

Activités de césium déposées sur les territoires et débits de dose extérieurs ambiants associés

Le devenir des activités de césium déposées sur les territoires (Bq/m^2) et des débits de dose dans l'air qui en résultent ($\mu\text{Sv/h}$) sont des éléments déterminants pour guider les stratégies de gestion des populations (notamment leur retour) et les stratégies de décontamination. L'évolution de la situation radiologique depuis avril 2011 a été caractérisée au travers de multiples campagnes et dispositifs de mesure associés, dont les résultats sont consultables sur le site de l'Autorité de Sureté Japonaise (cf. <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/>).

Les différents types de mesure

Les mesures aéroportées

Huit campagnes aéroportées et/ou hélicoptées ont été effectuées entre avril 2011 et novembre 2013. Ces campagnes ont permis d'obtenir à échéances rapprochées des cartographies du débit de dose estimé au niveau du sol (à 1 m) ainsi qu'une estimation associée de l'activité rémanente en césium. Ces campagnes dont on a reproduit les résultats sur la figure 1 dans un rayon de 80 km autour du site montrent une décroissance générale des débits de dose qui est en grande partie induite par la décroissance radioactive du césium-134. Ces cartographies présentent l'intérêt de fournir une image globale de la contamination et du rayonnement ambiant sur l'ensemble du territoire touché par les retombées radioactives, y compris sur des zones assez difficiles d'accès telles que les forêts qui sont très majoritairement présentes dans cette région (près de 75% de la superficie) ou les zones au relief accidenté. Les estimations des débits de dose et activités au sol peuvent être néanmoins assorties d'une imprécision assez importante, en particulier dans le cas des campagnes japonaises, du fait des approximations requises pour interpréter la mesure effectuée en altitude¹. Ces estimations peuvent également pêcher par leur manque de résolution spatiale, les lignes de vol ayant été assez espacées (de l'ordre de 2 km pour les campagnes japonaises) et la mesure produite en altitude ayant tendance à lisser les hétérogénéités au sol (dans un disque de diamètre variant de 300 à 600 m ici). Les moyens aéroportés n'en constituent pas moins un élément clef du dispositif de mesure à déployer en situation post-accidentelle, et essentiel pour l'établissement des zonages de gestion des populations (cf. chapitre 4).

¹ La conversion du signal mesuré en altitude en débits de dose et activités estimés au sol repose sur des hypothèses simplificatrices qui ne se vérifient que rarement à Fukushima: absence de contamination aérienne lors des campagnes de vol, absence de relief et de couverture végétale dense (i.e. forêt) dans les régions survolées, absence de couverture neigeuse, homogénéité des dépôts et de leur profondeur de pénétration dans le sol, etc.

Des campagnes aéroportées ont été réalisées à proximité du site accidenté au printemps 2013 à l'aide d'un drone volant à basse altitude. L'utilisation de ce dispositif a permis l'obtention d'une carte de meilleure résolution spatiale (80 m) qui fait apparaître des lobes de contamination que le dispositif aéroporté conventionnel n'avait pas permis de détecter (cf. figure 2).

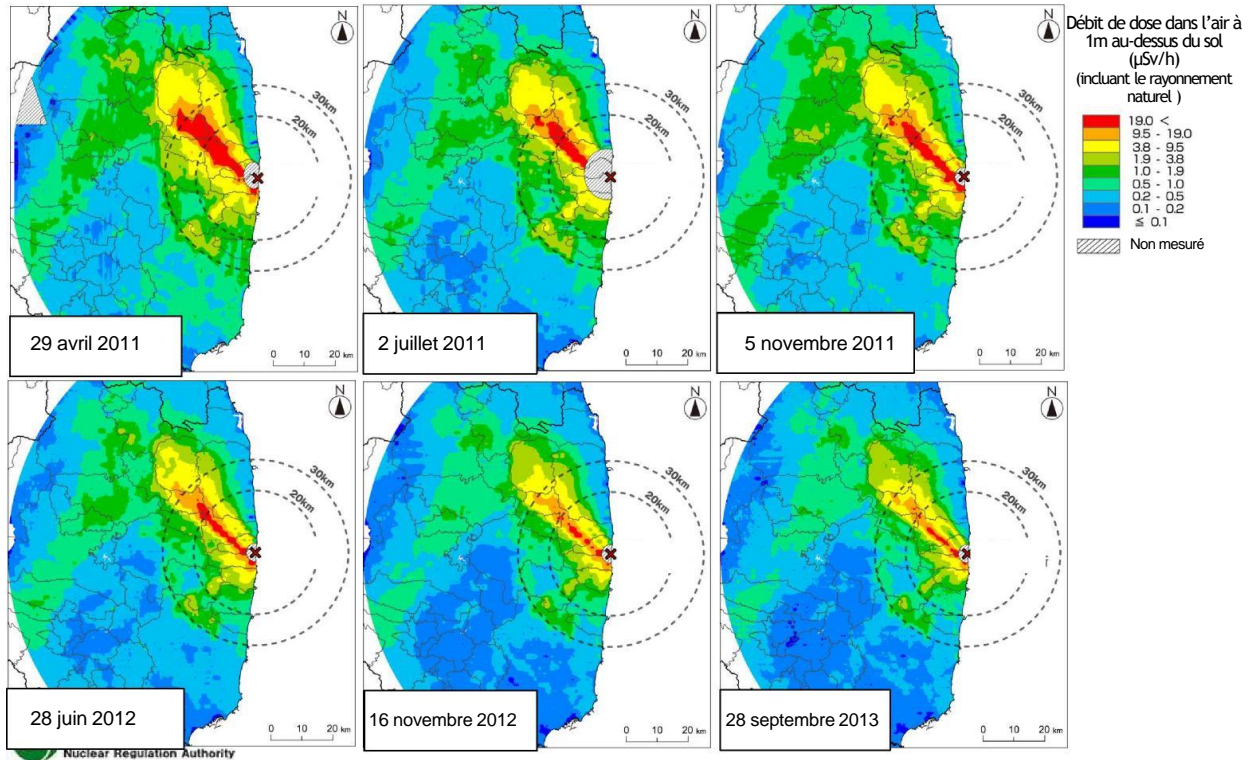


Figure 1 : Cartographies des débits de doses dans l'air à 1 m du sol ($\mu\text{Sv/h}$) établies à partir de mesures aéroportées.

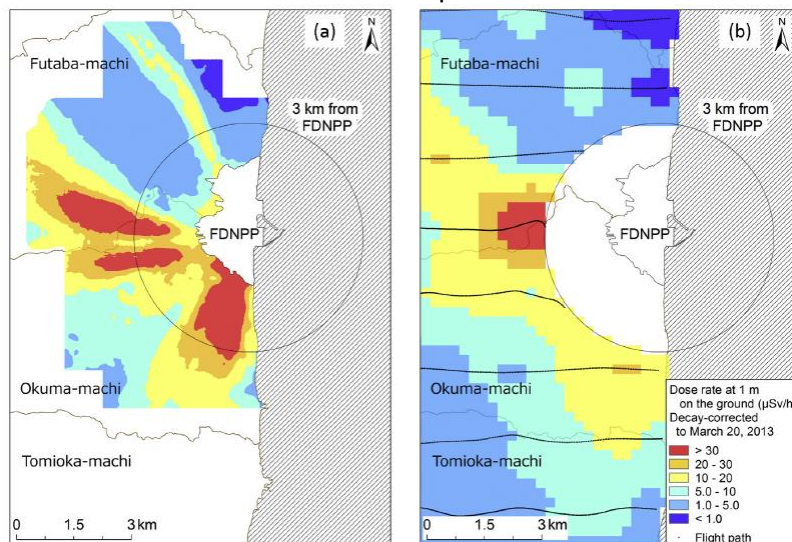


Figure 2 : Cartographies des débits de dose dans le champ proche de l'installation effectuées par : (a) drone, (b) moyen aéroporté conventionnel (avion ou hélicoptère). Les valeurs sont corrigées au 20 mars 2013.

Les mesures sur réseau routier

Des campagnes le long des réseaux routiers ont été régulièrement conduites par le JAEA depuis juin 2011. A l'instar des précédentes, ces campagnes permettent d'obtenir des cartographies du débit

de dose mesuré à 1 mètre du sol au niveau d'un détecteur embarqué dans les véhicules, en couvrant de grandes étendues et en peu de temps. Elles apportent donc elle aussi une information essentielle pour la caractérisation spatiale et le suivi dans le temps des territoires contaminés, qui est complémentaire aux moyens aéroportés. Du fait de la contribution de la chaussée dans le rayonnement mesuré, ces mesures peuvent néanmoins ne pas refléter l'ambiance radiologique rencontrée dans les environnements jouxtant le réseau routier. En théorie, ce biais est d'autant plus important que les mesures sont effectuées tardivement après l'accident, puisqu'en règle générale la décontamination des routes s'opère plus rapidement que dans des sols naturels (sous l'effet du pluvio-lessivage, notamment). La conversion des débits de dose mesurés en activités surfaciques de césium dans les milieux environnants est donc assez hasardeuse. Les japonais ne se sont d'ailleurs pas livrés à cet exercice. A l'occasion des campagnes routières, le JAEA a également procédé, mais ponctuellement seulement, à des mesures de débits de dose sur des parcelles de sol avoisinantes et laissées vacantes depuis l'accident. Ces mesures ont clairement démontré que les niveaux d'irradiation augmentaient à mesure qu'on se déportait de la route.

Les mesures in situ

Des mesure de débit de dose effectuées à l'aide de détecteurs, statiques ou mobiles, positionnés à 1 m du sol fournissent certainement les résultats les plus pertinents à petite échelle spatiale, à l'échelle de la parcelle typiquement. Les autorités japonaises ont organisé trois grandes campagnes de ce type, focalisées sur les zones habitées dans un rayon de 80 km autour du site accidenté. Pour améliorer la représentativité des mesures, celles-ci ont été réalisées uniquement sur des parcelles de sol de large étendue, peu pentues et présentant peu de végétation (jardins publics, cours d'école, etc.). La connaissance des débits de dose acquise lors de la première campagne de juin 2011 a été considérablement affinée lors de la (troisième) campagne de décembre 2012 où le nombre de mesures de débits de dose a été étendu à 6100 sites contre 2200 pour la première (cf figure 3a). Ces mesures de débit de dose permettent d'estimer de manière assez fiable les activités de césium dans les sols, moyennant la connaissance de la profondeur caractéristique d'enfouissement du césium. Des analyses spécifiques ont été réalisées dans ce but durant l'hiver 2012 par prélèvement de sol sur 85 sites. Elles ont montré que le césium avait peu migré en profondeur et demeurait en moyenne confiné dans les 3 premiers centimètres de sol. La cartographie des activités en césium qui en résulte est reproduite figure 3b.

La principale limitation des cartes ainsi obtenues est qu'elles ne reflètent pas obligatoirement la situation rencontrées dans d'autres types d'environnement que celui investigué, telles que les territoires agricoles, forestiers ou surfaces artificialisées.

Dans le cas des surfaces agricoles, la relation entre le débit de dose à 1 m et les activités mesurées dans des échantillons de sol a fait l'objet d'une étude spécifique menée entre octobre 2011 et janvier 2012, puis publiée en 2014. Cette étude réalisée sur 3500 parcelles agricoles a montré que l'estimation des activités de césium à partir des débits de dose ambiants pouvait être affinée si l'on tenait compte de la nature du sol et du type de culture rencontré (rizières, pâturages, vergers et

autres cultures). L'utilisation de ces résultats, combinée à la carte de débits de dose issue de la 4^{ème} campagne aéroportée (novembre 2011), a permis l'obtention d'une première cartographie des dépôts de césium sur les terres agricoles.

Les mesures d'activité massique dans les sols

A l'occasion de la première campagne (juin 2011), cinq échantillons de sols avaient été prélevés dans un carré de 9 m² pour chaque site, en vue d'en mesurer l'activité massique (Bq/kg). Ces prélèvements ont démontré qu'il existait une très grande variabilité entre échantillons, liée à l'hétérogénéité naturelle des dépôts initiaux et une éventuelle redistribution horizontale par micro-ruissellement, d'où la difficulté de reconstituer les activités surfaciques (Bq/m²) à l'échelle de la parcelle. Par ailleurs, la corrélation entre le débit de dose mesuré et l'activité massique moyenne estimée sur chaque site s'est avérée assez moyenne. Les japonais n'ont plus effectué d'autres campagnes de ce genre, hormis celle sur les parcelles agricoles présentée précédemment.

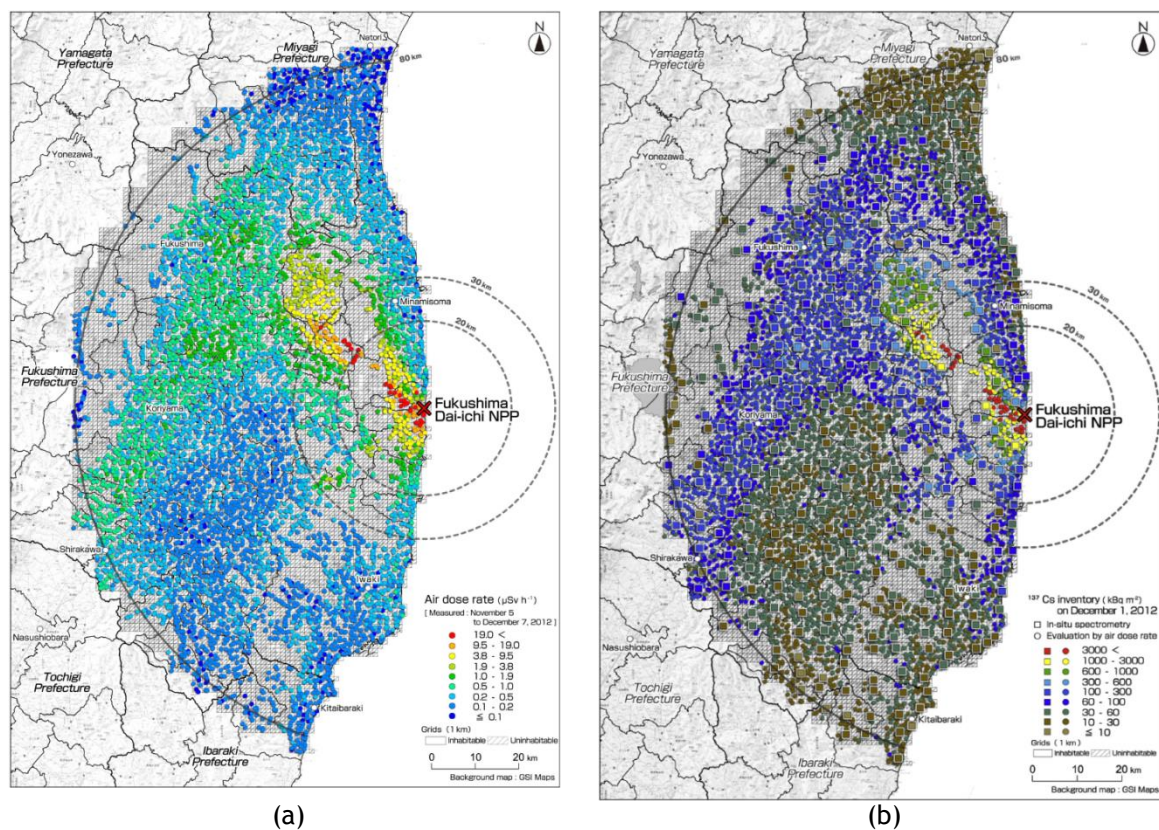


Figure 3 : Cartographie : (a) des débits de doses dans l'air ($\mu\text{Sv/h}$) et (b) activités surfaciques (Bq/m^2), en zones habitées sur parcelles de sol non remanié (campagne de décembre 2012). Les activités sont distinguées selon qu'elles ont été estimées d'après des mesures de débits de dose par spectrométrie gamma in situ (400 stations) ou sonde NaI portable (6100 stations).

Comparaison spatiale des différentes cartographies des débits de dose

Les cartographies de débit de dose établies fin 2012 sont reproduites sur la figure 5 pour chacun des dispositifs déployés par les japonais. Cette comparaison permet d'affirmer qu'en dépit des spécificités et incertitudes météorologiques, il existe une assez bonne cohérence d'ensemble entre les prévisions, au moins dans la gamme d'échelles supérieure à 10 kilomètres. Ces cartes diffèrent essentiellement par l'étendue de leur couverture spatiale. Les campagnes routières, et dans une moindre les campagnes sur sol en zones habitées, ne fournissent que peu d'information dans le massif forestier de l'Abukuma, situé à l'Ouest du site accidenté, ainsi que dans la chaîne volcanique située à l'extrême ouest du domaine considéré. Une comparaison plus attentive permet néanmoins de constater que les débits de dose estimés le long des routes sont, de manière générale, plus faibles que ceux estimés par les autres dispositifs, notamment sur sols nus en zone habitée où l'écart est de l'ordre de 50%. Une étude conduite à l'IRSN a permis d'autre part de mettre en évidence des écarts localement très significatifs entre les mesures aéroportées et les mesures sur sols nus (jusqu'à un facteur 3). A l'aplomb des régions fortement urbanisées, telle que la vallée de l'Abukuma abritant les villes de Fukushima et Koriyama, les débits de dose estimés par moyen aéroporté à partir d'octobre 2011 se sont avérés beaucoup plus faibles que ceux mesurés in situ sur parcelles de sol. Cela résulte très probablement d'une décontamination accélérée des surfaces urbaines par rapport aux sols, due à l'action combinée du pluvio-lessivage naturel et d'une réhabilitation progressive du milieu urbain dans les semaines ou les mois qui ont suivi l'accident. A l'inverse, des niveaux d'activité plus importants que sur sols nus ont été mis en évidence au sud du massif de l'Abukuma, très majoritairement occupé par des forêts de conifères. Ces anomalies ont été interprétées comme des zones de dépôt sec, puisqu'en l'absence de précipitation, les canopées forestières captent plus efficacement la contamination aérienne qu'une parcelle voisine de sol nu.

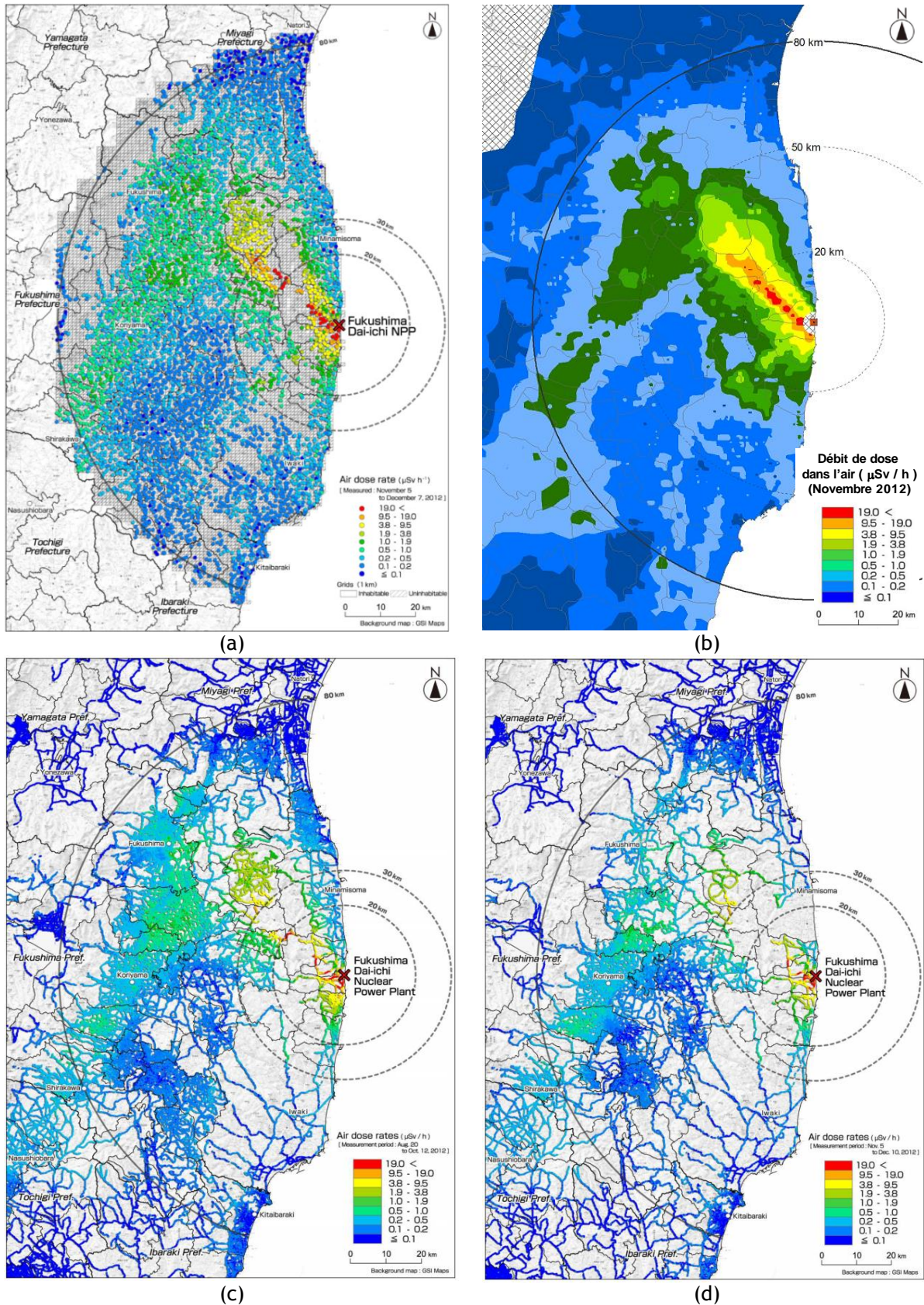


Figure 4 : Cartographies des débits de doses ($\mu\text{Sv/h}$) mesurés ou estimés à 1m du sol: (a) d'après campagne sur parcelles de sol non remanié en zone habitée de décembre 2012, (b) campagne aéroportée de novembre 2012, (c,d) campagnes routières de septembre et novembre 2012, respectivement.

Evolution dans le temps des débits de dose et des activités de césium déposées

Ainsi que l'illustre la figure 5, l'ensemble des campagnes de mesure, quel que soit le dispositif utilisé, indique que le débit de dose dans l'air a diminué en moyenne d'un facteur 2 à 3 entre mi-2011 et fin 2013 dans les 80 km autour de l'installation accidentée. Cette diminution a été très soutenue durant les deux premières années et s'est opérée à un rythme plus soutenu que celui attendu par décroissance radioactive du césium 134 (période de 2 ans), la décroissance radioactive du césium 137 (30 ans) étant quasi-négligeable sur cette période. Cette décroissance s'est ensuite ralentie en 2013, en se conformant à l'évolution théorique attendue.

Dans le cas des mesures aéroportées, la diminution a été de l'ordre de 40% entre novembre 2011 et novembre 2012 dont la moitié seulement est expliquée par la décroissance radioactive. De multiples mécanismes d'origine naturelle ou anthropique ont été évoqués pour expliquer cette décroissance, tels que l'effet du ruissellement ou du lessivage par les pluies, la migration dans le sol, l'effet des labours et actions de décontamination. La contribution de ces processus est très certainement significative en milieux urbains et agricoles. Néanmoins, aucun de ces mécanismes ne permet d'expliquer la décroissance des débits de dose à l'aplomb des surfaces forestières qui occupent pourtant près de 70% du territoire. Une étude conduite par l'IRSN a permis de démontrer que la décontamination progressive des canopées de conifères pouvait sensiblement modifier le signal mesuré en altitude, en raison notamment de l'effet d'écran exercé par la végétation sur les rayonnements émis au niveau du sol. Cette décontamination qui s'opère en un temps caractéristique de 1 à 2 ans sous l'effet combiné du pluvio-lessivage et de la chute des aiguilles, a sans doute contribué à accélérer la décroissance du débit de dose aéroporté. La décroissance observée à l'aplomb des forêts de conifères ne reflèterait donc pas l'évolution réelle des débits de dose à hauteur d'homme, qui au contraire ont vraisemblablement augmenté durant la phase initiale. Aucune cartographie régionale des débits de dose en milieu forestier n'a été publiée à ce jour.

La décroissance accélérée des débits de dose observés le long du réseau routier résulte très probablement d'une décontamination accrue des surfaces bitumées par pluvio-lessivage et trafic routier. La première campagne routière n'ayant été conduite qu'en juin 2011, il y a tout lieu de penser que cette décroissance s'était déjà amorcée dans les trois premiers mois suivant l'accident.

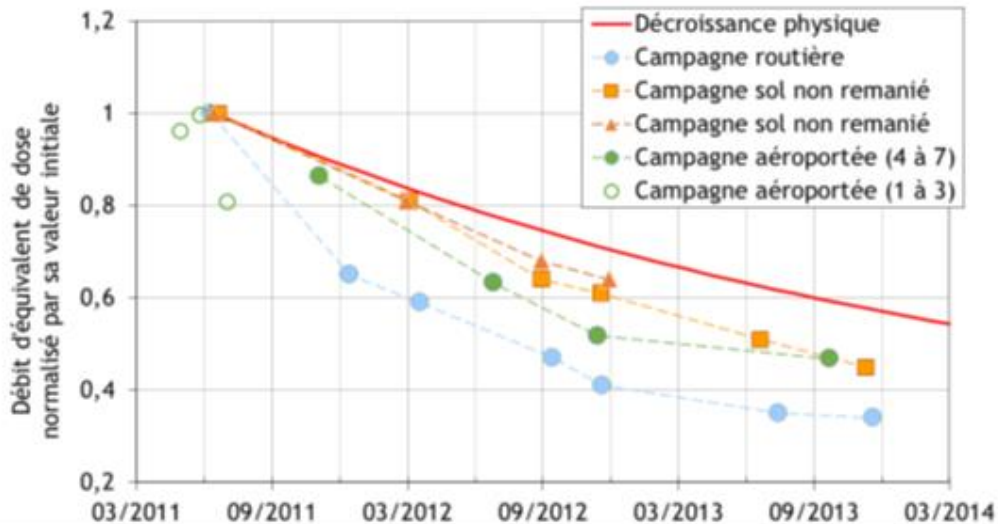


Figure 5 : Evolution dans le temps des débits de dose mesurés par l'ensemble des dispositifs déployés et évolution attendue par décroissance physique des césiums. Les valeurs représentées sont des valeurs moyenne dans un rayon de 80 km et normalisées par leur niveau initial observé en juin/juillet 2011.

L'évolution dans le temps du zonage des débits de dose dans un rayon de 80 km autour de l'installation accidentée est représentée sur la Figure 6. La diminution générale du débit de dose moyen observé dans la région des 80 km se traduit sur cette figure par une diminution des surfaces où il est encore élevé (bleu ciel à rouge) au profit des surfaces où il est plus faible (bleu foncé et noir).

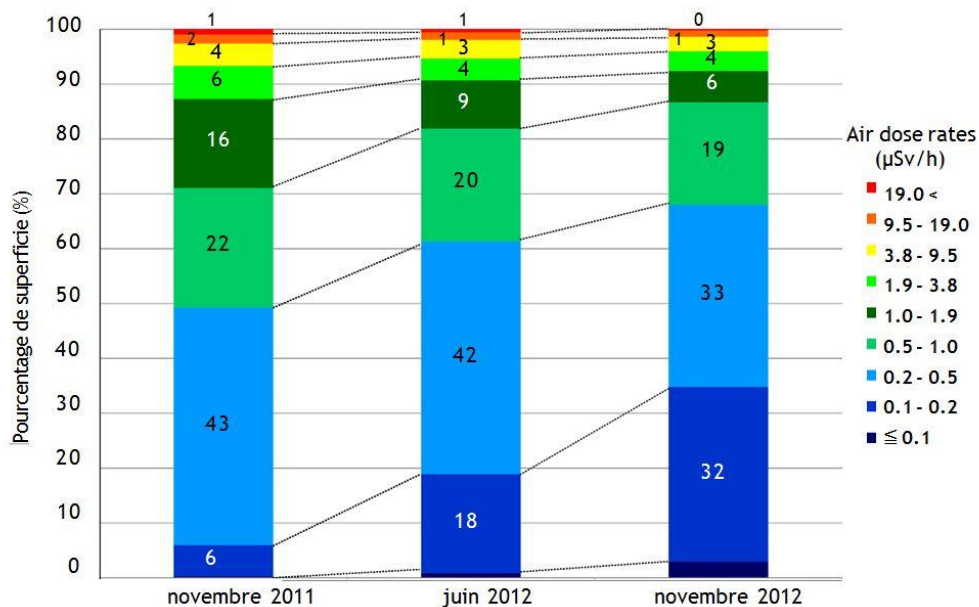


Figure 6 : Evolution de novembre 2011 à novembre 2012 de la superficie des territoires contaminés en fonction du niveau de débit de dose estimé au sol à partir des mesures aériennes. Les superficies sont exprimées en pourcentage de la superficie contenue dans rayon de 80 km autour du site.