

Les retombées atmosphériques du césium 137 en Franche-Comté

Pierre-Marie BADOT, Sophie LAMARQUE, Eric LUCOT, Laboratoire de Biologie Environnementale, EA 3184 USC INRA, Université de Franche-Comté ;
Daniel JOLY, laboratoire ThéMA, UMR 6049 CNRS, Université de Franche-Comté

Parmi les nombreux polluants dispersés dans l'atmosphère, il en est un que les pouvoirs publics chargés de la protection de la santé suivent tout particulièrement : il s'agit du césium 137, radio-élément artificiel préoccupant, car il présente des risques écologiques et sanitaires importants. Ainsi, depuis plusieurs années, avec l'appui du Conseil régional de Franche-Comté, l'Institut des sciences et techniques de l'environnement de l'Université de Franche-Comté a entrepris de quantifier de manière précise les niveaux d'activité de ce radioélément sur l'ensemble du territoire régional. L'étude a pour objectif de produire une cartographie des contaminations dans les sols de Franche-Comté et d'apporter des éléments d'information sur la nature et l'importance des facteurs gouvernant le devenir du césium 137 dans les écosystèmes. Or, on sait que de multiples

sources artificielles contribuent à le répandre dans l'environnement.

La radioactivité

Tous les corps présents dans la nature sont constitués d'atomes formés selon le même modèle général : un noyau central chargé positivement autour duquel gravitent des électrons de masse très faible et chargés négativement. Le noyau atomique est un objet extrêmement dense et petit qui, à la manière d'une poupée russe, contient des « poupées » plus petites, les nucléons : les protons chargés positivement et les neutrons, neutres électriquement. Les atomes se différencient par le nombre de leurs protons et celui de leurs neutrons.

Dans la nature, la plupart des noyaux sont stables. Certains, cependant, ne le sont pas en raison d'un excès de

nucléons. Ces noyaux instables sont susceptibles de se désintégrer. Lorsque cela se produit, le noyau expulse une partie de la matière et de l'énergie qu'il contient sous la forme d'un rayonnement ionisant. Il y a émission de rayonnements, d'où le nom de radioactivité donné à ce phénomène qui a été découvert, à la fin du XIX^e siècle, par Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie. Un échantillon radioactif se caractérise par son activité (nombre de désintégrations de noyaux radioactifs par seconde qui se produisent en son sein). L'unité d'activité est le *becquerel* (Bq).

Effets de la radioactivité sur l'organisme

Lorsqu'ils rencontrent de la matière, les rayonnements ionisants entrent

Dose absorbée (Sv)	Symptomatologie
0,2 – 0,3	Aucun signe clinique chez la plupart des individus
0,3 – 1,0	Baisse temporaire du nombre de lymphocytes, nausées, vomissements, anorexie chez quelques individus
1,0 – 2,0	Asthénie, nausées 3 à 6 h après l'exposition
2,0 – 4,0	Atteinte du système hématopoïétique, anémie maximale 3 semaines après l'exposition
4,0 – 4,5	DL50
4,0 – 6,0	Aplasie, hémorragies
6,0 – 7,0	Diarrhées, vomissements, hémorragies
8,0 – 10,0	Hémoptysie, insuffisance respiratoire
> 10,0	Coma, mort en 14 à 36 h

Tab. 1 - Symptômes observés consécutivement à une exposition à un rayonnement ionisant

Dose absorbée (Sv/an)	Expositions de référence
0,050	Limite annuelle d'exposition pour les travailleurs
0,01	Limite annuelle d'exposition pour la population (sauf exceptions)
0,0025	Irradiation naturelle moyenne en France par an
0,001	Exposition médicale moyenne (scanner, radiographie...)
0,0006	Vol aérien Paris – New York
0,00003	Radiographie dentaire
0,000004	Retombées moyennes de l'accident de Tchernobyl en France

Tab. 2 - Effets d'une radio-exposition aiguë chez l'adulte sain

en collision avec les atomes qui la constituent. Au cours de ces interactions, ils déposent tout ou partie de leur énergie. La mesure de la dose absorbée est exprimée en *gray* (Gy). Ces rayonnements ont un fort pouvoir mutagène qui, avec beaucoup d'autres facteurs, est responsable de l'évolution des organismes vivants. Toutefois, ils sont souvent dangereux pour les êtres vivants, car, en raison de leur énergie, ils peuvent perturber les bases du fonctionnement cellulaire : lésions moléculaires et cellulaires, lésions tissulaires qui peuvent être létales si la dose reçue dépasse un certain seuil. Globalement, la gravité des effets augmente avec la dose. Il existe aussi des conséquences tardives, parfois à long terme, d'une exposition aux rayonnements ionisants, avec par exemple l'apparition de leucémies et tumeurs cancéreuses, ou dans la descendance de l'individu exposé (anomalies chromosomiques) (tableaux 1 et 2).

Expositions radioactives

Les expositions aux différents rayonnements sont mesurées par l'équivalent de dose, dont l'unité de mesure est le *sievert* (Sv). La dose équivalente est calculée à partir de la dose (exprimée en Gy) absorbée par les différents tissus exposés, en appliquant des facteurs de pondération qui tiennent compte du type de rayonnement (alpha, bêta, gamma, X, neutrons), des modalités d'exposition (externe ou interne) et de la sensibilité spécifique des organes. Deux sous-multiples du *sievert* sont très fréquemment utilisés : le *millisievert* ou *millième de Sv* (mSv) et le *microsievert* ou *millionième de Sv* (µSv).

L'exposition naturelle est variable d'un site à l'autre. En France, la dose moyenne reçue annuellement est de l'ordre de 4 mSv. Cette dose a pour partie une origine naturelle (67 %) et une origine artificielle (33 %). L'origine naturelle de loin la plus importante est due au radon, gaz d'origine naturelle, émanant du sous-sol.

L'exposition à des radionucléides artificiels correspond, quant à elle, essentiellement aux usages médicaux de la radioactivité (30 %) et pour une faible part aux usages industriels (2 %) et aux retombées atmosphériques (1 %) (figures 1 et 2).

Dès leur émission dans l'air ou les milieux aquatiques, les polluants sont l'objet de transports par le vent, les courants, la gravité. Leurs transferts aux milieux physico-chimiques voisins s'effectuent par de très nombreux processus qui contribuent à la dispersion des polluants loin du lieu de leur émission et s'accompagnent de leur plus ou moins grande dilution. Schématiquement, l'importance des retombées en un lieu donné est fonction :

- des conditions météorologiques locales au moment du dépôt ;
- du relief ;
- des mécanismes de dépôt : dépôt sec par gravité, dépôt humide lors de précipitations ;
- de l'intensité de l'interception par la végétation...

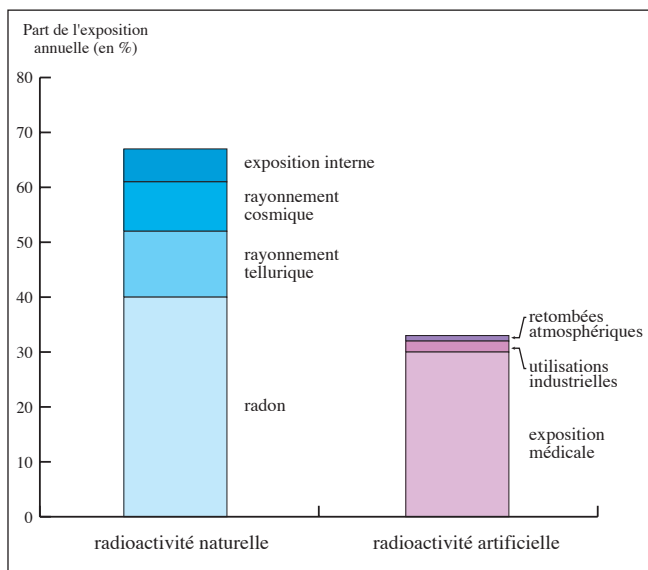


Fig. 1 - Exposition moyenne en France de la dose annuelle (4 mSv)

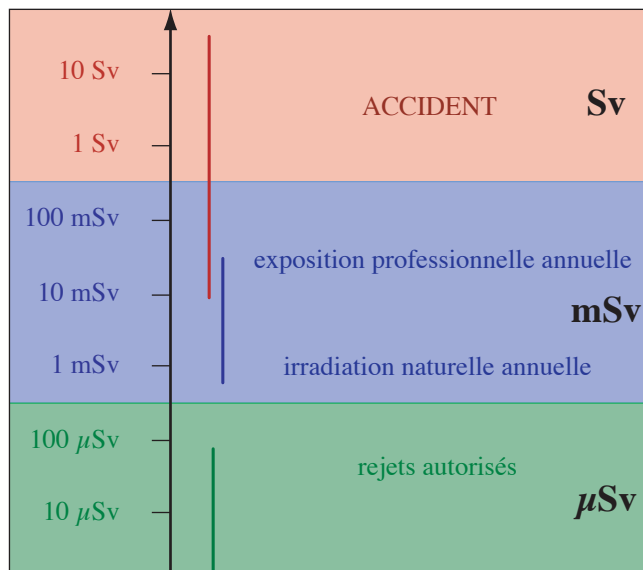


Fig. 2 - Principaux ordres de grandeur des expositions

Le césium 137

Le césium 137, élément radioactif à durée de vie moyenne (30 ans), est produit avec une relative abondance dans les réactions de fission. L'attention prêtée au césium 137 tient au fait qu'à l'échelle d'une centaine d'années, il est l'une des principales sources de radioactivité des déchets des réacteurs nucléaires. Du césium 137 a été dispersé lors des essais atmosphériques des armes atomiques et lors des accidents de centrales nucléaires. Cet isotope contribuait, dans les années 1960, pour 1 % à 4 % de la radioactivité naturelle du corps humain. Elle a beaucoup décru depuis, davantage du fait de la dispersion que du temps écoulé.

Dès son émission, ce polluant est l'objet de transferts dans l'environnement, ce qui contribue à sa dispersion loin de son lieu d'émission et de sa dilution. L'importance des retombées est fonction des conditions météorologiques locales au moment du passage du polluant, du relief, des mécanismes de dépôt, de l'intensité de l'interception par la végétation, etc. Aussi, la contamination varie fortement d'un point à un autre. Le plus souvent, des zones très contaminées jouxtent des zones peu ou pas contaminées : les cartes de contamination présentent ainsi des aspects en « taches de léopard ».

Fixé par les minéraux, le césium 137 se lie aux constituants solides des sols. Seule une fraction faible (10 % à 15 %), présente sous forme soluble, est transportable, et donc facilement disponible pour les organismes vivants et notamment pour la végétation. Il peut éventuellement se concentrer dans certains compartiments des réseaux alimentaires comme, par exemple, dans la chair des poissons ou du gibier.

La catastrophe de Tchernobyl

Le 26 avril 1986, un accident nucléaire grave est survenu dans la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, en raison d'une série d'erreurs commises par les techniciens de la centrale et d'une conception non sécurisée de la centrale. À la différence d'une arme nucléaire, un réacteur civil ne contient pas suffisamment de matière fissile pour atteindre la masse critique et risquer de provoquer une explosion nucléaire. En revanche, lorsque la chaleur produite par le réacteur n'est plus évacuée en quantité suffisante par le système de refroidissement, le combustible nucléaire se met à fondre. À Tchernobyl, la pression des gaz provenant de la fusion du réacteur a fait exploser la dalle de béton recouvrant le réacteur, si bien que les gaz brûlants composés d'isotopes radioactifs, dont le césium 137, se sont échappés et se sont condensés dans l'atmosphère pour former un nuage radioactif qui s'est déplacé, sous l'effet du vent, vers l'ouest sur plusieurs milliers de kilomètres pendant les jours qui ont suivi. Les particules radioactives sont retombées sur une large zone géographique couvrant une grande partie de l'Europe, avant d'atteindre la France le 29 avril 1986. En raison de sa situation géographique, la Franche-Comté a été l'une des régions françaises les plus exposées, notamment à l'occasion des épisodes pluvieux qui ont suivi l'accident.

L'observation du césium en Franche-Comté

L'évaluation des niveaux de contamination en Franche-Comté a fait l'objet d'une vaste étude visant à apporter une connaissance précise

sur la distribution spatiale des contaminations radioactives. Ce préalable est indispensable à l'étude des phénomènes qui président à l'absorption des radioéléments dans les sols et à leur transfert aux organismes. La première étape de l'étude a consisté à choisir des points de mesure du césium selon un protocole d'échantillonnage rigoureux. Les sites, 186 au total, ont été identifiés de manière telle que les différentes combinaisons de facteurs du milieu soient représentées. Il a été tenu compte :

- de la minéralogie de la roche mère (calcaire, grès, granite...) ;
- de la perméabilité du substrat géologique (hyper drainant, drainant, étanche...) ;
- du contexte topographique (plateau, vallée, versant...) et de la position topographique dans le relief général (haut de pente, bas de pente...) ;
- des principaux types de sols et de leurs propriétés physico-chimiques et hydriques ;
- des principaux types de végétation, espèces dominantes, modes de gestion...

La campagne de mesure a été effectuée en 1996. Dans chaque site, ont été effectuées des descriptions précises de la végétation (type, espèces indicatrices), du type d'humus (en forêt) et du sol, pour deux niveaux compris entre 0 et 5 cm de profondeur et entre 10 et 15 cm de profondeur (figure 3).

Les prélèvements d'échantillons de sols ont été analysés par spectrométrie gamma. Les valeurs obtenues ont ensuite été cartographiées. Dans la mesure où les observations se réfèrent à des sites localisés ponctuellement, il nous a d'abord fallu avoir recours à une méthode d'interpola-

tion visant à reconstituer les champs spatiaux du césium (pour la méthode d'interpolation, voir *Images de Franche-Comté* n°27, p. 14).

Cartographie des contaminations

Les valeurs obtenues sont plus élevées que celles rapportées usuellement dans la littérature scientifique, puisque les données de l'Agence de

l'énergie nucléaire de l'OCDE font état d'une contamination moyenne de l'ordre de 4 kBq/m² pour l'ensemble de la Franche-Comté. De la même manière, l'Atlas des dépôts de césium en Europe après l'accident de Tchernobyl de la Commission des communautés européennes (1998) rapporte, pour le territoire régional, des valeurs comprises entre 4 et 20 kBq/m² selon les zones.

L'étude menée sur les 186 sites d'échantillonnage francs-comtois montre que tous les sols étudiés sont contaminés par le césium 137.

La contamination du territoire régional est hétérogène. L'activité en césium 137 est globalement plus forte en altitude, principalement dans le sud de la région (figure 4). Il convient de noter que les sols d'altitude sont aussi parmi les plus humifères, caractère qui renforce la fixation du césium. La variabilité spatiale est localement importante. Plusieurs facteurs sont potentiellement à l'origine de ces différences : historique des dépôts, nature de la végétation, occupation et fonctionnement des sols. Deux zones montrent des contaminations relativement plus élevées que le reste de la région : le nord-est et le sud-est de la Franche-Comté. Même dans ces zones, les valeurs d'activité enregistrées restent cependant modestes et les contaminations résiduelles ne constituent pas une source de préoccupations majeures pour la santé publique.

Les « effets Tchernobyl » sont-ils perceptibles en Franche-Comté ?

Pour répondre à cette question, deux analyses ont été effectuées. La première consiste à comparer les valeurs mesurées en 1996 avec celles obtenues de deux campagnes antérieures à Tchernobyl. Les échantillons de sols prélevés entre 1979 et 1983 sont contaminés de manière sensible. Les activités moyennes en césium 137 s'échelonnent entre 6 et 16 kBq/m² selon les quatre zones altitudinales étudiées. Entre 230 m et 1000 m d'altitude, la contamination augmente avec l'altitude, alors qu'elle

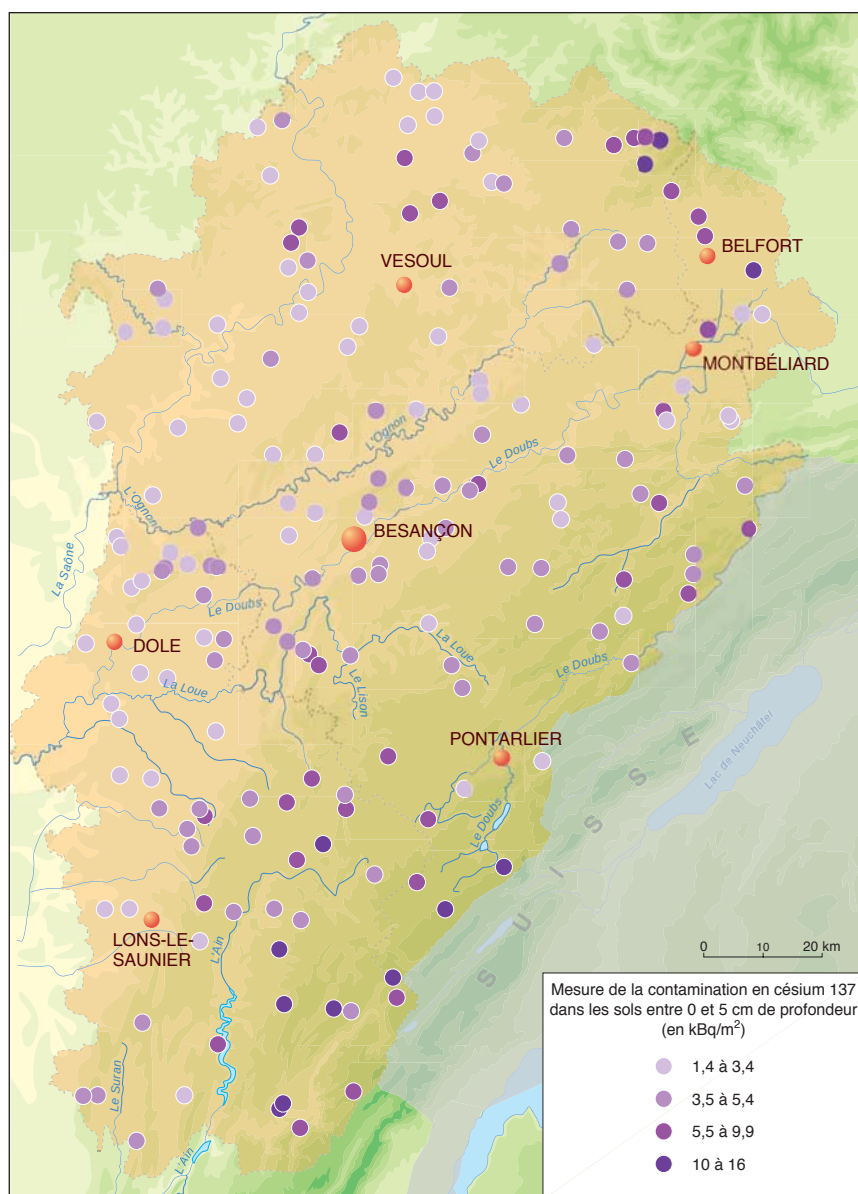


Fig. 3 - Localisation des points de mesure

décroît légèrement pour les altitudes supérieures à 1300 m. Ces résultats montrent que la Franche-Comté a fait l'objet de retombées radioactives de césium 137 avant l'accident d'avril 1986. L'origine la plus probable pour ces contaminations réside dans les essais atmosphériques d'armes nucléaires. Les valeurs observées en Franche-Comté sem-

blent en moyenne plus élevées que celles publiées par la Commission des communautés européennes (1998) qui sont de l'ordre de 2,4 kBq/m² pour les latitudes comprises entre 40° et 50°N. Les activités moyennes des échantillons de sol prélevés en 1996 sont comprises entre 4 et 50 kBq/m². L'accident de Tchernobyl s'est ainsi traduit par une augmentation

sensible des contaminations radioactives pour les zones d'altitude. En plaine, on constate au contraire que l'ordre de grandeur de la contamination n'a pas varié.

Césium et précipitations de mai 1986

Un deuxième moyen d'évaluer l'influence des retombées de Tchernobyl en Franche-Comté est de comparer la variation spatiale du césium mesuré en 1996 avec celle des précipitations tombées en mai 1986. On sait, en effet, que les particules de césium ont été précipitées au sol seulement s'il a plu pendant qu'elles survolaient la région. Il devrait ainsi y avoir corrélation spatiale entre les deux variables : là où, en mai 1986, il a plu, il doit y avoir aujourd'hui des taux élevés de césium et, là où il n'a pas plu, il doit y avoir des abondances de césium moindres, analogues à celles qui furent mesurées avant 1986. Pour tester cette hypothèse, il nous a d'abord fallu cartographier la variation spatiale des précipitations tombées entre la fin avril et la fin mai 1986, laps durant lequel le nuage radioactif a pu, à un moment ou à un autre, affecter la région. Il est important de souligner que l'on ne sait pas avec précision quand le nuage est passé ; il semble d'ailleurs que deux phases de contamination se soient produites en Franche-Comté, l'une début mai, après l'accident du 26 avril, l'autre plus tard, consécutivement à une seconde émanation de produits radioactifs à Tchernobyl. Aussi, afin d'affiner l'évaluation, les abats de pluie ont été regroupés en 7 séquences de 5 ou 6 jours chacune : 26-31 avril, 1-5 mai, 6-10 mai, ..., 25-31 mai. Les précipitations étant mesu-

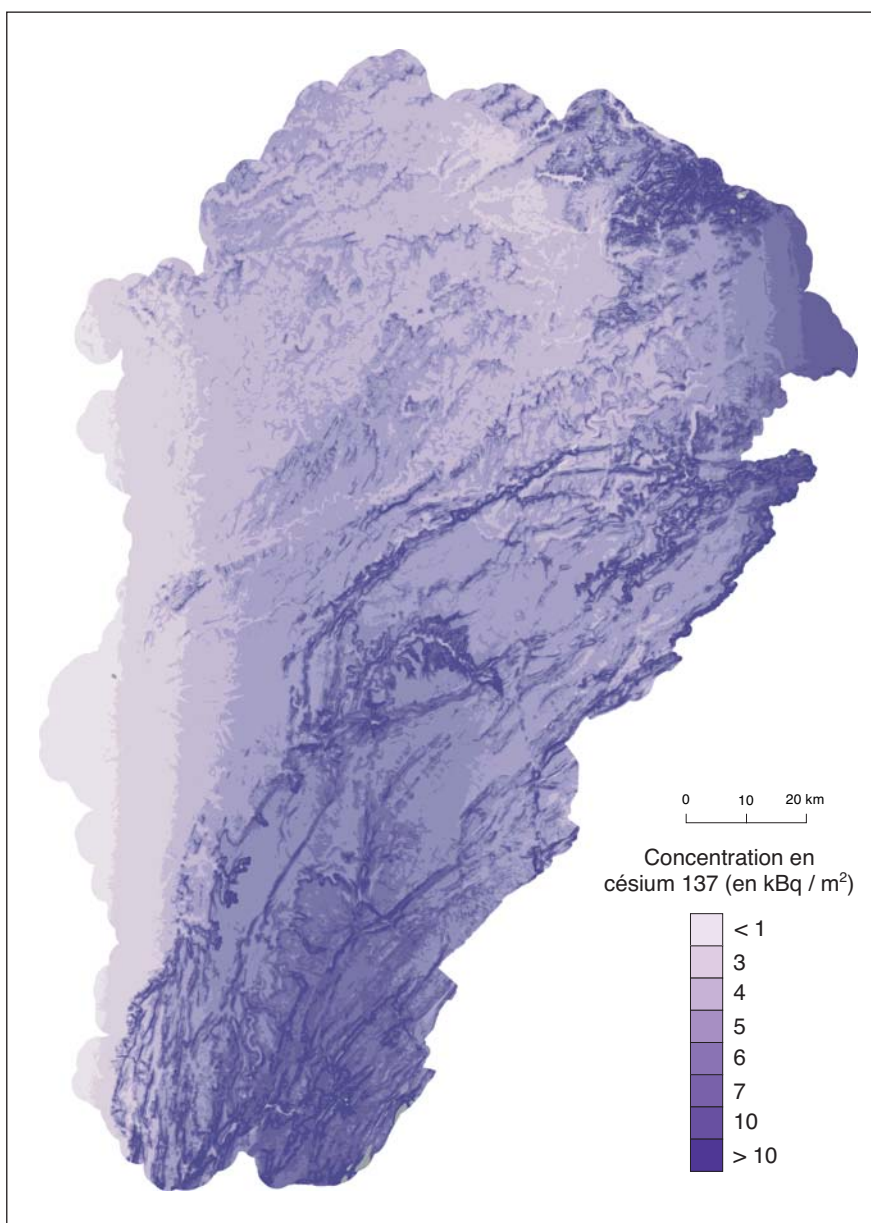


Fig. 4 - Distribution spatiale du césium prélevé à 5 cm dans le sol

rées ponctuellement (en 106 postes gérés par Météo-France), de surcroît, en des lieux différents des sites où le césium a été observé, elles ont, elles aussi, été interpolées. *In fine*, on obtient sept cartes des précipitations correspondant à chacune des sept séquences prises en considération.

A titre d'exemple, la carte de la figure 5 montre indubitablement une évidente parenté avec celle du césium (figure 4) : la Haute Chaîne du Jura et ses extensions vers le second plateau, les rides topographiques du premier plateau ainsi que celles des Avants-Monts, les Vosges et la Trouée de Belfort présentent des valeurs élevées, tant pour le césium que pour les précipitations qui se sont abattues sur la région du 6 au 10 mai 1986. En revanche, la bordure ouest de la Franche-Comté, les vallées de la Saône, de l'Ognon et du Doubs jusqu'à Montbéliard présentent des valeurs faibles pour les deux variables.

Les valeurs obtenues, couvrant l'ensemble de la Franche-Comté, permettent également de connaître les volumes pluviométriques qui se sont abattus sur les « sites-césium ». Des calculs de corrélation peuvent alors être effectués. Le césium, variable expliquée, peut, par un traitement statistique, être expliqué par les précipitations, variables explicatives. Le coefficient de corrélation que l'on obtient est une mesure du degré de liaison spatiale qui existe entre les deux variables. Entre le césium et les précipitations du 6-10 mai 1986, le coefficient s'établit à 0,4, ce qui confirme la relativement bonne co-variation spatiale des deux phénomènes.

Un traitement identique entre le césium et les six autres séquences de

précipitation a été effectué. Les résultats (figure 6), nous apprennent que les meilleures corrélations entre précipitation et césium se sont produites au cours des laps 6-10 mai et 20-31 mai. Les autres périodes présentent des corrélations faibles (jusqu'au 5 mai), voire négatives (10-20 mai). Il convient toutefois de préciser que la corrélation est des-

criptive : ce que le graphique montre, c'est que les pluies du 5-10 mai et du 21-31 mai se sont produites sur des lieux où le césium est abondant. Mais est-ce que cela veut dire que les pluies en question ont lavé le césium de l'atmosphère, l'entraînant vers le sol ? C'est possible, probable sans doute. *A contrario*, il ne faudrait pas déduire des corrélations négatives

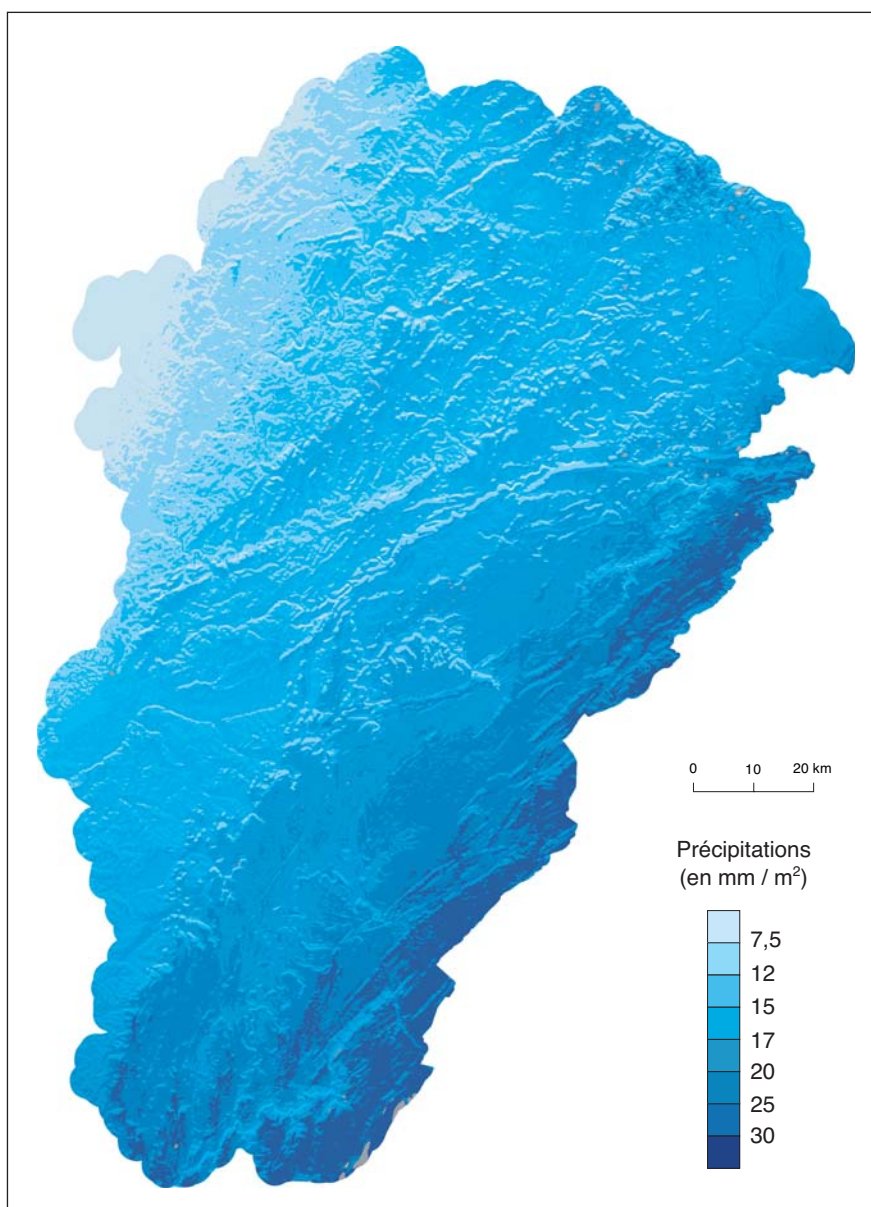
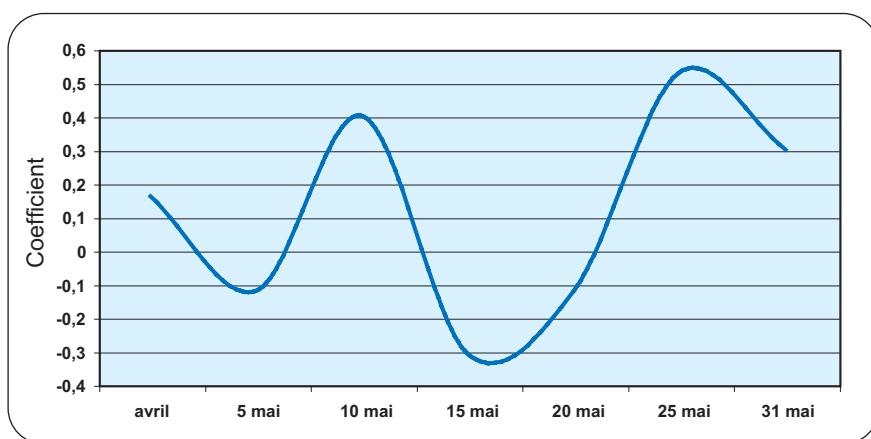


Fig. 5 - Distribution spatiale du volume des précipitations tombées entre le 6 et le 10 mai 1986

Fig. 6 - Coefficients de corrélation entre les 7 séquences de précipitation et le césium



que les précipitations ont nettoyé le césium où il s'était accumulé. Dans ce cas, il y a simplement une structure spatiale des précipitations qui n'est pas calée sur celle du césium (il a plus plu là où le césium est peu abondant).

Conclusion

La Franche-Comté a été affectée, comme de nombreuses autres régions d'Europe, par les retombées radioactives de césium. Les essais atmosphériques d'armes nucléaires (1945-1963) et l'accident de Tchernobyl sont les sources principales des contaminations actuellement détectables dans les sols francs-comtois. On peut estimer que les essais nucléaires et l'accident de 1986 contribuent respectivement pour approximativement 30 % et 70 % de la contamination totale de notre région.

Comme dans de nombreux autres lieux du globe, ces contaminations montrent une grande variabilité spatiale. Ceci tient à deux facteurs principaux :

- la variabilité des retombées liée à la trajectoire des masses d'air contaminées, au relief et aux conditions météorologiques, etc.
- La variabilité spatiale du devenir du césium postérieurement aux retombées, variabilité liée au fonctionnement des écosystèmes (propriétés et régimes hydriques des sols, couverture végétale, réseaux trophiques, etc.).

Le sud-est et le nord-est de la région sont comparativement plus contaminés que le reste de la Franche-Comté. En règle générale, les régions situées en altitude le sont plus que les zones de plaine. Les niveaux de contamination mesurés dans l'étude conduite en Franche-Comté, même s'ils sont plus élevés que ceux rapportés jusqu'ici dans la littérature, demeurent modestes, tout comme leur contribution à l'exposition moyenne annuelle de la population.

La Franche-Comté est ainsi la seule région française à disposer d'une étude de cette ampleur. Les informations obtenues sont d'une grande valeur car les activités mesurées peuvent être interprétées en fonction du contexte écologique local, qui a

été pris en compte dès l'échantillonnage. En se situant dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire pour les activités les plus élevées mesurées en Franche-Comté et pour l'estimation la plus défavorable, les contaminations relevées dans notre région correspondraient à des doses annuelles de l'ordre de 0,1 mSv, ce qui demeure très inférieur aux valeurs communément admises d'exposition moyenne de la population française (4 mSv/an), bien en deçà des ordres de grandeur d'exposition moyenne consentie pour les utilisations médicales de la radioactivité ■