plus faibles que le niveau maximal admissible de plutonium soluble pour l'eau potable. Jusqu'à 98 % du plutonium présent dans les masses d'eau était associé à des sédiments de fond et en suspension. Par conséquent, les études de terrain et les études expérimentales sur la contamination radioactive des masses d'eau ont porté essentiellement sur le strontium-90 et le césium-137 [PLN1994].

L'américium-241 a été mis en évidence dans le biote aquatique et sa concentration devrait augmenter jusqu'en 2070, où il devrait devenir le contributeur le plus important à la dose. Sa mobilité dans l'environnement aquatique est plus élevée que dans le sol, ce qui facilite son incorporation rapide dans les réseaux trophiques des masses d'eau [Golubev2011]. Cependant, l'américium est ignoré par la plupart de la littérature grise sur l'impact radiologique de l'accident de Tchernobyl et dans les évaluations de dose. Compte tenu du calendrier du projet E40, il doit être pris en compte.

De plus, des particules chaudes, de petite taille mais qui sont des sources intenses de rayonnement, ont été rejetées lors de l'accident. Bien qu'elles aient été détectées dans au moins 11 pays, la plus grande partie est retombée à proximité de la centrale nucléaire de Tchernobyl : dans la zone d'exclusion de 30 km, on a observé jusqu'à 10^5 particules par mètre carré. La masse totale des petites particules radioactives émises par le réacteur était probablement de 6 à 8 tonnes. Deux types de microparticules ont été identifiés : la majorité avait une composition très similaire à celle du combustible dans le cœur et n'étaient probablement que des fragments de ce combustible ; d'autres particules de plus haute activité spécifique avec seulement un ou deux radionucléides [Sandalls1993]. La taille des particules de combustible déposées variait de quelques centaines de microns à une fraction de micron et leur dépôt diminuait avec la distance du site du réacteur. Dans les sols, les particules de combustible s'étaient pratiquement désintégrées en 10 ans. Une situation inverse a été observée dans le bassin de refroidissement de la centrale de Tchernobyl, où la grande majorité de la radioactivité à vie longue s'est déposée sous forme de particules de combustible : la majorité de l'activité en ^{90}Sr y est encore sous cette forme. Cependant, à l'heure actuelle, ces conditions sont en train de changer puisque le bassin est en train d'être drainé et qu'une partie importante des sédiments est exposée à l'air. Cela améliore considérablement le taux de dissolution des particules de combustible dans les sédiments exposés, et l'on prévoit donc que la mobilité et la biodisponibilité des radionucléides augmenteront avec le temps. Des modélisations ont montré que, dans les sédiments nouvellement exposés, les particules de combustible seront presque complètement dissoutes en 15-25 ans, tandis que dans les parties du bassin qui restent inondées, leur dissolution prendra environ 100 ans [Onishi2007, Beresford2016].

2.2.2. Cartes et bases de données

Au Japon, à la suite de l'accident de Fukushima, des cartes officielles de la contamination des sols ont été mises en ligne[5], ainsi qu'une base de données rassemblant les résultats des mesures effectuées par des associations citoyennes[6]. Il existe également de nombreuses cartes locales avec un maillage plus petit, établies par les autorités locales et/ou les citoyens. Ce n'est pas le cas au Bélarus et en Ukraine où des cartes détaillées de la contamination ne sont pas disponibles en ligne. Les données de mesure de la surveillance officielle ne sont pas non plus disponibles. Quelques données relatives à certaines études spécifiques ont pu être trouvées dans des publications scientifiques, mais elles sont trop peu nombreuses pour évaluer l'impact de la pollution radioactive.

La convention d'Aarhus, acceptée par le Bélarus et ratifiée par l'Ukraine[7], exige que *« chaque Partie veille à ce que les informations sur l'environnement deviennent progressivement disponibles dans des bases de données électroniques auxquelles le public peut avoir facilement accès par le biais des réseaux de télécommunications publics »*. En outre, *« chaque Partie publie et diffuse à des intervalles réguliers ne dépassant pas trois ou quatre ans un rapport national sur l'état de l'environnement, y compris des informations sur la qualité de l'environnement et des informations sur les contraintes qui s'exercent sur l'environnement ».* Le Bélarus et l'Ukraine devraient respecter leurs engagements internationaux et publier toutes les données disponibles sur la contamination radioactive.

2.2.3. Contamination le long de la cascade du Dniepr

Les six réservoirs du Dniepr ont été fortement impactés par les retombées atmosphériques et les apports de la zone contaminée. Ces réservoirs sont essentiellement d'énormes bassins de sédimentation, car le lent passage de l'eau à travers la cascade crée des conditions idéales pour l'accumulation de radioéléments et d'autres polluants dans toutes les composantes de leur écosystème. En conséquence, la concentration de césium-137 dans l'eau de la rivière est réduite de deux ordres de grandeur le long du fleuve, entre la partie supérieure de la cascade du Dniepr et l'embouchure du Dniepr. Pendant toute la période post-accidentelle, plus de 99% du césium-137 qui a pénétré dans la rivière Pripiat et dans la partie supérieure du Dniepr, puis dans l'écosystème des réservoirs et dans l'estuaire du Dniepr-Bug, ont été captés par les sédiments. Voir la figure 5.

En raison de la plus grande mobilité du strontium-90, le taux de dépôt (50-70%) dans les réservoirs du Dniepr est nettement inférieur à celui du césium-137. L'une des principales raisons du comportement non échangeable du strontium-90 de la colonne d'eau est sa forte fixation chimique dans les coquilles des mollusques en croissance (le strontium est l'analogue chimique du calcium). C'est pourquoi la teneur maximale en strontium-90 dans les sédiments de fond a été observée sur les sites des colonies de mollusques et dans les sédiments contenant des débris de coquilles.

La concentration en strontium-90 dans l'eau du Dniepr est réduite d'un facteur de 1,5 à 3 entre Tchernobyl et le réservoir de Kakhovka (selon les données moyennes sur un an). Cela est principalement dû à la dilution des eaux du Pripiat avec les eaux propres du cours supérieur du Dniepr et des affluents latéraux. L'action de mélange des réservoirs du Dniepr lors du passage du strontium-90 le long de la cascade se

[5] https://ramap.jmc.or.jp/map/eng/
[6] https://en.minnanods.net/
[7] https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-13&chapter=27&clang=_en

manifeste par la réduction progressive des pics de concentration et par leur décalage avec le temps. Même les pics de concentration de strontium-90 très élevés dans les eaux de la rivière Pripiat et du réservoir de Kiev sont fortement atténués au moment où le pic atteint le réservoir de Kremenchug, et dans le réservoir de Kakhovka, on ne peut observer que des fluctuations réduites de la concentration en strontium-90. Voir la figure 6.

La plupart des sédiments en suspension transportés par la rivière dans le réservoir s'accumulent au fond. Cependant, les particules les plus fines (généralement d'une taille inférieure à 50 µm) peuvent être emportées par le flux vers le réservoir suivant et redescendre vers les parties inférieures de la cascade. Un flux considérable de radioéléments dans les réservoirs inférieurs a été observé pendant les tempêtes et les périodes de hautes eaux. Jusqu'à 50% du flux de césium-137 dans les réservoirs sont transportés par les fines particules de sédiments, et jusqu'à 80% des sédiments en suspension dans la rivière sont déposés dans les parties supérieures de la cascade [PNL1994].

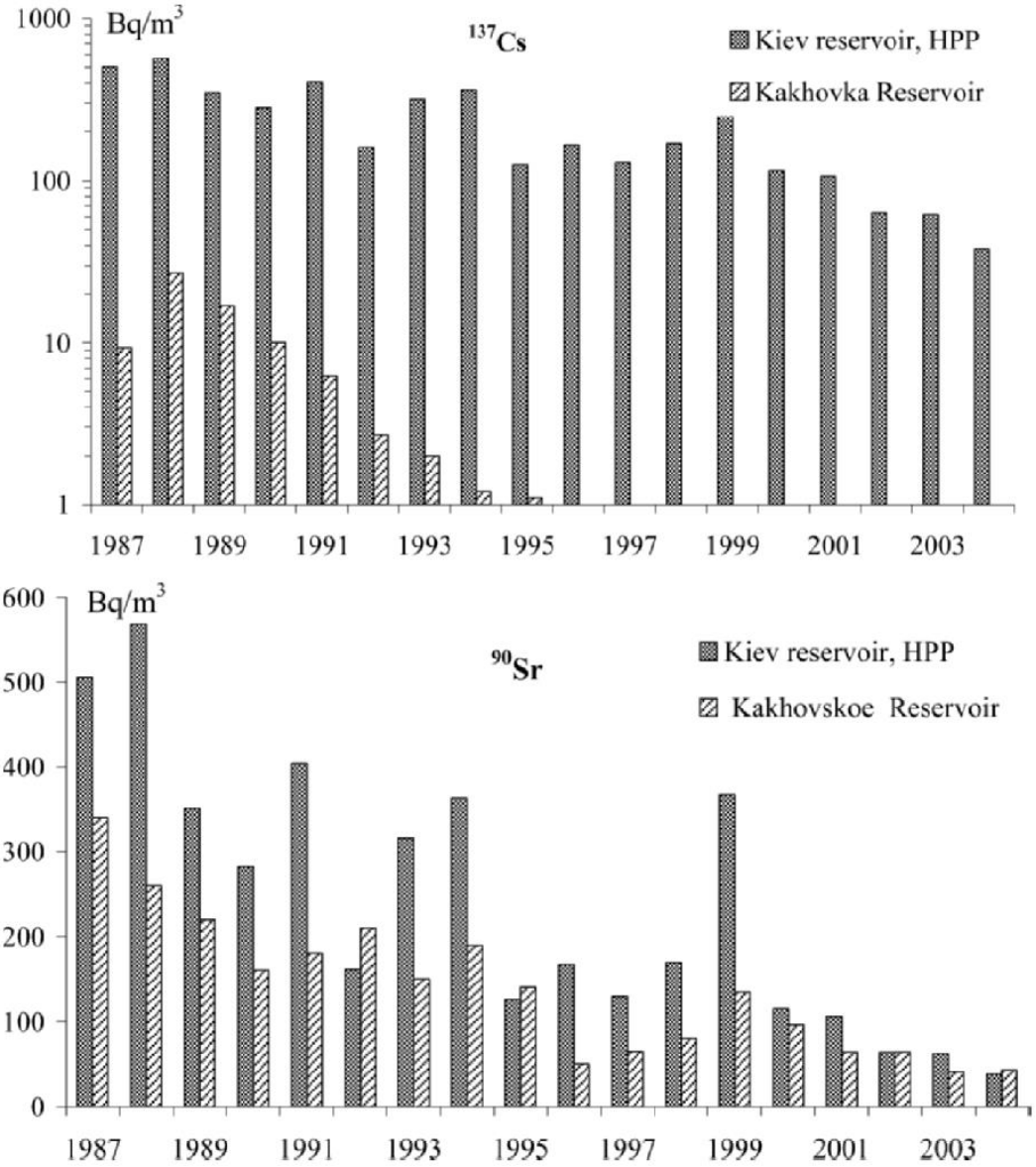

Figure 2.14. Annually averaged content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in Kiev (Vishgorod) (near the dam) and Kakhovka reservoirs of the Dnieper cascade

Figure 6 : *Concentration moyenne annuelle en $_{137}$Cs et $_{90}$Sr dans les réservoirs de Kiev (à Vishgorod, près du barrage) et de Kakhovka de la cascade du Dniepr. Figure reproduite de [Onishi2007].*

Des isotopes du plutonium transportés par les rivières jusqu'à la mer Noire ont été mesurés dans les sédiments des canaux d'irrigation de la Crimée du Nord [Polikarpov2015]. Cependant, il existe très peu d'études sur le transfert du plutonium et de l'américium dans le bassin versant du Dniepr. Les articles de synthèse ignorent ces radioéléments. Il existe relativement peu de données sur l'accumulation d'américium-241 dans le biote aquatique.

2.3. Impact des inondations du lit majeur du Pripiat et mesures de remédiation

Dans le bassin versant du Dniepr, une zone d'environ 85 000 km^2 présente une contamination surfacique en césium-137 supérieure à 37 kBq/m^2. Le lit majeur (partie inondée en cas de crue) de la rivière Pripiat est fortement contaminé par l'accident de Tchernobyl, en particulier par le strontium-90, dont les concentrations dépassent 4 000 kBq/m^2 sur de grandes surfaces. Voir les cartes en annexe. Cette zone est régulièrement inondée, notamment lors des crues de printemps. De plus, certains des sites d'enfouissement des déchets sont situés dans la plaine inondable. L'AIEA considère le lit majeur du Pripiat, dans la zone d'exclusion de Tchernobyl, comme un point chaud transfrontalier ayant un impact permanent et un impact plus important en période de forte inondation [AIEA2006a].

La rivière Pripiat est entourée de marais, et d'un grand nombre de lacs fermés, de bras morts, dans lesquels la concentration en césium-137 (et dans une moindre mesure en strontium-90) dans l'eau et les poissons est beaucoup plus élevée que dans les rivières les plus proches. Ce sont les zones les plus contaminées après l'accident de Tchernobyl. Ces lacs fermés et leurs environnements habités sont considérés comme de véritables points chauds ponctuels par l'AIEA. Les concentrations en radioéléments ne diminuent pas de manière significative avec le temps, et dans de nombreux lacs, elles dépassent encore les niveaux autorisés pour l'eau potable et surtout pour les poissons. Lors des inondations, il y a des transferts supplémentaires de contaminants vers le bassin du Dniepr. Et lors des inondations du lit majeur du Pripiat, les débits de dose augmentent quelque peu en raison de transport du strontium-90.

Les pics d'activité en strontium-90 dans les réservoirs de la cascade du Dniepr observés à la figure 6 sont dus à l'inondation des parties les plus contaminées de la zone d'exclusion de Tchernobyl qui se trouvent dans le lit majeur de la rivière. Par exemple, l'inondation du Pripiat causée par les barrages de glace dans la rivière pendant l'hiver 1991 a entraîné une augmentation temporaire mais significative des concentrations en strontium-90, mais n'a pas affecté les concentrations en césium-137. Les concentrations en strontium-90 sont passées d'environ 1 à 8 Bq/L pendant une période de 5 à 10 jours durant l'hiver 1991. Des événements similaires ont eu lieu lors des fortes pluies d'été en juillet 1993, de l'inondation de l'hiver 1994 et de la forte crue du printemps 1999.

Lors de l'inondation de janvier 1991, les concentrations en strontium-90 ont atteint 9 à 11 Bq/L (250-300 pCi/L) au pont de Yanov situé à l'extrémité avale de la plaine d'inondation, dépassant la limite locale de potabilité de l'eau fixée à 3,7 Bq/L (100 pCi/L). La quantité totale de strontium-90 transportée par la rivière Pripiat est passée de 18 à 370 GBq (0,5 à 10 Ci, 1 GBq = 10^9 Bq) par jour, et la quantité totale de strontium-90 libérée de la plaine d'inondation par la rivière Pripiat dans le réservoir de Kiev pendant cette période a dépassé les 3 TBq (90 Ci, 1 TBq = 10^{12} Bq). Heureusement, l'impact de ce rejet dans le réservoir de Kiev a été réduit grâce à la dilution de l'eau de la rivière Pripiat par l'eau plus propre du Dniepr et à la dispersion

de la contamination dans le réservoir. En conséquence, la concentration maximale de l'embouchure de la rivière Pripiat au barrage du réservoir de Kiev (une distance de plus de 80 km) a diminué de 7,4 à 1,1 Bq/L (200 à 30 pCi/L) [PNL1994].

En conséquence, en 1993, une digue a été construite autour de la plaine d'inondation fortement contaminée sur la rive gauche du Pripiat, juste en amont de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Cela a permis d'éviter l'inondation de cette zone et l'AIEA considère que cela s'est avéré efficace pour réduire le transport de strontium-90 dans la rivière lors des inondations. Cependant, en juillet-août 1993, de fortes pluies sur le bassin versant de la rivière Pripiat, au Bélarus et en Ukraine, ont provoqué de graves inondations, augmentant considérablement les concentrations de strontium-90 dans la rivière, ce qui a déclenché l'inquiétude du public quant aux niveaux de radioéléments dans la rivière et une intervention d'urgence du gouvernement ukrainien. La concentration maximale en strontium-90 dans le réservoir de Kiev était de 0,44 Bq/L (12pCi/L). Elle aurait été beaucoup plus élevée sans la digue de 10 km [PNL1994]. Aucun impact n'est donné sur les travaux de construction des digues.

En 1999, d'importantes quantités de strontium-90 ont de nouveau été rejetées depuis des régions fortement contaminées et sujettes aux inondations le long de la rivière Pripiat, dans la zone proche de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Le pic de contamination des eaux par la radioactivité a été suivi jusqu'au réservoir de Kakhovka en 1999. En raison des débits élevés du fleuve en mars-juin 1999, on a observé un mouvement rapide des eaux contaminées vers le bas du Dniepr et, à la mi-juillet 1999, ce front avait atteint la mer Noire. La valeur maximale de l'activité en ^{90}Sr mesurée pendant cette période dans le Dniepr à Novaya Kakhovka était de 0,3 Bq/L, soit trois à quatre fois plus que les niveaux de contamination observés au cours des années précédentes. Cette observation démontre une fois de plus que les zones inondables de la rivière Pripiat et d'autres sources de contamination dans la zone proche de la centrale nucléaire de Tchernobyl restent la principale source de contamination radioactive des eaux du Dniepr.

Une deuxième digue a été construite sur la rive droite du Pripiat en 1999. La concentration moyenne annuelle en strontium 90 dans l'eau du réservoir de Kiev a cependant été inférieure à 1 Bq/L pendant toutes les années à partir de 1987.

Il convient de noter que, selon l'AIEA, de nombreuses contre-mesures mises en place dans les mois et les années qui ont suivi l'accident pour protéger les systèmes aquatiques des transferts de radionucléides provenant de sols contaminés ont été, en général, inefficaces et coûteuses et ont entraîné des expositions relativement élevées des travailleurs qui les mettaient en œuvre [AIEA2006b].

2.4. Points chauds radiologiques

Le groupe d'experts de l'AIEA a sélectionné une liste de points chauds qui nécessitent une attention particulière [IAEA2006a]. Certains pourraient être affectés par les travaux de construction associés au projet de la voie navigable E40 : le lit majeur de la rivière Pripiat dans la zone d'exclusion de Tchernobyl, le bassin de refroidissement de la centrale, la zone d'exclusion de Tchernobyl dans son ensemble (à la fois au Bélarus et en Ukraine), les zones fortement contaminées en dehors de la zone d'exclusion de Tchernobyl, en particulier les lacs et les bassins fermés au Bélarus, dans la Fédération de Russie et en Ukraine et les sédiments contaminés dans le réservoir de Kiev.

Selon l'AIEA, le point le plus chaud de la zone touchée par Tchernobyl, le long de la rivière Pripiat, est la plaine d'inondation fortement contaminée en amont de la centrale nucléaire (sur une distance de 10 km en amont du pont Yanov) près de la ville de Pripiat. Le lit majeur peut être inondé par une crue avec une probabilité de 25 % (en moyenne une fois tous les quatre ans).

Le bassin de refroidissement de Tchernobyl constitue une menace pour la rivière Pripiat en cas de rupture du barrage, entraînant la libération d'une grande quantité d'eau et de sédiments contaminés. L'inventaire total des radionucléides dans le bassin dépasse les 200 TBq [AIEA2006b]. Selon l'AIEA [IAEA2006a], les résultats de la simulation d'une rupture de barrage peuvent être comparés aux résultats de la dernière grande inondation de 1999. Ce bassin devrait être démantelé et les sédiments fortement contaminés enlevés. Le démantèlement a commencé en 2013.

L'analyse de l'AIEA ne considère pas les sédiments du réservoir de Kiev comme un point chaud car la contamination est en grande partie contenue dans les sédiments profonds, qui ne sont pas disponibles pour une absorption significative dans le biote dans des conditions normales ou d'inondation. Toutefois, les travaux de dragage n'ont pas été pris en compte dans cette analyse. La carte du césium-137 dans les sédiments de fond du réservoir de Kiev est donnée à la figure 5. Selon le lieu de dragage, les sédiments pourraient aussi être classés comme un point chaud potentiel.

2.5. Les conclusions et recommandations de l'AIEA

En ce qui concerne les sédiments de fond contaminés dans les réservoirs du Dniepr, l'AIEA note qu'ils n'ont pas d'influence significative sur la contamination radioactive secondaire de l'eau et des organismes aquatiques. En effet, la quasi-totalité du césium-137 rejeté par les zones contaminées est immobilisée dans les sédiments profond des réservoirs du Dniepr. L'impact de ces sédiments est faible et diminuera encore avec la désintégration radioactive et le dépôt de nouveaux sédiments par-dessus. Ainsi, l'AIEA considère que la règle générale pour l'exploitation des réservoirs (principalement celui de Kiev) est de minimiser les opérations de dragage et les opérations mécaniques aux endroits où la contamination est la plus forte. La stratégie globale devrait être de laisser ces sédiments tels quels et d'éviter les processus qui conduiraient à leur remise en suspension [AIEA2006a].

En ce qui concerne les lacs qui n'ont pas d'entrées et de sorties régulières, ils présentent toujours un problème radiologique qui va perdurer pendant quelques décennies. Il est nécessaire d'améliorer la compréhension des processus qui s'y produisent, en particulier le transfert aux poissons. Il est également nécessaire de mieux comprendre l'inventaire du strontium-90 dans les sédiments et les processus de fixation du strontium. Le strontium-90 devient plus important avec le temps en raison de sa plus grande mobilité.

Voici quelques-unes des recommandations de l'AIEA publiées en 2006 [AIEA2006a] :

- Un canal de dérivation devrait être construit le long de la frontière entre le Bélarus et l'Ukraine, entre les communes de Krasne et de Zimovische, pour éviter l'inondation des zones fortement contaminées de la rive gauche de la rivière Pripiat.

- Le bassin de refroidissement de Tchernobyl, fortement contaminé, devrait être assaini en toute sécurité.
- Des mesures techniques doivent être prises pour empêcher une dispersion importante de radionucléides à partir des sites de stockage temporaire de déchets radioactifs dans la plaine d'inondation de la rivière Pripiat.

Plus de dix ans plus tard, à notre connaissance, aucune de ces recommandations n'a été mise en œuvre. Le démantèlement du bassin de refroidissement a commencé en 2013 et la date d'achèvement n'est pas connue [SSEChNPP2019].

3. Travaux de construction et de maintenance liés au corridor fluvial E40

3.1. Description

Toute la cascade du Dniepr est de classe de navigation V et aucun goulet d'étranglement dans la section ukrainienne de la voie navigable E40 n'est signalé. Les principaux problèmes consistent en un très mauvais état technique des écluses et du marquage des routes et en la présence de plaques de haut-fond locales. Cela nécessiterait des mesures techniques, telles que le dragage et la réduction du tirant d'eau des navires. Le rapport de faisabilité [MIG2015] mentionne qu'environ 68 000 m^3 de sédiments devraient être dragués chaque année dans le réservoir de Kiev.

La rivière Pripiat s'écoule lentement, en serpentant à travers de larges plaines inondables, se frayant un chemin en se séparant fréquemment en des branches qui se rejoignent sur plus de 250 km. Son vaste lit majeur se compose de bras morts, de marais, de buissons et de taillis. La rivière gèle à la mi-décembre et dégèle à la fin du mois de mars. Le but du projet est de créer les conditions pour assurer la navigabilité permanente du chenal pendant toute la saison de navigation pour les navires à pleine charge.

De l'embouchure (dans le lit inondé du Dniepr par le réservoir de Kiev) à la frontière ukraino-bélarusse, la longueur de la voie navigable le long de la rivière Pripiat est de 64,5 kilomètres. Pratiquement toute la section est artificielle ; elle a subi un certain nombre d'aménagements, en raison de la construction du réservoir de Kiev, de la construction du réservoir de refroidissement pour la centrale de Tchernobyl, ainsi que de la construction de structures de protection le long de la rivière après la catastrophe de Tchernobyl et en relation avec l'exploitation de la voie navigable. Cette section de la rivière Pripiat se caractérise par un flux constant de particules en suspension et de déplacements de sédiments, ce qui entraîne la formation de péninsules et d'îles le long de la rivière, suivies de zones d'ensablement. Ce processus est particulièrement intense lors des crues de printemps. Le rapport de faisabilité [MIG2015] mentionne la nécessité d'approfondir la rivière Pripiat sur 13 hauts fonds et le volume annuel de dragage dans la partie ukrainienne de la rivière est de 580 000 m^3.

En amont, sur le territoire bélarusse, la rivière coule en grande partie librement. Elle serpente et se brise fréquemment en bras morts et en branches qui se rejoignent. Afin de maintenir la navigabilité, les travaux nécessaires consistent en un dragage annuel, un renforcement des berges et un nettoyage du lit de la rivière. Pour passer à une classe de navigation supérieure, des travaux de dragage supplémentaires, le renforcement des berges, le nettoyage du lit de la rivière seront nécessaires, ainsi que l'alignement et le redressement de certaines sections de la rivière. Cela nécessitera également la construction de barrages et d'écluses supplémentaires.

Le rapport de faisabilité [MIG2015] ne mentionne aucune écluse entre la frontière ukrainienne et Mikachevitchy (Мікашэвічы) au Bélarus. Cependant, dans une présentation, le secrétaire de la Commission sur l'aménagement de la voie d'eau E40 sur le tronçon Dniepr-Vistule mentionne que 6 ou 7 barrages seront nécessaires pour assurer le contrôle de la rivière Pripiat : voir figure 7. En particulier, un barrage devrait être construit près de Narowlia (Нароўля) à l'entrée de la réserve radio-écologique de l'État de Polésie (Палескі дзяржаўны радыяцыйна-экалагічны запаведнік) et un autre juste en amont de la ville de Pripiat, dans la zone d'exclusion de Tchernobyl [E40Com2015].

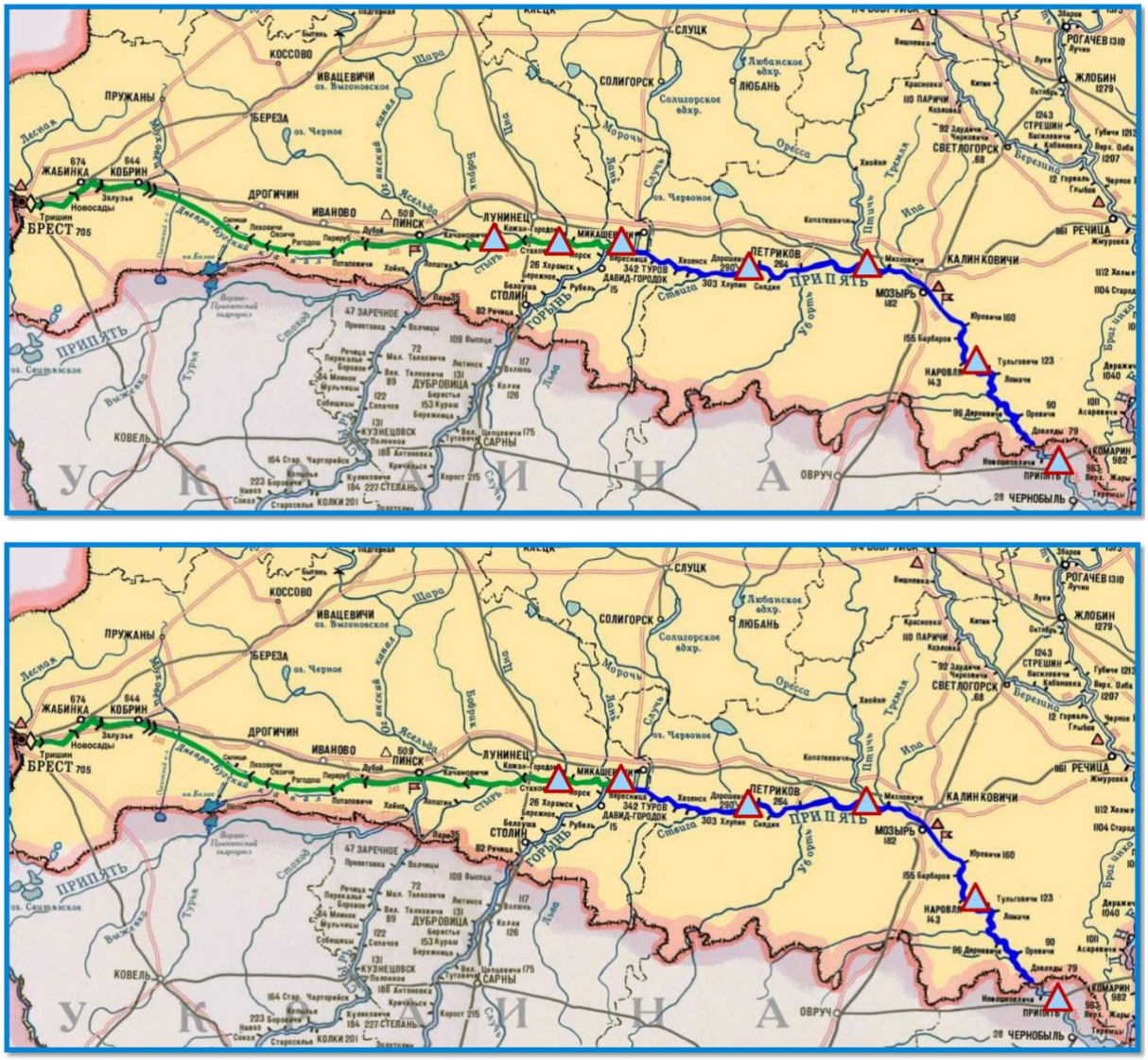

Figure 7 : *Emplacement des barrages (triangles) selon la référence [E40Com2015] : options 1 et 2. Extrait de [E40Com2015].*

La construction de barrages, ainsi que les travaux nécessaires à l'élargissement et à l'alignement de la rivière, impliquent le déplacement d'une grande quantité de sols contaminés et la construction d'autres infrastructures comme des routes. Une fois les infrastructures construites, des travaux d'entretien seront encore nécessaires pour maintenir la navigabilité. Le volume total des travaux de dragage sur le canal Dniepr-Bug et la rivière Pripiat (longueur de 315,1 km), nécessaires pour assurer une profondeur garantie de 2,6 m, serait d'environ 6,3 millions de m^3. La partie de la rivière Pripiat qui traverse la zone d'exclusion de Tchernobyl a une longueur d'environ 50 km.

L'étude de faisabilité explique que la construction d'un port de manutention des marchandises est prévue à proximité de Nizhniya Zhary (Ніжнія Жары) au Bélarus, le long du Dniepr. Le port pourrait accepter des navires ayant un tirant d'eau maximum de 3,0 m, et des navires de collecte plus petits transporteraient la cargaison pour un transbordement ultérieur. Le site se trouve entre la réserve radio-écologique d'État de Polésie et le parc paysager régional de Mizhrichynskyi en Ukraine (Міжрічинський регіональний ландшафтний парк). La section de la voie navigable du Dniepr supérieur, de l'embouchure du Pripiat jusqu'à ce projet de port, est située dans la zone d'accumulation d'eau du réservoir de Kiev. Aucune autre information n'est donnée sur l'extension du port.

D'un point de vue purement radiologique, la section la plus compliquée se trouve à proximité de la centrale nucléaire de Tchernobyl et dans la zone d'exclusion de Tchernobyl, car c'est la partie la plus contaminée du projet E40. Selon l'étude de faisabilité [MIG2015], à proximité de la centrale de Tchernobyl, la reconstruction de la voie navigable internationale E40 nécessite l'assainissement complet du bassin de refroidissement, ce qui peut prendre des années. En outre, l'étude avertit que *« si aucun ouvrage de compensation n'est mis en œuvre, il sera impossible de créer une artère de transport en eau profonde »,* mais ne dit rien sur les *« travaux de compensation ».*

Avant de détailler l'impact radiologique potentiel de tels travaux, il convient de souligner que la construction de barrages dans la zone d'exclusion de Tchernobyl provoquera une inondation permanente de terres, de marais et de lacs très contaminés et annihilera certaines des contre-mesures et des efforts d'assainissement visant à réduire l'impact des inondations. Les travaux nécessaires à l'élargissement et à l'alignement de la rivière entraîneront également l'enlèvement de sols contaminés, ce qui contaminera les rivières. Enfin et surtout, le dragage annuel va à l'encontre de la recommandation de l'AIEA de laisser les sédiments de fond en place.

3.2. Travaux de dragage

Comme les sédiments s'accumulent au fond des rivières et des chenaux, des travaux de dragage réguliers sont nécessaires pour maintenir la navigabilité des voies navigables. L'étude de faisabilité [MIG2015] donne une estimation des travaux de dragage annuels une fois la voie navigable E40 construite ou réhabilitée :

- Au réservoir de Kiev, quatre portions de la voie d'eau s'ensablent. Le volume annuel du dragage est de 68 000 m^3.
- La section de la voie d'eau du Dniepr supérieur, de l'embouchure du Pripiat jusqu'au village de Niznij Zary, est située dans la zone d'accumulation du réservoir de Kiev. 41 travaux de dragage annuels sont nécessaires dans les six endroits les plus ensablés. La quantité totale de sédiments dragués devrait être de 480 000 m^3/an.
- La partie ukrainienne de la rivière Pripiat doit être approfondie sur 13 hauts fonds. Le volume annuel de dragage de 580 000 m^3.
- Pour la partie bélarusse de la rivière Pripiat, qui passe par la partie la plus contaminée de la voie navigable, le volume annuel de sédiments dragués en amont de Mikachevitchy (Мікашэвічы) est évalué à environ 200 000 m^3. Aucune information n'est donnée pour la partie la plus contaminée de la rivière Pripiat.

Les sédiments les plus fins ont tendance à accumuler les contaminants en raison de leur nature absorbante. Étant donné que les couches profondes de sédiments sont généralement plus contaminées que les couches superficielles, le dragage entraînera une augmentation de la concentration en contaminants superficiels.

La remise en suspension de sédiments anoxiques entraîne une modification des interactions entre les particules et l'eau et une désorption des contaminants. Par conséquent, la remobilisation des contaminants associés aux sédiments peut se produire lors d'événements naturels, tels que les tempêtes, ou lors d'activités humaines comme le dragage. Le dragage entraîne le mélange de sédiments anoxiques avec des sédiments de surface biologiquement actifs. De plus, il a été démontré que la remise en suspension des sédiments accélère la désorption, la séparation et la dégradation bactérienne. Bien sûr, la biodisponibilité liée au dragage est principalement spécifique au site et dépend du degré de contamination, de la quantité de sédiments en suspension, de la durée de la perturbation et de l'organisme [Eggleton2004].

Des taux de remise en suspension allant de moins de 0,1 % à plus de 5 % ont été rapportés, car ils dépendent fortement de la nature spécifique de l'opération de dragage. Les sédiments remis en suspension par les opérations de dragage sont alors disponibles pour être transportés par les courants ambiants et induits. La modélisation doit inclure une zone de mélange initiale où les courants induits sont plus importants que les courants ambiants, une zone de champ proche avec un panache de sédiments et une zone de champ lointain [ERDC2008].

La modélisation de l'impact du dragage est extrêmement compliquée car elle dépend de nombreux paramètres qui peuvent varier d'un site à l'autre. Les travaux menés sur les impacts de la remise en suspension des sédiments pendant les activités de dragage se sont concentrés sur la biodisponibilité des contaminants. Peu de travaux ont été menés sur les processus affectant la libération des contaminants. Il ressort des données examinées qu'il existe des lacunes importantes dans notre compréhension des processus et des facteurs qui contrôlent la libération et la biodisponibilité des contaminants pendant les perturbations des sédiments [Eggleton2004]. Des études spécifiques sont nécessaires pour estimer le transfert vers les ressources halieutiques.

Aucune information n'est donnée sur le devenir des sédiments dragués de la voie navigable. Des sources d'information privées ont mentionné qu'en Ukraine, les sédiments sont évacués à proximité du Dniepr sans aucune protection particulière.

Les caractéristiques temporelles et spatiales de l'ensemble du projet doivent être prises en compte dans l'évaluation de la libération à court terme des contaminants, de leur impact et sur les conséquences et les risques à long terme.

3.3. Principaux impacts radiologiques

L'impact radiologique principal est dû aux longs travaux de construction dans la zone d'exclusion de Tchernobyl. Les travailleurs devraient recevoir la plus forte exposition aux radiations. Une partie de la contamination sera transportée par la rivière Pripiat jusqu'au Dniepr, ce qui augmentera l'impact radiologique par les différentes voies aquatiques. Comme déjà mentionné, le césium-137 sera fixé dans les sédiments supérieurs du réservoir de Kiev, tandis que le strontium-90 affectera toute la cascade du Dniepr.

De nouvelles couches de sédiments contaminés par le césium-137 seront remises en suspension chaque année lors des opérations de dragage.

En amont de la zone d'exclusion de Tchernobyl, la construction du barrage ainsi que les travaux nécessaires à l'élargissement et à l'alignement de la rivière Pripiat auront également un impact radiologique, mais à un niveau moindre que dans la zone d'exclusion. Cependant, l'agriculture et la pisciculture seront fortement touchées [FZS2019].

Aucun impact n'est attendu pour la Pologne et les autres pays européens.

4 Scénarios d'exposition et doses

4.1. Principes fondamentaux de la protection radiologique

4.1.2. Principes de la CIPR

Les dernières recommandations pour un système de protection radiologique ont été publiées en 2007 par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) [ICRP2007]. Nous en rappelons ici brièvement les principes.

L'exposition aux radiations (ou en abrégé exposition) est le processus consistant à être exposé à la fois aux radiations ou aux radionucléides. Les expositions aux rayonnements sont nocives : les doses élevées provoquent des effets déterministes, souvent de nature aiguë, qui n'apparaissent que si la dose dépasse une valeur seuil. Les doses élevées et les doses faibles peuvent provoquer des effets stochastiques (cancer ou effets héréditaires), qui peuvent être observés sous la forme d'une augmentation statistiquement détectable de l'incidence de ces effets longtemps après l'exposition.

Les expositions considérées dans cette étude donnent lieu à de faibles doses pour lesquelles on suppose que l'augmentation de l'incidence des effets stochastiques est proportionnelle à l'augmentation de la dose de rayonnement par rapport au bruit de fond. Il s'agit du modèle dit linéaire sans seuil (LSS), considéré par la Commission comme la meilleure approche pratique pour gérer les risques liés à l'exposition aux rayonnements.

La principale implication politique du modèle LSS est qu'un certain risque fini, aussi petit soit-il, doit être assumé et un niveau de protection doit être établi sur la base de ce qui est jugé acceptable. Cela conduit au système de protection de la Commission avec ses trois principes de protection fondamentaux :

- Le principe de justification : toute décision qui modifie la situation d'exposition aux rayonnements devrait faire plus de bien que de mal.
- Le principe d'optimisation de la protection : la probabilité de subir une exposition, le nombre de personnes exposées et l'importance de leurs doses individuelles doivent tous être maintenus au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociétaux.
- Le principe de limitation de la dose : La dose totale reçue par un individu provenant de sources réglementées dans des situations d'exposition prévues autres que l'exposition médicale des patients ne doit pas dépasser les limites appropriées spécifiées par la Commission.

En outre, la Commission a identifié trois types de situations d'exposition qui sont destinés à couvrir toute la gamme des situations d'exposition :

- Les situations d'exposition planifiée, qui sont des situations impliquant l'introduction et l'exploitation planifiées de sources.
- Les situations d'exposition d'urgence, qui sont des situations inattendues telles que celles qui peuvent survenir pendant le déroulement d'une situation planifiée, ou à la suite d'un acte de malveillance, nécessitant une attention urgente.
- Les situations d'exposition existantes, qui sont des situations d'exposition qui existent déjà lorsqu'une décision de contrôle doit être prise, telles que celles résultant d'événements et d'accidents passés.

Les situations d'exposition d'urgence ne sont évidemment pas pertinentes dans le cas présent. L'exposition des travailleurs envoyés dans la zone d'exclusion de Tchernobyl pour des activités liées à la voie navigable E40 doit être considérée comme des situations d'exposition planifiées. Cependant, les populations locales des zones non évacuées touchées par la contamination radioactive sont confrontées à des situations d'exposition existantes. Dans ce dernier type de situation, des stratégies de protection doivent être mises en œuvre de manière progressive au fil des ans dans le but de diminuer les expositions.

Les principes de justification et d'optimisation s'appliquent dans les trois situations d'exposition, tandis que le principe d'application des limites de dose ne s'applique qu'aux doses qui devraient être encourues avec certitude à la suite de situations d'exposition planifiées.

La justification implique de déterminer si une activité planifiée impliquant des rayonnements est, dans l'ensemble, bénéfique pour les individus et la société et si elle l'emporte sur les dommages qui en résultent. En cas de situation d'exposition existante, l'introduction ou la poursuite de l'action corrective devrait l'emporter sur son coût et sur tout dommage ou préjudice qu'elle cause. Cette position peut être en conflit avec le droit individuel à la santé de la Déclaration universelle des droits de l'homme : *« toute personne a droit à un niveau de vie suffisant pour assurer sa santé, son bien-être et ceux de sa famille »* [ACRO2019]. Elle a également été critiquée par Anand Grover, rapporteur spécial du Conseil des droits de l'homme des Nations unies, qui a noté dans son rapport sur Fukushima : *« Les recommandations de la CIPR sont basées sur les principes d'optimisation et de justification, selon lesquels toutes les actions du gouvernement devraient être fondées sur la maximisation du bien par rapport au détriment. Une telle analyse risque-bénéfice n'est pas en accord avec le cadre du droit à la santé, car elle donne la priorité aux intérêts collectifs sur les droits individuels. Dans le cadre du droit à la santé, le droit de chaque individu doit être protégé. En outre, ces décisions, qui ont un impact à long terme sur la santé physique et mentale des personnes, devraient être prises avec leur participation active, directe et effective »* [HRC2013].

Ainsi, l'étude d'impact radiologique du projet de voie navigable E40 qui reste à faire par ses promoteurs et ses partisans devrait inclure sa justification par rapport à d'autres moyens de transport tels que le chemin de fer. Elle devrait également expliquer comment le principe d'optimisation est appliqué, et fournir une évaluation de la dose individuelle des personnes les plus exposées pour garantir que chaque individu est suffisamment protégé.

La publication 111 de la CIPR fournit des orientations sur l'application de ses recommandations pour la protection des personnes vivant dans des zones contaminées à long terme après un accident nucléaire [ICRP2009]. Bien qu'elle n'envisage pas explicitement le cas d'un grand projet qui affecte de manière

significative l'impact radiologique de la contamination existante, les recommandations fondamentales de la CIPR s'appliquent toujours. En particulier, les efforts doivent être maintenus pour atteindre des expositions proches ou similaires à celles des situations normales. La CIPR n'envisage aucune augmentation de l'exposition dans une situation post-accidentelle. En outre, la Commission souligne que les autorités devraient impliquer les parties prenantes.

En particulier, dans le cas d'une situation d'exposition existante, la Commission recommande que les personnes concernées reçoivent des informations générales sur la situation d'exposition et les moyens de réduire leurs doses. Cela se justifie par le fait que les modes de vie individuels sont des facteurs ayant une grande influence sur l'exposition. Cela suppose que les personnes concernées soient pleinement conscientes de la situation et bien informées. Ainsi, toute modification de l'exposition doit être bien annoncée.

De même, la qualité radiologique des denrées alimentaires peut être gérée par de nombreuses actions de protection visant à réduire le transfert de radioéléments dans toute la chaîne alimentaire, de la ferme à l'assiette.

4.1.2. Implication des parties prenantes et participation du public

La convention d'Aarhus sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement, exige que *« chaque Partie [prennne] des dispositions pour que la participation du public commence au début de la procédure, c'est-à-dire lorsque toutes les options et solutions sont encore possibles et que le public peut exercer une réelle influence ».* En outre, *« chaque Partie veille à ce que, au moment de prendre la décision, les résultats de la procédure de participation du public soient dûment pris en considération. ».* Cette consultation devrait être transfrontière, comme l'exige la convention d'Espoo.

Concernant le cas particulier d'une situation dite existante qui se produit après une catastrophe nucléaire, la CIPR vient de soumettre une mise à jour de ses publications 109 et 111 à la consultation publique [ICRP2019] dans laquelle elle souligne l'importance cruciale d'impliquer les parties prenantes dans la mise en œuvre du processus d'optimisation. Pour la protection du public et de l'environnement pendant le processus de réhabilitation, la Commission recommande une approche de "co-expertise" dans laquelle les autorités, les experts et les parties prenantes travaillent ensemble pour partager leur expérience et informations dans les communautés touchées, avec pour objectif de développer une culture pratique de protection radiologique afin de permettre aux individus de prendre des décisions éclairées sur leur propre vie. Lors du processus de sélection des mesures de protection, la Commission recommande que les points de vue et les préoccupations des parties prenantes soient pris en compte.

Pendant le processus de réhabilitation, l'évolution et la durabilité des activités économiques exigent que la surveillance radiologique des employés, de l'environnement de travail et des produits soit maintenue et adaptée en fonction des attentes des différentes parties prenantes. Cette surveillance devrait contribuer à la vigilance à long terme, permettant de confirmer la qualité des conditions de travail et de production, ainsi que la mise en œuvre d'actions de protection si nécessaire.

Ces recommandations sont très contraignantes pour les Etats qui doivent les appliquer dans le cadre du projet de la voie navigable E40 pour sa partie qui traverse les territoires contaminés.

4.1.3. Limites de dose et niveaux de référence

La dose efficace est destinée à être utilisée comme quantité de protection. Les doses équivalentes de la personne de référence sont utilisées pour le calcul de la dose efficace en multipliant ces doses par les facteurs de pondération tissulaire correspondants.

Le niveau de référence pour l'optimisation de la protection des personnes vivant dans des zones contaminées doit être choisi dans la partie inférieure de la bande de 1 à 20 mSv/an recommandée dans la publication 103 de la CIPR [ICRP2007]. Jusqu'où ces recommandations doivent-elles être appliquées ? La CIPR ne donne aucune indication claire. Toutefois, elle affirme que l'expérience passée a démontré qu'une valeur typique utilisée pour limiter le processus d'optimisation dans les situations post-accidentelles à long terme est de 1 mSv/an.

En outre, la CIPR ajoute que le fait que les expositions aient été réduites au-dessous du niveau de référence n'est pas une condition suffisante pour mettre fin aux actions de protection tant qu'il est possible de réduire davantage les expositions conformément au processus d'optimisation. La poursuite de ces actions peut être un mécanisme essentiel pour maintenir les expositions à un niveau proche ou similaire à celui des situations normales, comme le recommande la Commission [ICRP2009]. C'est pourquoi, dans cette étude, nous retiendrons un niveau de référence de 1 mSv/an, en gardant à l'esprit que la justification et l'optimisation doivent être considérées en premier lieu.

Pour les travailleurs exposés à des expositions planifiées, les recommandations internationales limitent la dose effective à 100 mSv sur une période de cinq années civiles consécutives, sous réserve d'une dose équivalente maximale de 50 mSv par année civile. L'Union européenne a strictement limité l'exposition des travailleurs à 20 mSv/an, sauf dans des circonstances particulières[8]. Dans cette étude, nous retiendrons la limite européenne.

4.2. Estimation de la dose actuelle due à la contamination du bassin versant du Dniepr

Les voies d'exposition humaine comprennent l'exposition externe par dépôt de radionucléides émetteurs gamma et l'exposition interne par ingestion d'aliments et d'eau potable contaminés ainsi que par inhalation de radioéléments en suspension dans l'air. Nous nous concentrerons ici sur la voie aquatique résultant de la consommation d'eau potable, de poissons et de produits agricoles irrigués par de l'eau contaminée. L'abreuvage du bétail et l'inondation de terres agricoles peuvent également entraîner une exposition humaine par voie terrestre. Toutes ces voies d'exposition doivent être prises en compte pour évaluer la dose due à la contamination du bassin versant du Dniepr.

[8] Directive 2013/59/EURATOM du Conseil du 5 décembre 2013, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013L0059

L'évaluation des doses individuelles à partir de concentrations environnementales connues est relativement simple. La dose est le produit de la concentration, de la consommation et du facteur de dose. L'estimation de la dose est plus difficile lorsque la concentration dans l'environnement n'est pas connue et doit être estimée. C'est généralement le cas pour les études de l'évaluation des risques et des doses de Tchernobyl. En général, presque toutes les estimations de dose de rayonnement ont été effectuées à l'aide des modèles numériques basés sur les recommandations et les paramètres établis au niveau international.

Une étude de 1994 [PNL1994] note qu'aucune des études précédentes n'avait analysé la dose intégrale et le risque pour la santé de la population dus à toutes les voies d'accès en lien avec l'utilisation d'eau du système en cascade du Dniepr. Les différences de résultats entre les études précédentes reflètent la grande incertitude liée à la contamination des différentes espèces de poissons. L'étude de 1994 [PNL1994] n'analyse pas toutes ces questions. Cependant, elle a relevé certains problèmes méthodologiques et sources d'incertitude afin d'atténuer ces problèmes pour les futures études sur Tchernobyl.

L'AIEA [IAEA2006b] rapporte que les doses estimées dues au césium-137 et au strontium-90 dans le système de réservoirs du Dniepr ont été calculées sur la base des données de surveillance et des prévisions de la fréquence des inondations. Le pire scénario d'une série de fortes inondations au cours de la première décennie suivant l'accident (1986-1995) a été supposé. Les estimations ont montré que les doses individuelles par voie aquatique n'auraient pas dépassé 1 à 5 µSv/an. Cependant, comme nous le verrons plus loin, une telle affirmation est contredite par les résultats de l'évaluation des doses pour l'année 1999 qui conduisent à des valeurs plus élevées.

Le système aquatique le plus important (le bassin du Dniepr) occupe une vaste zone avec une population d'environ 32 millions de personnes qui utilisent l'eau pour la boisson, la pêche et l'irrigation. Ainsi, des estimations de la dose collective reçue par les personnes provenant de ces trois voies ont été effectuées sur une période de 70 ans après l'accident (c'est-à-dire de 1986 à 2056).

Les estimations de doses collectives consistent à calculer la dose d'une personne de référence et à la multiplier par le nombre de personnes exposées. Une telle évaluation repose sur une modélisation qui ne nécessite pas une grande précision puisque les fluctuations sont lissées en faisant la moyenne sur la durée et les populations. Le calcul de la dose individuelle nécessite des évaluations plus fines afin d'estimer la gamme des valeurs possibles en fonction des hypothèses utilisées. Ainsi, la littérature et les revues scientifiques fournissent principalement des doses collectives. Cela évite également de publier les doses reçues par les groupes les plus à risque.

Selon l'AIEA [AIEA2006b], les estimations de dose pour le bassin du Dniepr montrent que si aucune mesure n'avait été prise pour réduire les flux de radioéléments vers le fleuve, la dose collective engagée pour la population de l'Ukraine aurait pu atteindre 3 000 hommes.Sv sur une période de 70 ans après l'accident. La contribution du ^{137}Cs à la dose d'exposition est principalement limitée aux régions du nord de l'Ukraine. Mais en raison de la distribution relativement uniforme du ^{90}Sr dans la cascade de réservoirs du Dniepr, sa contribution à la dose collective attendue de la population est relativement uniforme. Les mesures de protection prises en 1992-1993 dans la plaine d'inondation de la rive gauche de la rivière Pripiat ont permis de réduire l'exposition d'environ 700 hommes.Sv. D'autres mesures de protection prises sur la rive droite dans la zone d'exclusion de Tchernobyl (au cours de la période 1999-2001) ont encore réduit les doses collectives de 200 à 300 hommes.Sv. Ainsi, la dose collective sur 70 ans estimée par l'AIEA est d'environ

2 000 hommes.Sv. Il est à noter qu'aucune indication n'est donnée sur l'impact des travaux de construction eux-mêmes.

Trois voies aquatiques contribuent à la dose collective : l'eau potable, la consommation de poissons et l'irrigation. Selon l'AIEA [IAEA2006a], la répartition en pourcentage selon l'utilisation de l'eau pour la population de la région de Kiev donne une contribution égale de ces trois voies. Pour la population de Crimée, l'impact de la consommation de poisson est négligeable par rapport aux deux autres voies. Dans la région de Poltava, la voie de consommation du poisson domine la dose collective associée aux voies aquatiques. En 2006, la dose collective annuelle était d'environ 8 hommes.Sv pour la région de Kiev, 4 hommes.Sv pour la région de Poltava et 5 hommes.Sv pour la région de Crimée.

Ces résultats montrent l'importance que tout travail de construction dans les zones contaminées peut avoir sur la dose collective des habitants du bassin versant du Dniepr. Les travaux mentionnés dans l'étude de l'AIEA ont été conçus pour réduire les doses. Les travaux de construction liés au projet E40 augmenteront les doses. Une évaluation des doses liées aux travaux qui devraient être effectués pour la voie navigable E40 est donc nécessaire.

4.3. Estimation des doses d'exposition liée à la voie navigable E40

4.3.1 Travailleurs dans la zone d'exclusion de Tchernobyl

Les grands travaux liés à la voie navigable E40 dans la partie la plus contaminée de la zone d'exclusion de Tchernobyl, comme la construction de barrages, nécessiteront de nombreux travailleurs qui seront exposés à la forte contamination du sol par plusieurs radioéléments. Les voies d'exposition sont dominées par l'exposition externe et l'inhalation de poussières radioactives.

L'exposition externe est largement dominée par la contamination du sol par le césium-137, car il s'agit d'un émetteur gamma. L'américium-241, qui est également un émetteur gamma, présente des niveaux de contamination du sol plus faibles et un facteur de dose plus faible en raison de la faible énergie du rayonnement. Les estimations en matière de radioprotection des travailleurs sont généralement basées sur une charge de travail de 2 000 heures par an. Les contaminations surfaciques du sol observées dans la zone d'exclusion de Tchernobyl vont de 555 à 3 700 kBq/m^2 pour le césium-137. Elles induisent des niveaux d'exposition allant de 2 à 15 mSv/an. Les facteurs de conversion sont tirés de [Saito2012, ICRP2018].

Pour évaluer l'exposition liée à l'inhalation de poussières, nous devons choisir un facteur de remise en suspension pour convertir la contamination des dépôts de surface en Bq/m^2 en concentration dans l'air en Bq/m^3. Les facteurs de remise en suspension mesurés dans les zones contaminées par l'accident de Tchernobyl [Hatano2003] n'incluent pas les perturbations mécaniques. Une étude [Sehmel1980] mentionne que les facteurs de remise en suspension d'origine mécanique s'étendent sur sept ordres de grandeur, de 10^{-10} à plus de 10^{-2} m^{-1}. Dans cette étude, nous avons retenu 10^{-6} m^{-1} qui est utilisé en France en cas de perturbation mécanique comme le labour. Cela correspond également au facteur de remise en suspension précoce recommandé par Public Health England après un accident nucléaire [PHE2019].

Avec un débit respiratoire de 1,2 m^3/h et les facteurs de conversion de la CIPR [ICRP2012], les doses efficaces annuelles estimées pour les principaux contaminants sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1 : *Doses effectives annuelles dues à l'inhalation pour les travailleurs dans la zone d'exclusion de Tchernobyl*

Radioélément	Cesium-137	Strontium-90	Plutonium	Americium-241
Contamination surfacique des sols	550 à 3 700 kBq/m^2	200 à 750 kBq/m^2	1 à 40 kBq/m^2	1 à 100 kBq/m^2
Dose effective	9 à 60 µSv/y	14 à 54 µSv/y	72 à 2 880 µSv/y	72 à 7 200 µSv/y

En raison de la grande incertitude sur le facteur de remise en suspension, l'exposition par inhalation pourrait être encore plus élevée. Avec des facteurs plus pessimistes, la voie d'inhalation pourrait dominer l'exposition des travailleurs. Cependant, elle peut être réduite avec des masques de protection. Ce n'est pas le cas pour l'exposition externe.

Finalement, l'exposition externe des travailleurs pourrait atteindre des niveaux supérieurs à 10 mSv/an et être proche de la limite européenne fixée à 20 mSv/an. Des scénarios pessimistes incluant une contamination interne pourraient conduire à des valeurs proches de la limite. Ces valeurs sont importantes par rapport à l'exposition des travailleurs du nucléaire :

- Les travailleurs du nucléaire français ont reçu une dose d'exposition externe moyenne de 1,4 mSv en 2018. 236 des 86 702 travailleurs du nucléaire ont été exposés à une dose externe supérieure à 10 mSv en 2018 [IRSN2019].
- À la centrale nucléaire de Fukushima dai-ichi au Japon, les travailleurs ont été exposés à une dose moyenne de 1,6 mSv/an depuis avril 2016. La dose la plus élevée enregistrée est de 79,90 mSv sur 42 mois (3,5 ans) [TEPCO2019].

4.3.2. Contamination des eaux du Dniepr

Les populations vivant en aval du bassin versant du Pripiat seront exposées à des risques supplémentaires pendant les travaux de construction dans la zone d'exclusion de Tchernobyl. Une fois les infrastructures terminées, le dragage annuel augmentera le niveau de contamination des eaux du Dniepr. La modélisation de ces activités est presque impossible sans aucun détail sur les travaux prévus et l'emplacement précis du dragage. Par conséquent, nous considérerons que les travaux lourds dans la zone d'exclusion de Tchernobyl auront un impact similaire à celui des inondations de 1999 qui ont emporté des radioéléments du lit majeur du Pripiat.

Le rapport de l'AIEA [IAEA2006a] donne les estimations de la dose collective pour trois voies d'exposition en 1999. Le strontium-90 domine pour les trois voies, à savoir l'ingestion d'eau du robinet, d'aliments irrigués et de poissons, sauf pour le réservoir de Kiev où le césium-137 domine la voie d'ingestion des poissons. Les données de concentration disponibles dans les rapports de l'AIEA permettent de vérifier facilement les doses liées aux voies d'ingestion de l'eau du robinet et de poissons.

D'une part, l'AIEA rapporte [IAEA2006a] qu'en 1999, l'eau du robinet bue par 8,25 millions de personnes a entraîné une dose collective de 4,5 hommes.Sv. Aux deux extrêmes de la cascade du Dniepr, la dose individuelle moyenne en 1999 déduite des doses collectives de l'AIEA est de 1,32 µSv à Kiev et de 0,52 µSv à Kakhovka. D'autre part, la figure 6 indique que le strontium-90 domine la contamination de l'eau du réservoir de Kiev. En considérant une concentration moyenne de 50 Bq/m3 comme niveau de référence et de 400 Bq/m3 pour 1999, un habitant de Kiev consommant 2 litres par jour, y compris pour la cuisine, serait exposé à une dose annuelle de 1 µSv durant une année ordinaire et de 8 µSv en 1999, pour le seul strontium-90. Les doses devraient être similaires à l'autre extrémité de la cascade. Les facteurs de conversion de la CIPR [ICRP2012] ont été utilisés. Ces calculs simples conduisent à des doses plus élevées que celles estimées par l'AIEA. Pour la population buvant l'eau potable provenant du réservoir de Kiev, il faut ajouter la contribution du césium-137 : la figure 6 indique une concentration moyenne de 30 Bq/m3 comme niveau de référence et 150 Bq/m3 pour 1999. Ces niveaux de contamination entraînent une dose supplémentaire de 0,28 µSv pour une année ordinaire et de 1,4 µSv en 1999.

En ce qui concerne la consommation de poissons, l'AIEA [IAEA2006a] mentionne une prise totale de 25 000 tonnes en 1999 qui a conduit à une dose collective de 0,95 homme.Sv. L'AIEA estime que le césium-137 présent dans les 1 520 tonnes de poissons du réservoir de Kiev a entraîné une dose collective de 0,15 homme.Sv. En supposant que seule la moitié du poids total pêché est consommée, cela signifie que chaque kilogramme de chair de poisson provenant du réservoir de Kiev a entraîné une dose de 0,2 µSv.

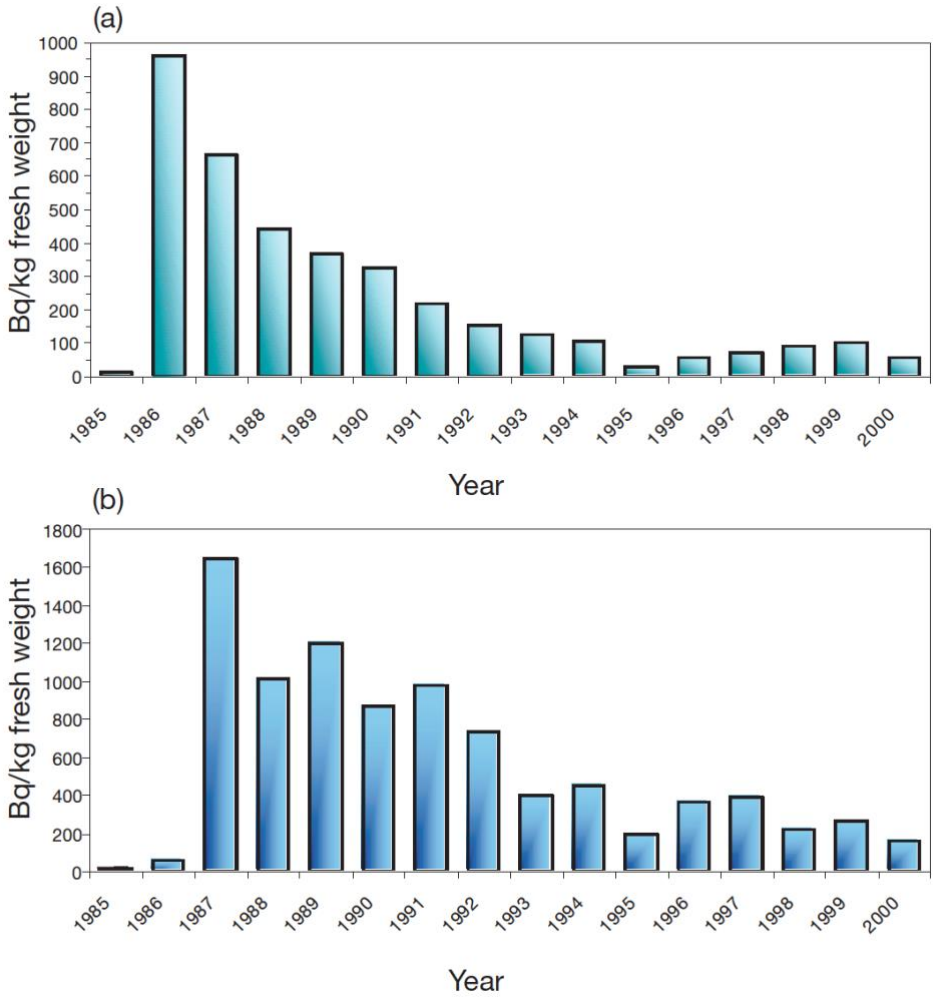

Figure 8 : *Activité moyenne en ^{137}Cs chez les poissons non prédateurs (brème (a)) et prédateurs (brochet (b)) du réservoir de Kiev. Figure reproduite de [IAEA2006b].*

La figure 8, reproduite de [AIEA2006b], indique les concentrations moyennes en ^{137}Cs dans les poissons capturés dans le réservoir de Kiev au cours des années. Le même rapport indique qu'en 2002-2003, le ^{90}Sr dans les poissons des réservoirs de la cascade du Dniepr n'était que de 1 à 2 Bq/kg. Dans la cascade du Dniepr en Ukraine, la pêche commerciale capture plus de 20 000 tonnes de poisson par an [AIEA2006b]. En 2017, les pêcheurs ont capturé plus de 1 200 tonnes de poissons dans le réservoir de Kiev.

La concentration de césium-137 varie de 50 Bq/kg chez les poissons non prédateurs en 2000 à 300 Bq/kg chez les poissons prédateurs en 1999. En supposant une concentration moyenne de 100 Bq de césium-137 par kg de poisson frais, le facteur de conversion de la CIPR [ICRP2012] et une consommation annuelle de 10 kg de poisson (200 g par semaine), on obtient une dose efficace de 14 µSv/an. Les gros consommateurs de poisson, comme les pêcheurs, peuvent manger 40 kg de poisson par an (consommation annuelle retenue pour les pêcheurs en France) et être exposés à une dose interne de 56 µSv/an. Selon ce calcul, chaque kilogramme de chair de poisson entraîne une dose de 1,6 µSv. Une fois de plus, ce résultat est supérieur à celui de l'AIEA. Notre calcul montre que la voie d'ingestion du poisson peut être significative pour une partie de la population. Les travaux pour la voie navigable E40 et les activités de dragage entraîneront des doses encore plus élevées.

Sans données spécifiques relatives aux pratiques agricoles et à la consommation, nous ne pouvons pas évaluer la voie liée à l'irrigation. Cependant, l'estimation de l'AIEA [IAEA2006a] montre que c'est la voie dominant la dose collective en raison du grand nombre de personnes exposées : la production de cultures et de lait le long de la cascade du Dniepr a conduit à une dose collective de 21,9 hommes.Sv en 1999. Comme environ 20 millions d'Ukrainiens mangent des aliments irrigués, une telle valeur correspond à une dose individuelle moyenne de 1 µSv pour cette même année. En fonction des régimes alimentaires, les doses individuelles pourraient être beaucoup plus importantes. De plus, l'estimation de l'AIEA ne prend en compte que le strontium et le césium dans les cultures et le lait. D'autres types d'aliments y contribuent également. À l'avenir, l'américium-241 y contribuera aussi. Ainsi, des doses individuelles de l'ordre de 10 µSv/an dues à l'irrigation sont crédibles. Elles pourraient être encore plus importantes pour les agriculteurs.

Si les sédiments provenant du dragage sont appliqués comme engrais dans les champs, ils contribueront également à la dose interne. Pour estimer l'impact d'une telle voie, nous avons supposé que les sédiments sont en équilibre avec la contamination de l'eau. En ne considérant que les légumes feuilles et racines et les coefficients de transfert recommandés par l'AIEA [IAEA2010], nous obtenons une dose de 14 µSv/an pour le strontium-90 et le césium-137. Nous avons également supposé un régime alimentaire avec 60% d'autoconsommation. Ce calcul surestime la dose car nous n'avons pas pris en compte la dilution des sédiments appliqués dans le sol, mais il la sous-estime également en négligeant d'autres types d'aliments comme les céréales, les produits laitiers et la viande.

Finalement, les trois voies aquatiques pourraient conduire à des doses individuelles supérieures à 10 µSv au cours d'une seule année, en cas d'inondation ou de travaux lourds dans les zones contaminées. 30 µSv est une valeur crédible. En considérant une exposition initiale de 10 µSv/an, l'exposition cumulée sur 15 ans serait alors d'environ 126 µSv, compte tenu de la décroissance radioactive du césium-137 et du strontium-90, qui ont tous deux une demi-vie de 30 ans. Ainsi, pour une dose initiale de 30 µSv/an tenant compte des trois voies aquatiques, l'exposition cumulée sur 15 ans atteindrait alors près de 400 µSv.

4.3.3. En amont de la zone d'exclusion de Tchernobyl

En amont de la zone d'exclusion de Tchernobyl, nous avons choisi une zone proche du village de Lakhva (Лахва) pour deux raisons : un barrage pourrait être construit à proximité et le niveau de contamination du sol par le césium 137 varie de 40 à 185 kBq/m2. Voir la carte la plus récente de l'oblast de Brest en annexe.

L'eau de la rivière Pripiat n'est pas utilisée pour la consommation. Ainsi, la seule voie d'exposition interne est liée à la consommation de poisson.

La pêche est bien développée dans la rivière Pripiat. Plusieurs parties de la rivière sont contrôlées par des sociétés d'État qui pratiquent la pêche commerciale et vendent des licences pour la pêche récréative. La plus grande de ces sociétés (le syndicat des sociétés de pêche de Gomel) capture jusqu'à 500 tonnes de poisson par an (dans le bassin du Pripiat et du Dniepr). La pêche en rivière représente 20 % de l'ensemble de la pêche commerciale. Le reste du poisson est pêché dans des fermes piscicoles, également propriété de l'État. Le poisson est élevé dans des lacs artificiels créés à cet effet. Avant la vente, les niveaux de radioactivité sont vérifiés dans le poisson, mais les données ne sont pas disponibles.

En 2018, l'entreprise de pisciculture de Lakhva a produit 211 tonnes de poisson[9]. Cependant, le niveau de contamination n'est pas public. Une quantité considérable de poissons, difficile à estimer, est pêchée par des pêcheurs non professionnels (amateurs), la population locale et des braconniers directement dans la rivière Pripiat. Selon le ministère des statistiques et de l'analyse du Bélarus, la quantité de poissons pêchés par les pêcheurs non professionnels est estimé à 8 000 tonnes en 2010 [FII2014].

Dans la rivière Pripiat, les niveaux de contamination en ^{137}Cs dans les poissons restent entre 5 et 250 Bq/kg. Les poissons des lacs fermés pourraient présenter des concentrations plus élevées. Le niveau maximal autorisé pour les aliments commerciaux au Bélarus est de 370 Bq/kg. Les poissons capturés par les amateurs ne sont pas contrôlés et peuvent avoir une concentration plus élevée. Une consommation annuelle de 10 kg de poisson (200 g par semaine) à ce niveau maximal autorisé de contamination entraînerait une dose efficace de 50 µSv/an. Et avec une consommation annuelle de 40 kg de poisson généralement considérée pour les pêcheurs, la dose efficace serait de 200 µSv/an.

Il est difficile d'évaluer l'impact des travaux de construction sur la contamination du poisson dans la rivière Pripiat, mais la dose d'exposition effective due à la voie de consommation du poisson devrait rester inférieure aux valeurs précédentes si la contamination maximale autorisée dans les aliments est respectée. Cette dose est ajoutée aux autres contributions, telles que la dose externe due à la contamination du sol et la dose interne due aux autres aliments. Les populations locales sont déjà exposées à ces voies.

9 https://media-polesye.by/news/opytnyy-rybhoz-lahva-stremitsya-vyyti-na-bezubytochnuyu-rabotu-55752

5 Conclusions

Tchernobyl est l'accident industriel le plus grave de l'histoire. Plus de 30 ans plus tard, la contamination radioactive résiduelle est telle qu'elle interdit de vivre dans une zone d'exclusion étendue. Aujourd'hui, la contamination est dominée par le césium-137, le strontium-90 et divers isotopes du plutonium hautement toxique. L'américium-241, le noyau fils du plutonium-241, est également très toxique et sa contribution croissante devrait dominer l'impact radiologique à l'avenir. La stratégie générale consiste à attendre la lente décroissance radioactive et la réhabilitation de la zone d'exclusion de Tchernobyl demeure impossible pendant des décennies. Le démantèlement du bassin de refroidissement de Tchernobyl - le point chaud le plus radioactif - est la seule exception. Il existe également environ 90 sites de stockage de déchets radioactifs dans la zone d'exclusion de Tchernobyl qui doivent encore être démantelés.

Au-delà de la zone d'exclusion, la vie quotidienne de millions de personnes est toujours affectée par la contamination résiduelle. L'ensemble du bassin versant Pripiat-Dniepr a été contaminé par les retombées et les transferts directs dans la rivière. En aval de la zone d'exclusion de Tchernobyl, environ 8 millions d'Ukrainiens boivent l'eau du Dniepr, et jusqu'à 20 millions mangent des aliments irrigués avec cette eau. Les principaux contaminants sont le césium-137 qui tend à se fixer dans les sédiments de fond et le strontium-90 qui est continuellement transporté vers la mer Noire par la cascade du Dniepr. Les sédiments contaminés par le césium-137 ont été lentement recouverts par des sédiments moins contaminés et plus propres au fond du réservoir de Kiev, offrant un bouclier naturel à ce polluant. L'AIEA recommande, comme stratégie globale, de laisser ces sédiments en place et d'éviter tous processus qui conduiraient à leur remise en suspension. Pour le strontium-90, rien ne peut être fait.

En amont de la zone d'exclusion de Tchernobyl, il existe des zones le long de la rivière Pripiat qui ont été contaminées par les retombées radioactives au moment de l'accident. Le césium-137 est le contaminant dominant. La stratégie globale consiste également à attendre sa lente désintégration radioactive.

La CIPR considère ces situations comme des situations existantes pour lesquelles elle recommande un processus d'optimisation visant à retrouver les niveaux d'exposition prévalant avant l'accident. Les mesures de protection consistent principalement à adapter la vie quotidienne des habitants des territoires contaminés, car les modes de vie individuels sont des facteurs influents de l'exposition. Cela suppose que les personnes touchées soient pleinement conscientes de la situation et bien informées.

La convention d'Aarhus exige également que les États veillent à ce que les informations environnementales soient disponibles dans des bases de données électroniques facilement accessibles au public. Actuellement, ce n'est pas le cas. Il est très difficile d'accéder aux données sur la contamination radioactive afin d'évaluer les doses d'exposition.

Dans un tel contexte, la voie navigable intérieure E40 projetée, qui devrait passer à proximité de la centrale nucléaire de Tchernobyl et traverser la zone d'exclusion de Tchernobyl, aura nécessairement un impact radiologique sur les travailleurs de la construction et de la maintenance, ainsi que sur la population en aval qui dépend de l'eau des rivières Pripiat et Dniepr. Bien que ce projet nécessite de grands travaux tels que

la construction d'un barrage et l'alignement du cours de la rivière dans la partie la plus contaminée de son cours, aucune étude d'impact radiologique n'est disponible.

Les principes de la CIPR en matière de radioprotection et les conventions d'Aarhus et d'Espoo exigent des études environnementales et radiologiques, une justification du projet et la participation des parties prenantes et du grand public au processus de décision.

La présente étude montre que les travaux de construction pour la partie de la voie navigable E40 qui traverse la zone d'exclusion de Tchernobyl et passe à proximité de la centrale nucléaire ne sont pas réalisables. L'exposition estimée des travailleurs serait trop élevée pour être acceptée. En outre, le bassin de refroidissement de Tchernobyl, fortement contaminé, et les stockages temporaires de déchets radioactifs dans la plaine d'inondation de la rivière Pripiat n'ont pas encore été démantelés, ce qui empêche tout travail de construction. L'AIEA recommande également une liste d'autres mesures de protection qui restent à mettre en œuvre.

La partie de la voie navigable E40 qui se trouve en amont de la zone d'exclusion de Tchernobyl serait alors inutile, car sans connexion avec le Dniepr. Cela signifie également que les travaux d'aménagement qui consistent en la construction de plusieurs barrages et l'alignement des méandres de la rivière Pripiat pour accepter les navires de classe V ne sont pas justifiés.

Enfin, la portion de la route E40 allant de la mer Noire au réservoir de Kiev nécessite principalement des travaux de dragage réguliers. L'étude de faisabilité mentionne 68 000 m^3 de travaux de dragage par an dans le réservoir de Kiev, qui stocke du césium-137 dans ses sédiments de fond. Une telle activité est contraire aux recommandations de l'AIEA de laisser les sédiments en place car elle augmentera la dose des personnes qui dépendent de l'eau du réservoir de Kiev pour leur approvisionnement en eau et en nourriture.

Bibliographie

Littérature grise :

[ACRO2019] ACRO, Radiological Protection of People and the Environment in the Event of a Large Nuclear Accident, ACRO's comments on the ICRP draft report, 2019
https://www.acro.eu.org/protection-radiologique-des-personnes-et-de-lenvironnement-en-cas-daccident-nucleaire-grave-radiological-protection-of-people-and-the-environment-in-the-event-of-a-large-nuclear-accident/#en

[E40Com2015] Andrey Rekesh, Secretary of the Commission on the development of the E40 waterway on the Dnieper-Vistula section, Restoration of the international waterway E40, presentation to the 59th session, November 2015
https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2015/sc3wp3/Presentation_S3_59th_session_-_Restoration_of_the_international_waterway_E40.pdf

[ERDC2008] Todd S. Bridges, Stephen Ells, Donald Hayes, David Mount, Steven C. Nadeau, Michael R. Palermo, Clay Patmont, and Paul Schroeder, Engineer Research and Development Center, Dredging Operations and Environmental Research Program - The Four Rs of Environmental Dredging: Resuspension, Release, Residual, and Risk, prepared for the U.S. Army Corps of Engineers, ERDC/EL TR-08-4, 2008
https://semspub.epa.gov/work/01/287028.pdf

[FII2014] Fish Industry Institute (Институт рыбного хозяйства), Belarus Fish Industry Problems: collection of scientific papers (ВОПРОСЫРЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА БЕЛАРУСИ: Сборник научных трудов), 2014
http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BY2017000750

[FZS2019] Mateusz Grygoruk, Ewa Jabłońska, Pawel Osuch and Pawel Trandziuk, Analysis of selected possible impacts of potential E40 Inland Waterway development in Belarus and Ukraine on hydrological and environmental conditions of neighbouring rivers and wetlands, Frankfurt Zoological Society, March 2019
https://bahna.land/files/5d0b65c02a5d4238eedc5191.pdf

[HRC2013] Human Rights Council, Report of the Special Rapporteur on the right of everyone to the enjoyment of the highest attainable standard of physical and mental health, Anand Grover, Mission to Japan (15 – 26 November 2012), 2 May 2013 (A/HRC/23/41/Add.3)
http://www.ohchr.org/Documents/HRBodies/HRCouncil/RegularSession/Session23/A-HRC-23-41-Add3_en.pdf

[IAEA2006a] International Atomic Energy Agency, Radiological Conditions in the Dnieper River Basin - Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan, 2006
https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1230_web.pdf

[IAEA2006b] International Atomic Energy Agency, Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', 2006
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239_web.pdf

[IAEA2010] International Atomic Energy Agency, Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments, Technical Reports Series No. 472, 2010
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf

[ICRP2007] International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4), 2007
http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103

[ICRP2009] International Commission on Radiological Protection, Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency, ICRP Publication 111, Ann. ICRP 39 (3), 2009
http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20111

[ICRP2012] International Commission on Radiological Protection, Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60, ICRP Publication 119, Ann. ICRP 41 (Suppl.), 2012
http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20119

[ICRP2018] International Commission on Radiological Protection, Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources, Draft Report for Consultation, 2018
http://www.icrp.org/page.asp?id=389

[ICRP2019] International Commission on Radiological Protection, Radiological protection of people and the environment in the event of a large nuclear accident: update of ICRP Publications 109 and 111. Draft report for public consultation. ICRP Publication 1XX. Ann. ICRP 4X(X).
http://www.icrp.org/docs/TG93%20Draft%20Report%20for%20Public%20Consultation%202019-06-17.pdf

[IRSN2019] Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire, La radioprotection des travailleurs - Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2018, September 2019
https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiques_et_dossiers_de_presse/Pages/20190912_Bilan-2018-exposition-professionnelle-rayonnements-ionisants-France.aspx

[MIG2015] Maritime Institute in Gdansk, Restoration of Inland Waterway E40 Dnieper – Vistula: from Strategy to Planning, Final Feasibility Study Report, December 2015
http://czech.mfa.gov.by/docs/e40restoration_feasibility_study_en.pdf

[PHE2019] J Wellings, P Bedwell, S M Haywood, T W Charnock, Public Health England, Estimation of radiation doses from inhalation of resuspended materials in emergency situations, April 2019
https://www.gov.uk/government/publications/radiation-doses-from-inhalation-of-resuspended-materials

[PNL1994] O. V. Voitsekhovitch, M. J. Zheleznyak and Y. Onishi, Pacific Northwest Laboratory, Chernobyl Nuclear Accident Hydrologic Analysis and Emergency Evaluation of Radionuclide Distributions in the Dnieper River, Ukraine, During the 1993 Summer Flood, Prepared for the U.S. Department of Energy, June 1994
https://www.osti.gov/servlets/purl/10168428

[SSEChNPP2019] State Specialized Enterprise Chernobyl NPP (SSE ChNPP), Current Decommissioning Projects, accessed in august 2019
https://chnpp.gov.ua/en/activity/chnpp-decommissioning/ongoing-projects

[TEPCO2019] Tokyo Electric Power Company Holdings, Fukushima Daiichi D&D d Engineering Company, Evaluation of the exposure dose of workers engaged in radiation work at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, 31 October 2019
https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/handouts_191031_01-e.pdf

[UNECE2012] United Nations Economic Commission for Europe, Map of the European Inland Waterway Network, 2012
https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/sc3/European_inland_waterways_-_2012.pdf

[UNECE2017] United Nations Economic Commission for Europe, Inventory of main standards and parameters of the E waterway network - "blue book", Third Revised Edition, 2017
http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2017/sc3wp3/ECE-TRANS-SC3-144-Rev.3e.pdf

[UNSCEAR2000] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Maps of radionuclide deposition, UNSCEAR 2000 Report
http://www.unscear.org/docs/JfigVI.pdf

Publications scientifiques :

[Beresford2016] N.A. Beresford, S. Fesenko, A. Konoplev, L. Skuterud, J.T. Smith, and G. Voigt, Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt?, Journal of Environmental Radioactivity 157 (2016) 77
https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.003

[Eggleton2004] Jacqueline Eggleton and Kevin V Thomas, A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events, Environment International 30 (2004) 973
https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.001

[Golubev2011] A. Golubev, V. Sikorski and O. Stoliar, Ionizing radiation long-term impact on biota in water bodies with different levels radioactive contamination in Belarusian sector of Chernobyl nuclear accident zone, Radioprotection 46 (2011) S393
https://doi.org/10.1051/radiopro/20116502s

[Hatano2003] Y. Hatano and N. Hatano, Formula for the resuspension factor and estimation of the date of surface contamination, Atmospheric Environment 37 (2003) 3475
https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00410-2

[Onishi2007] Chernobyl – What Have We Learned? - The Successes and Failures to Mitigate Water Contamination over 20 Years, Edited by Yasuo Onishi, Oleg V. Voitsekhovich and Mark J. Zheleznyak, Springer 2007
https://doi.org/10.1007/1-4020-5349-5

[Polikarpov2015] G.G. Polikarpov, G.E. Lazorenko, N.N. Tereshchenko, and N.Yu. Mirzoyeva, The Northern-Crimean Canal as a Model Object for Radioecological Study of the Chernobyl Radionuclides Transport to the Black Sea, Physical Oceanography 3 (2015) 25
https://doi.org/10.22449/1573-160X-2015-3-25-34

[Saito2012] Kimiaki Saito, Nobuhito Ishigure, Nina Petoussi-Henss, and Helmut Schlattl, Effective dose conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground, Radiation and Environmental Biophysics 51 (2012) 411
https://doi.org/10.1007/s00411-012-0432-y

[Sandalls1993] F.J. Sandalls, M.G. Segal, and N. Victorova, Hot particles from Chernobyl: A review, Journal of Environmental Radioactivity 18 (1993) 5
https://doi.org/10.1016/0265-931X(93)90063-D

[Sehmel1980] G. A. Sehmel, Particle Resuspension: a Review, Environment International 4 (1980) 107
https://doi.org/10.1016/0160-4120(80)90005-7

Annexe : Cartes de la contamination

Cartes Biélorusses

Les cartes de la contamination radiologique proviennent de l'agence météorologique du Bélarus. Pour toutes ces cartes, l'échelle supérieure est en kBq/m2 et l'échelle inférieure en Ci/km2. Les noms en anglais ont été ajoutés par nous.

Cartes de la contamination de la zone d'exclusion de Tchernobyl de 2009

Césium-137 :

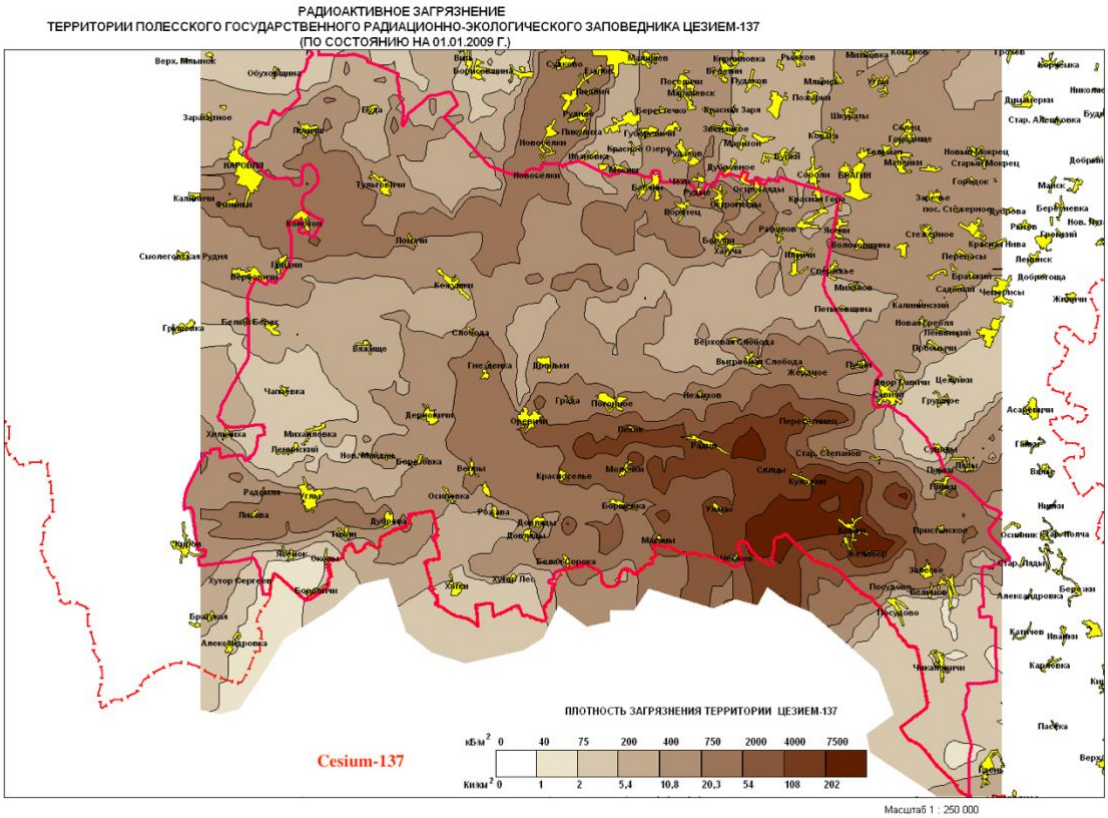

Figure A1 : *Carte de 2009 du dépôt surfacique en césium-137 dans les sols de la partie biélorusse de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Strontium-90 :

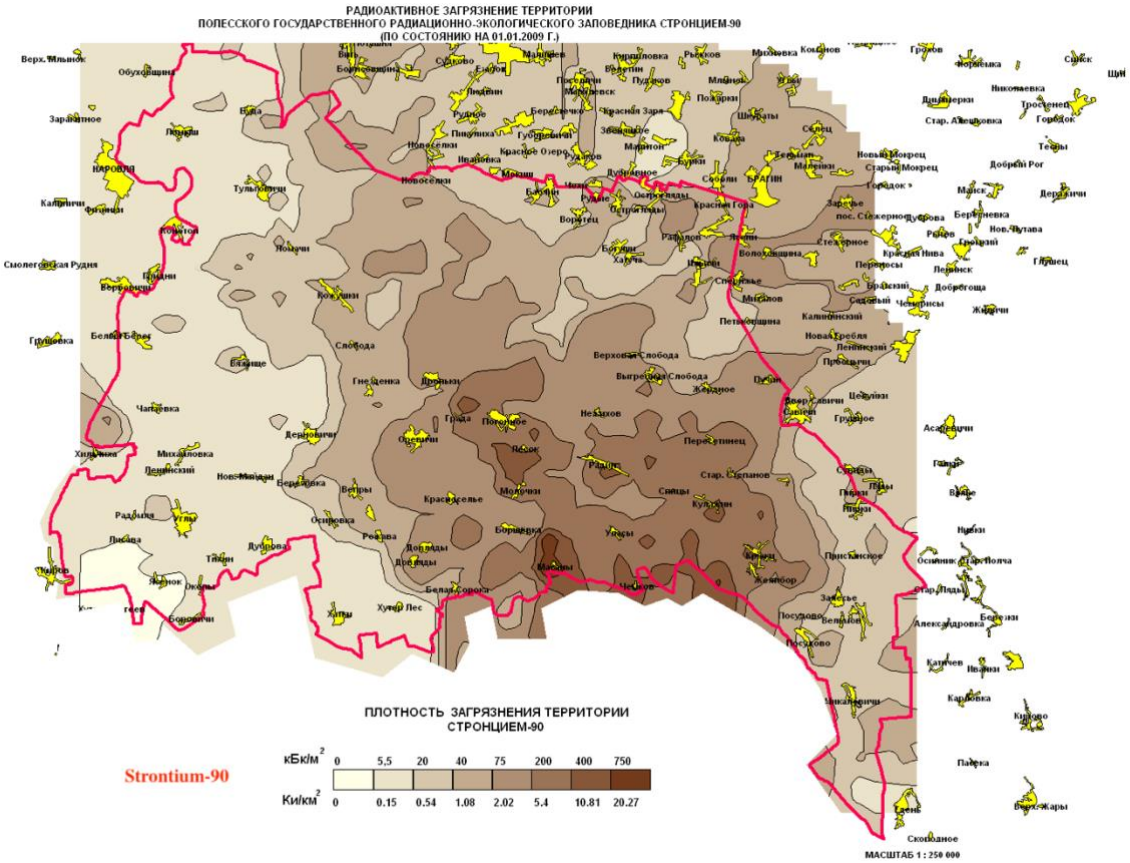

Figure A2 : *Carte de 2009 du dépôt surfacique en strontium-90 dans les sols de la partie biélorusse de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Plutonium-238,239,240 :

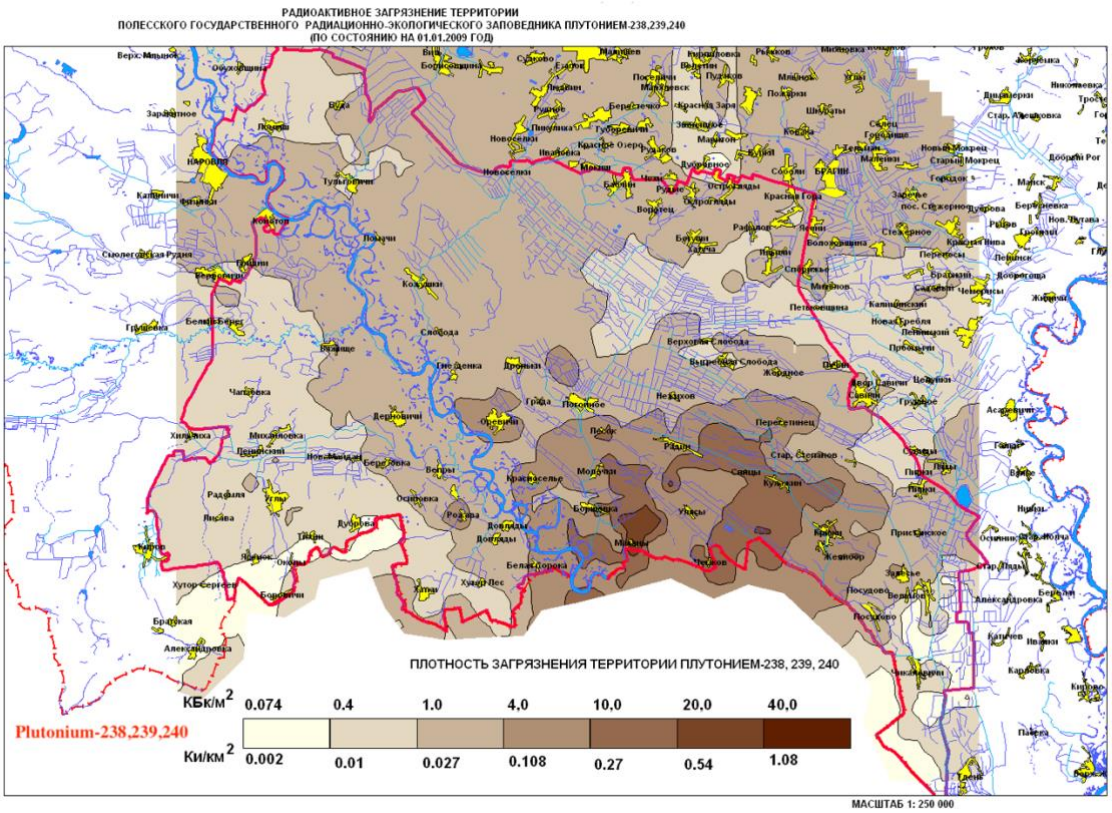

Figure A3 : *Carte de 2009 du dépôt surfacique en plutonium-238,239,240 dans les sols de la partie biélorusse de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Plutonium-241 :

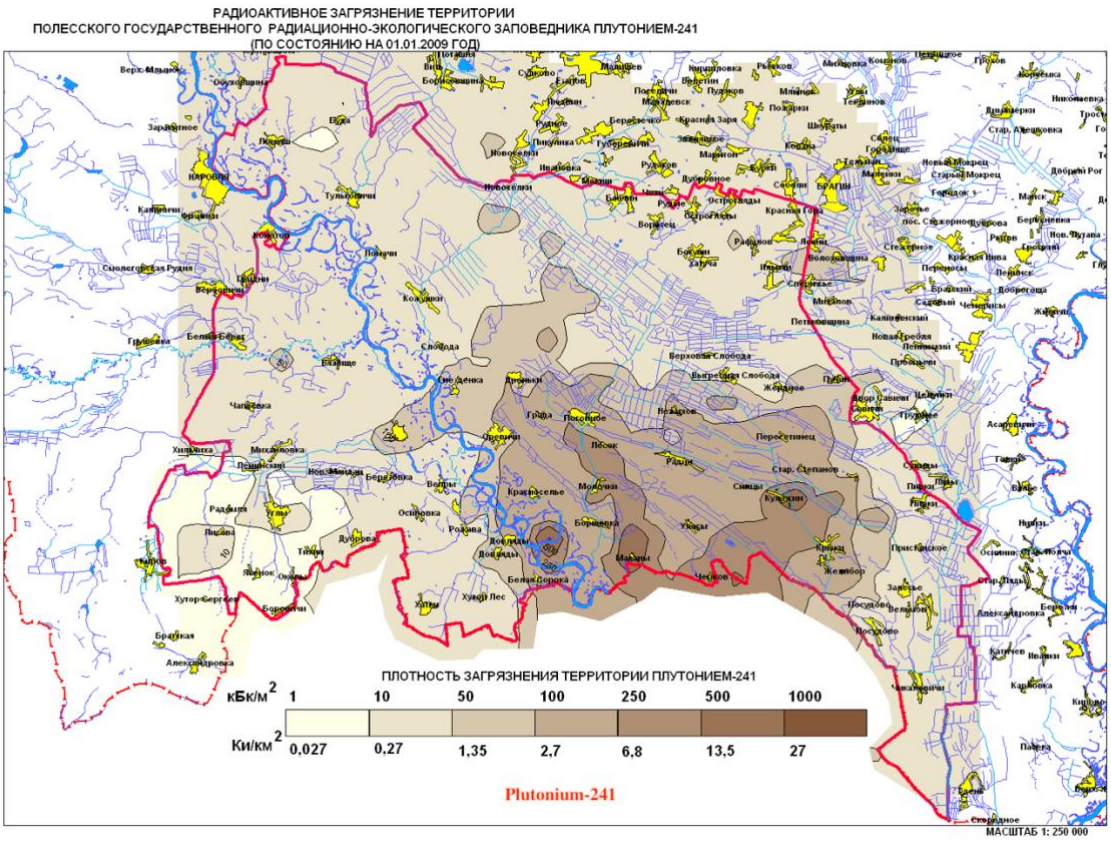

Figure A4 : *Carte de 2009 du dépôt surfacique en plutonium-241 dans les sols de la partie biélorusse de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Américium-241 :

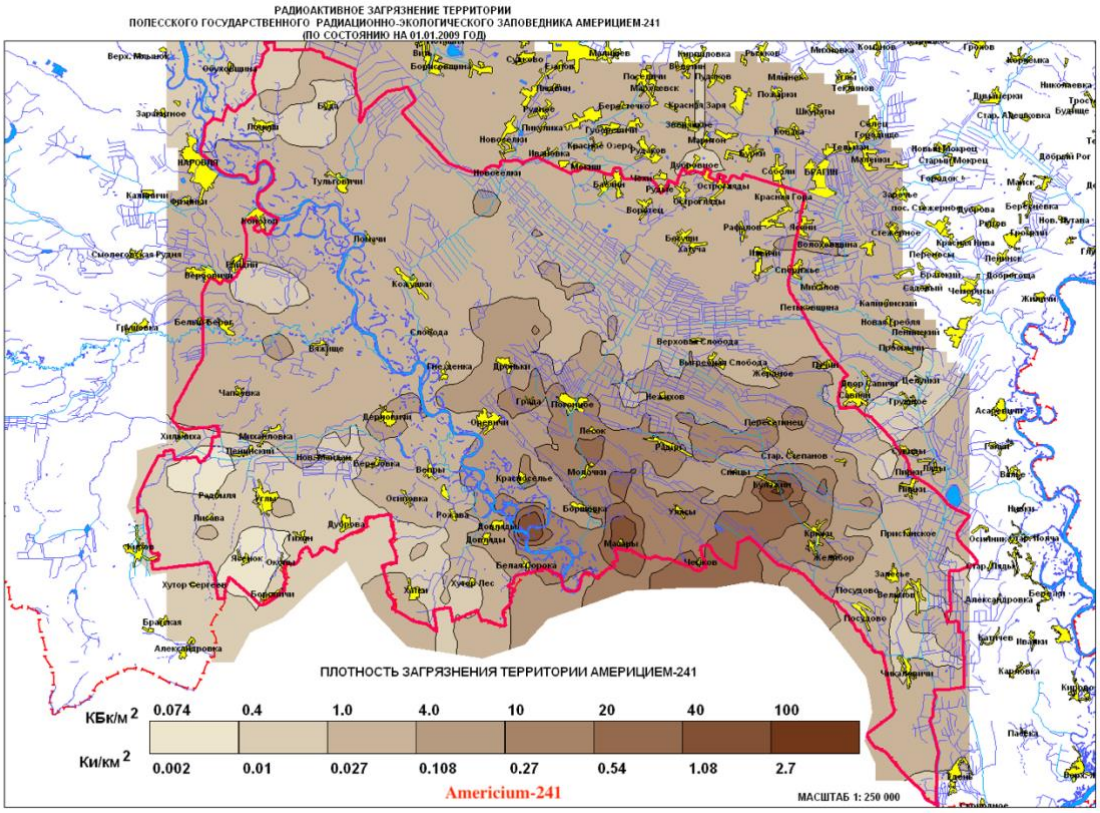

Figure A5 : *Carte de 2009 du dépôt surfacique en américium-241 dans les sols de la partie biélorusse de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Cartes de la contamination en césium du Sud du Bélarus de 2016

Oblast de Gomel :

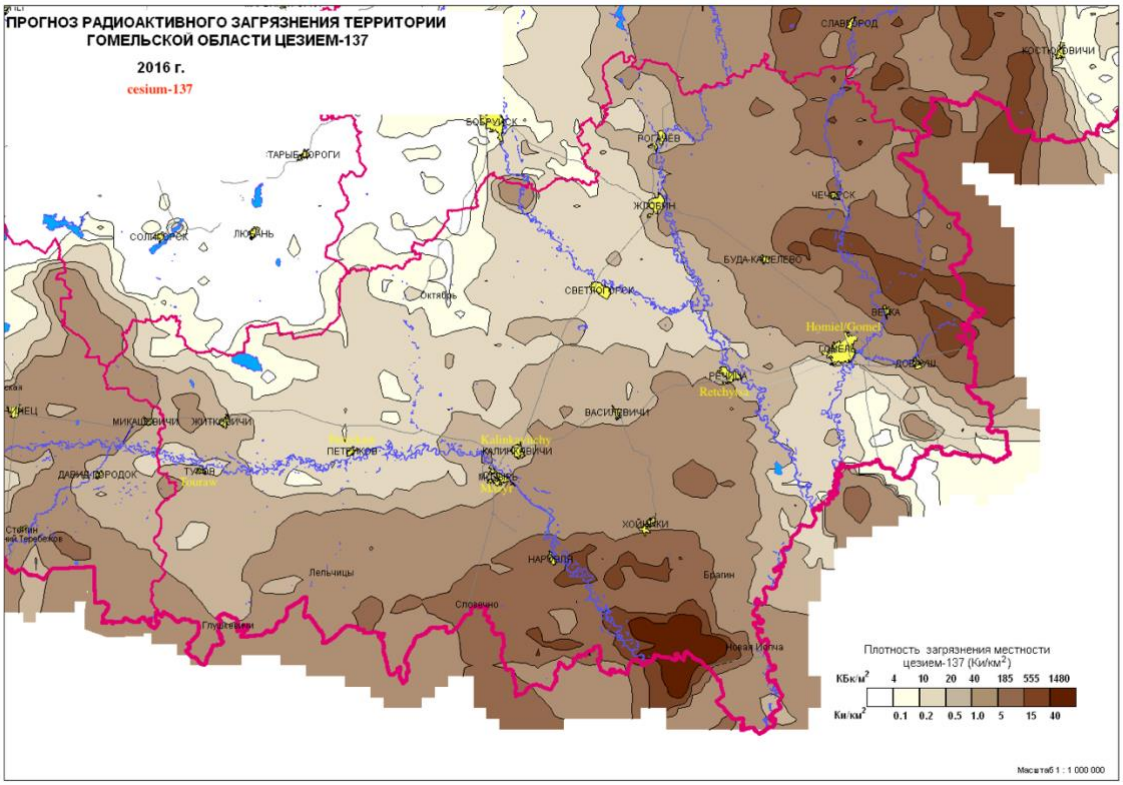

Figure A6 : *Carte de 2016 du dépôt surfacique en césium-137 dans les sols de l'oblast de Gomel. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Oblast de Brest :

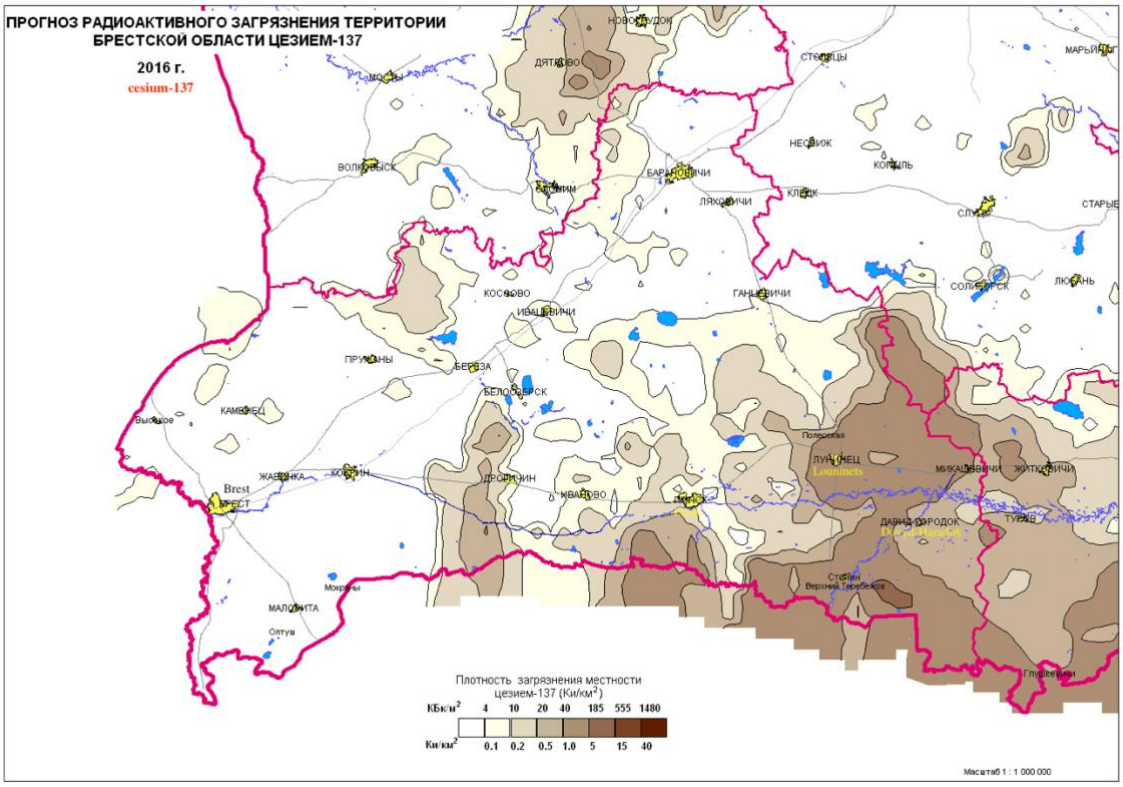

Figure A7 : *Carte de 2016 du dépôt surfacique en césium-137 dans les sols de l'oblast de Brest. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Reconstruction de la carte de contamination en césium le long de la rivière Pripiat (2016)

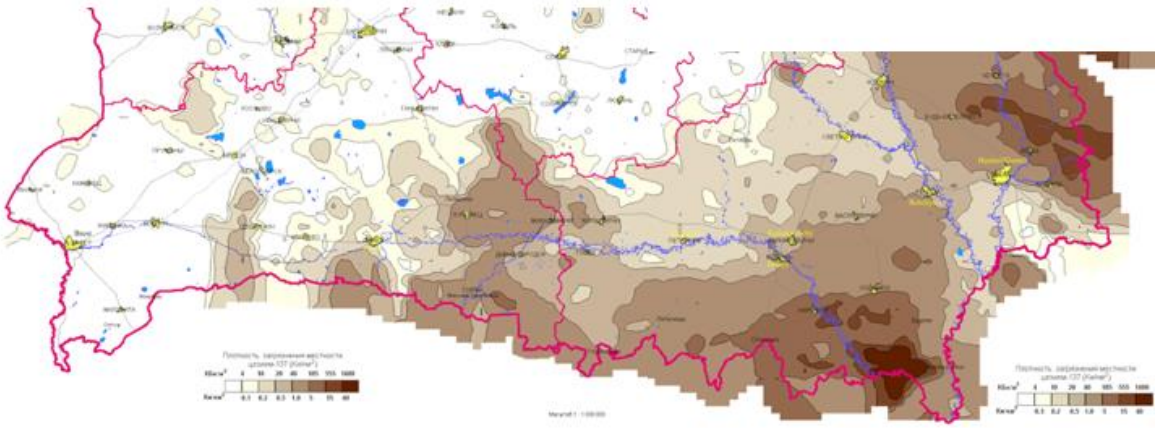

Figure A8 : *Carte reconstruite de la contamination surfacique en césium-137 des sols du sud du Bélarus obtenue en fusionnant les deux cartes précédentes. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Cartes Ukrainiennes

Cartes de l'agence d'Etat d'Ukraine pour la gestion de la zone d'exclusion[10]. Les noms en anglais ont été ajoutés par nous.

Zone d'exclusion

Césium-137 (Mai 2011)

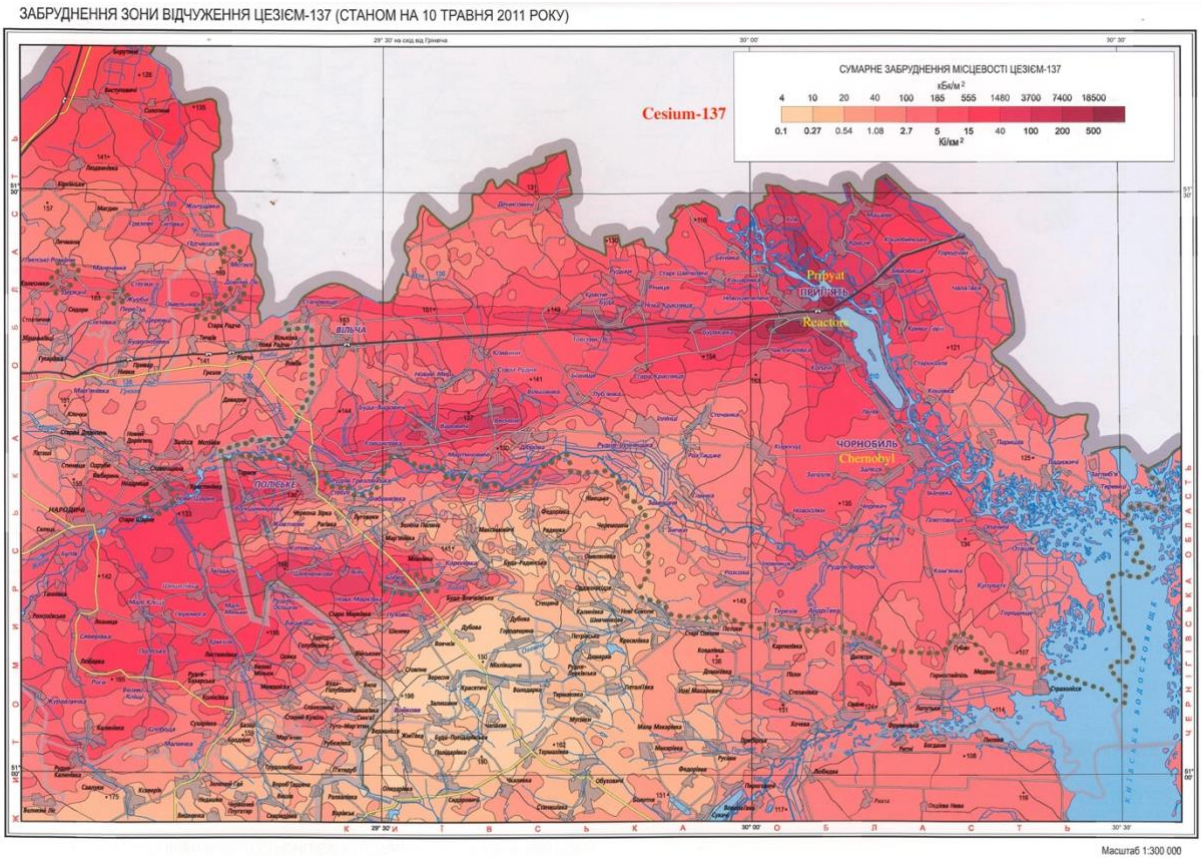

Figure A9 : *Carte de 2011 du dépôt surfacique en césium-137 dans les sols de la partie ukrainienne de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

10 http://dazv.gov.ua/en/

Strontium-90 (Mai 2011)

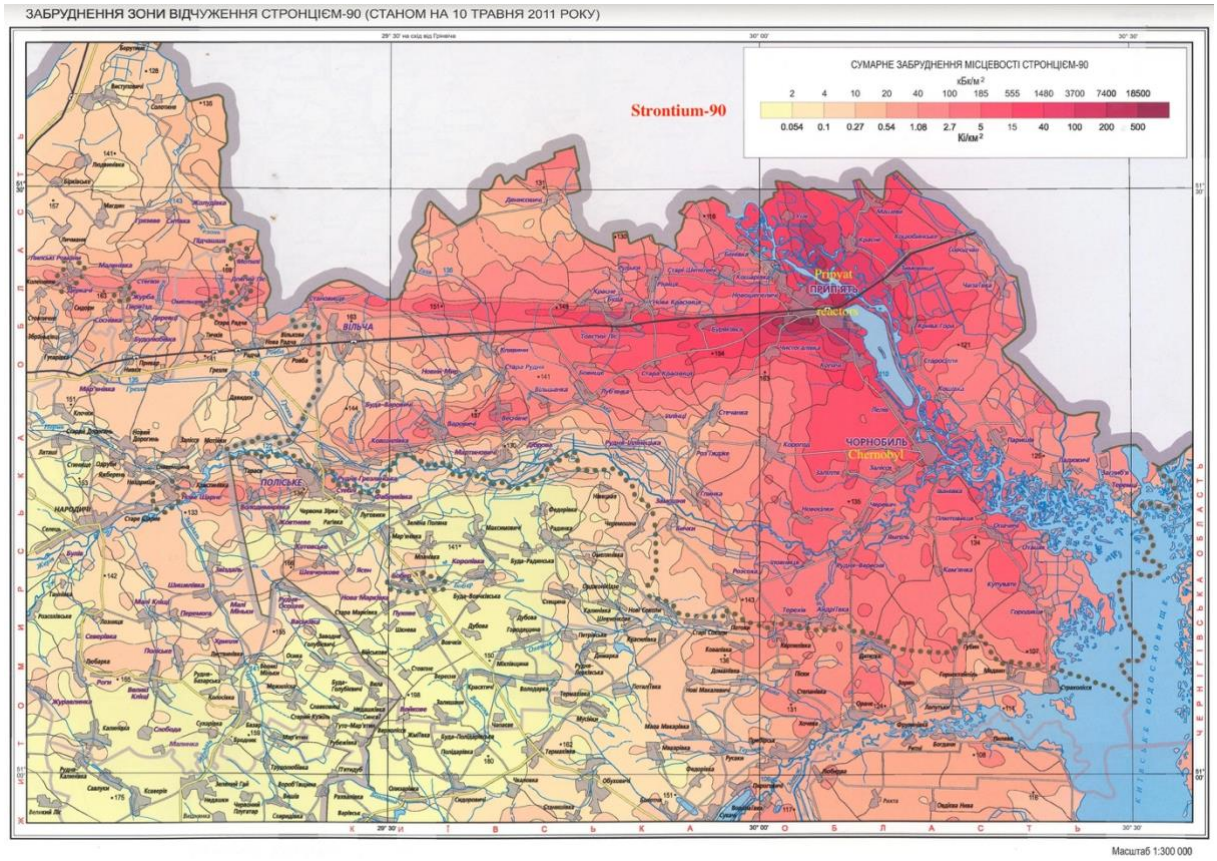

Figure A10 : *Carte de 2011 du dépôt surfacique en strontium-90 dans les sols de la partie ukrainienne de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m^2 et celle inférieure en Ci/km^2.*

Isotopes du plutonium

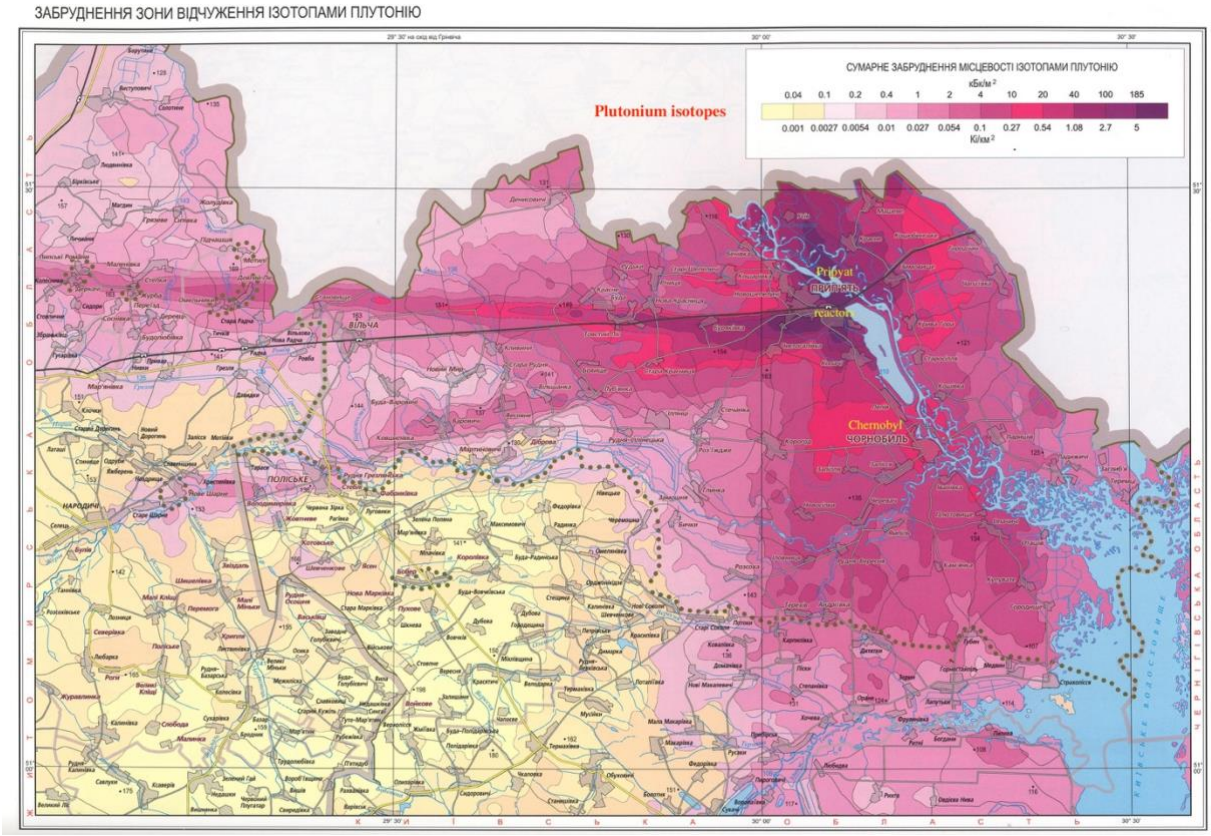

Figure A11 : *Carte de 2011 du dépôt surfacique en plutonium dans les sols de la partie ukrainienne de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*

Américium-241

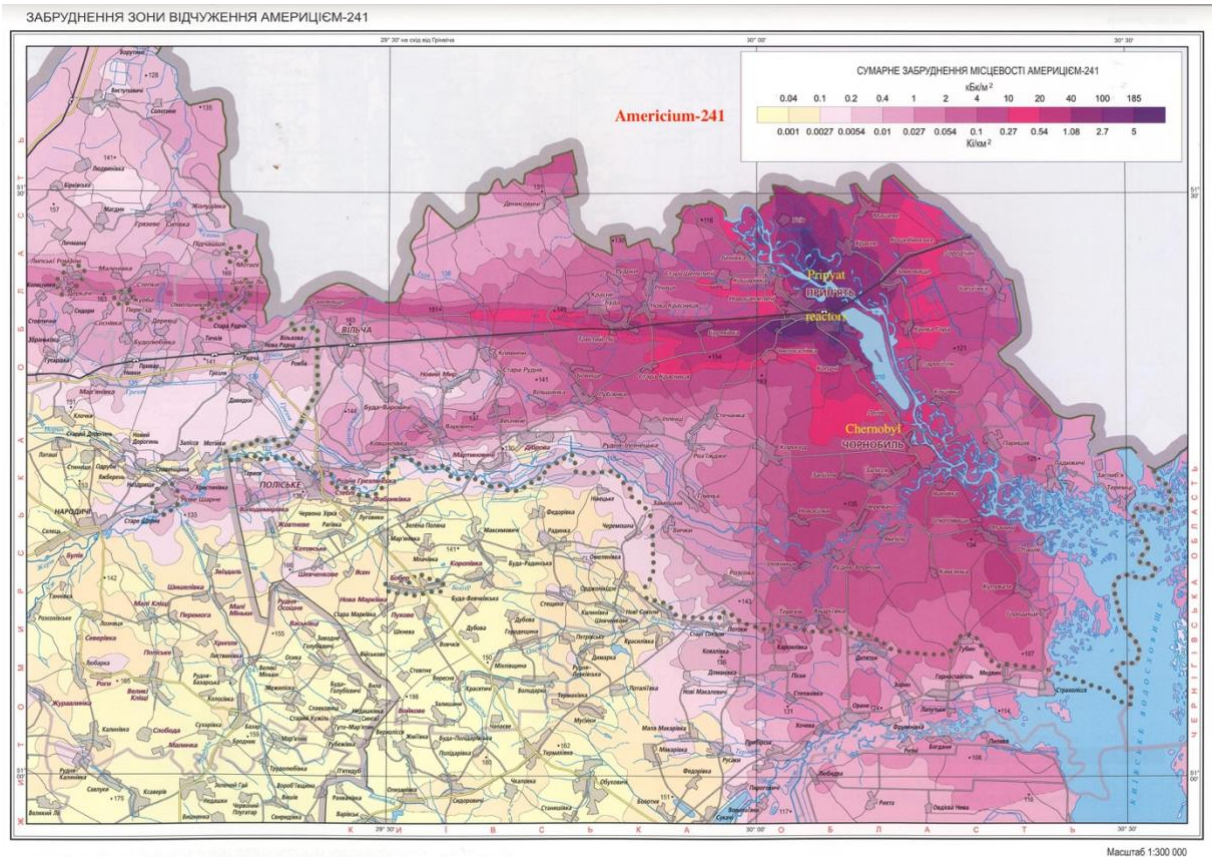

Figure A12 : *Carte de 2011 du dépôt surfacique en américium-241 dans les sols de la partie ukrainienne de la zone d'exclusion de Tchernobyl. L'échelle supérieure est en kBq/m2 et celle inférieure en Ci/km2.*