

Activités de césium déposées sur les territoires et débits de dose extérieurs ambiants associés après l'accident de Fukushima Daiichi

Le devenir des activités de radiocésiums¹ déposées sur les territoires (Bq/m^2) et des débits de dose dans l'air qui en résultent ($\mu\text{Sv}/\text{h}$), sont des éléments déterminants pour guider les stratégies post-accidentelles de gestion des populations (notamment leur retour) et 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 sûreté japonaise².

Les différents types de mesure

Les mesures aéroportées

Dix campagnes aéroportées et/ou hélicoptées ont été effectuées entre avril 2011 et septembre 2015. 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 radiocésiums. Ces campagnes, dont les résultats sont reproduits sur la figure 1 dans un rayon de 80 km autour du site, dénommées A1 à A10, 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 des activités au sol peuvent être néanmoins assorties d'une imprécision assez importante, du fait des approximations requises pour interpréter la mesure effectuée en altitude³. 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 A1 à A6, puis <1km dans les régions les plus contaminées depuis la campagne A7) 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 pour ces campagnes). 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 de la radioprotection des populations.

¹ Les radiocésiums sont le césium-134 et le césium-137.

² <http://radioactivity.nsr.go.jp/en/>

³ 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 à haute résolution ont été réalisées à proximité du site accidenté depuis 2013 à l'aide d'un drone volant à basse altitude. L'utilisation de ce dispositif a permis l'obtention de cartes de meilleure résolution spatiale (80 m) qui font apparaître des lobes de contamination que le dispositif aéroporté conventionnel n'avait pas permis de déceler (figure 2).

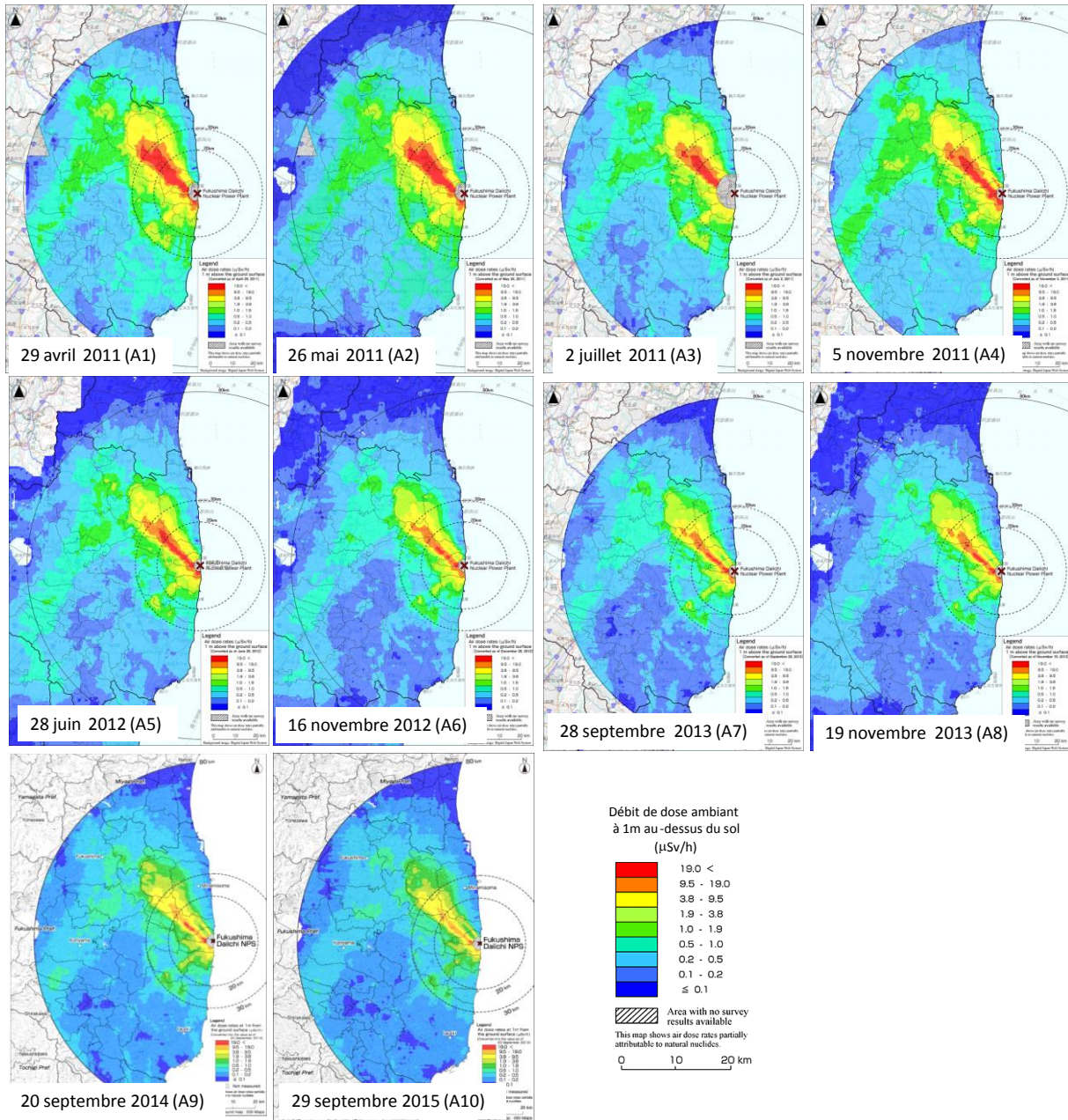


Figure 1 : Cartographies des débits de doses dans l'air à 1 m du sol ($\mu\text{Sv/h}$) établies à partir de mesures aéroportées (campagnes A1 à A10). La résolution spatiale des mesures aéroportées a été affinée dans les zones les plus fortement contaminées (débits de dose $> 0.2 \mu\text{Sv/h}$) depuis l'été 2013 (campagnes A7 à A10).

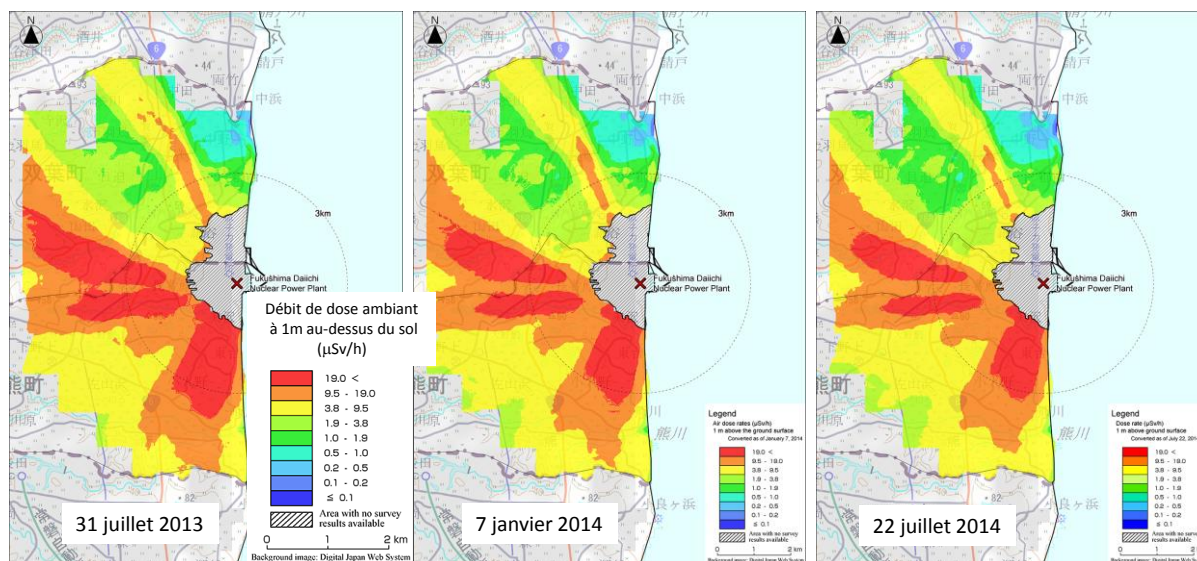


Figure 2 : Cartographies des débits de dose dans le champ proche du site de Fukushima effectuées par le biais d'un drone, entre juillet 2013 et juillet 2014.

Les mesures sur réseau routier

Des campagnes de mesures le long des réseaux routiers ont été régulièrement conduites par le « Japan Atomic Energy Agency » (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 radiocésiums 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 que l'on s'écartait 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 6 100 sites contre 2 200 pour la première (figure 3a). Ces mesures de débit de dose permettent d'estimer de manière assez fiable les activités de radiocésiums dans les sols, moyennant la connaissance de la profondeur caractéristique de migration verticale de ces radionucléides. Des analyses spécifiques ont été réalisées dans ce but durant l'hiver 2012 par prélèvements de sol sur 85 sites. Elles ont montré que les radiocésiums avaient peu migré en profondeur et demeuraient en moyenne confinés dans les 3 premiers centimètres de sol. La cartographie des activités en radiocésiums qui en résulte est reproduite figure 3b.

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

Pour les 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 et publiée en 2014. Cette étude réalisée sur 3 500 parcelles agricoles a montré que l'estimation des activités de radiocésiums 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 radiocésiums 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.

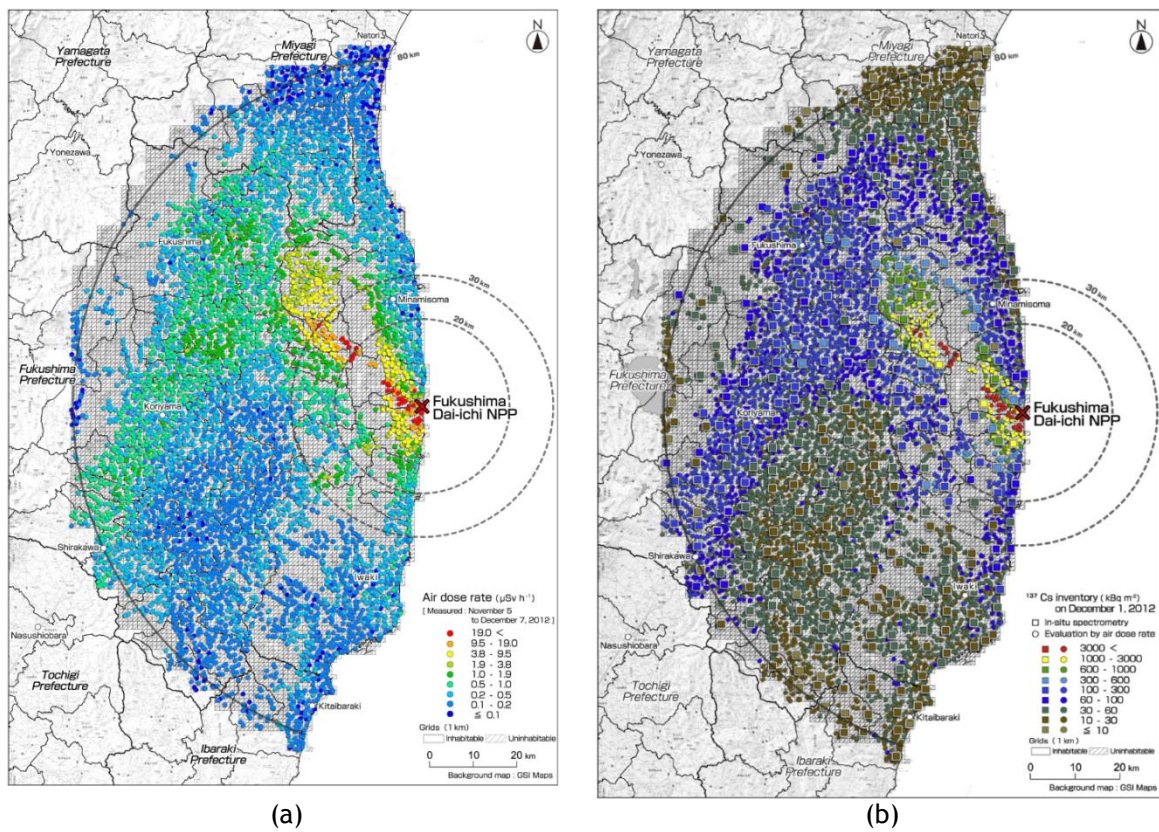


Figure 3 : Cartographie : (a) des débits de doses dans l'air (μSv/h) et (b) activités surfaciques (Bq/m²) en césium-137 dans les zones habitées sur parcelles de sol non remanié (campagne de décembre 2012). Les activités sont distinguées selon qu'elles ont été estimées d'après des mesures de débits de 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 4 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.

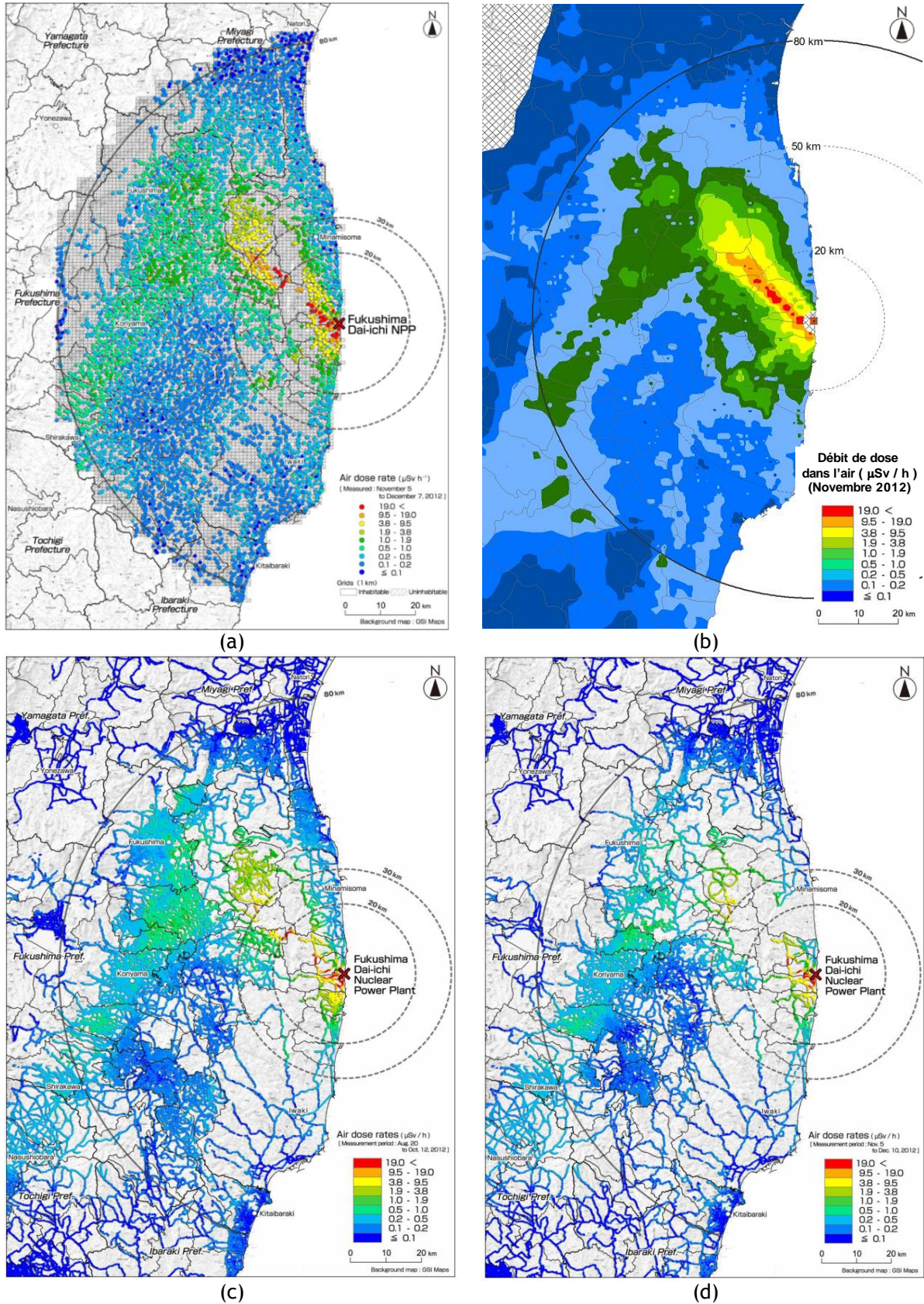


Figure 4 : Cartographies des débits de doses ($\mu\text{Sv/h}$) mesurés ou estimés à 1m du sol : d'après (a) la campagne sur parcelles de sol non remanié en zone habitée de décembre 2012, (b) la campagne aéroportée de novembre 2012, (c,d) les campagnes routières de septembre et novembre 2012, respectivement.

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 assez soutenue durant les deux premières années et s'est opérée à un rythme plus rapide 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 depuis 2013, en se conformant peu ou prou 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 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. Pour en savoir plus sur le milieu forestier, [voir la fiche spécifique](#).

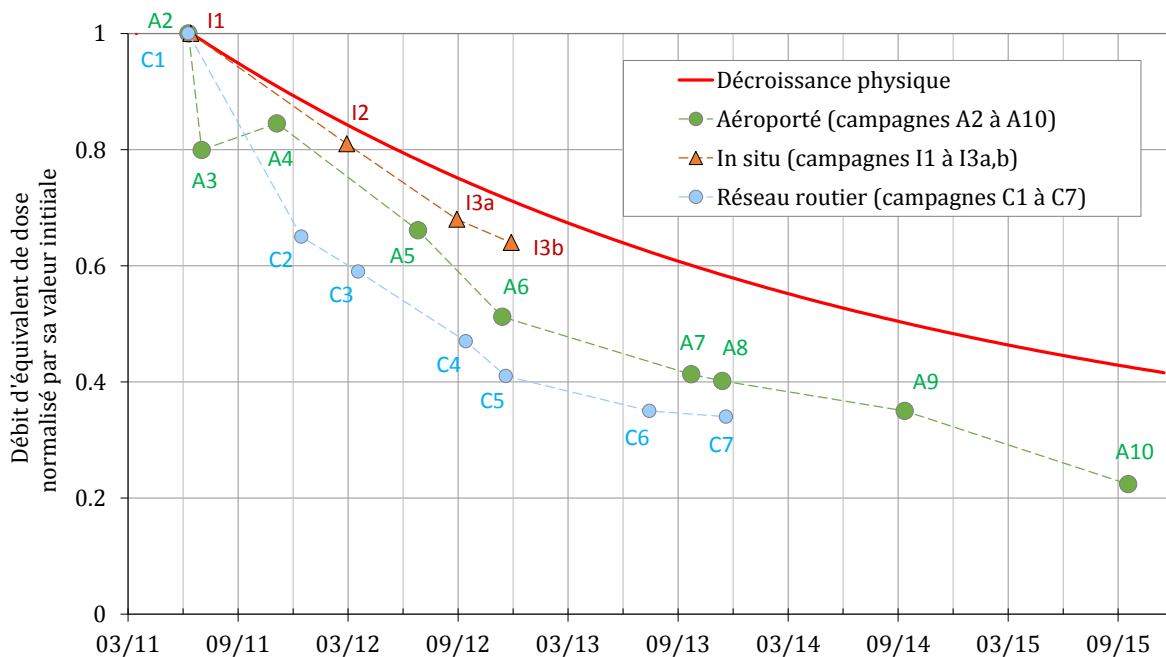


Figure 5 : Evolution dans le temps des débits de dose mesurés par l'ensemble des dispositifs déployés et évolution attendue par décroissance physique des césiums. Les valeurs représentées sont des valeurs moyennes dans un rayon de 80 km issues des campagnes A2 à A10 normalisées par le niveau initial observé en juin/juillet 2011 (campagne A1 de la figure 1). L'anomalie négative observée pour la campagne aéroportée A3 résulte de problèmes de calibration des détecteurs.

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.