

Zeitschrift:	Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg
Herausgeber:	Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles
Band:	89 (2000)
Heft:	1: 40 Jahre Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz = 40 ans de surveillance de la radioactivité en Suisse
Artikel:	Retour sur 40 ans de surveillance de la radioactivité en Suisse : enseignements des séries temporelles de mesures de l'environnement jusqu'à l'homme
Autor:	Murith, C. / Gurtner, A.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-308798

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 29.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Retour sur 40 ans de surveillance de la radioactivité en Suisse: enseignements des séries temporelles de mesures de l'environnement jusqu'à l'homme

Ch. MURITH, A. GURTNER

Section de surveillance de la radioactivité (OFSP),

chemin du Musée 3, CH-1700 Fribourg

Tél.: +41 26 300 91 65; Fax: + 41 26 300 97 43;

E-mail: christophe.murith@bag.admin.ch

Le point, plus d'un siècle après la découverte de Becquerel

Depuis 40 ans la radioactivité en Suisse fait l'objet d'une surveillance régulière en vue de garantir la protection du public contre les rayonnements ionisants. Au long de ces années la radioprotection a du s'adapter aux aléas de l'histoire et aux progrès de la technique (Fig. 1). Le bilan de ces 40 ans de surveillance met en évidence la prédominance de la radioactivité naturelle du point de vue de l'exposition de la population. Deux sources principales contribuent à cette exposition: les particules de haute énergie du rayonnement cosmique atteignant l'atmosphère terrestre et les radionucléides radioactifs provenant de la croûte terrestre, qui marquent notre environnement, nos maisons et notre propre corps. Ces sources responsables de notre exposition externe et interne constituent le bruit de fond naturel. Celui-ci varie dans l'espace selon l'altitude et aussi selon les sols et leur origine géologique et dans le temps en fonction surtout des paramètres météorologiques. A ces expositions naturelles permanentes et inéluctables de la vie sur terre se sont ajoutées des contributions liées à la civilisation. Les plus marquantes ont été engendrées par les essais nucléaires des années 60 et par l'accident au réacteur de Tchernobyl en avril 1986. Il n'en demeure pas moins que sur la période des 40 ans en question, les expositions dues au bruit de fond naturel s'avèrent bien plus significatives pour la population suisse que l'ensemble des expositions d'origine artificielle.

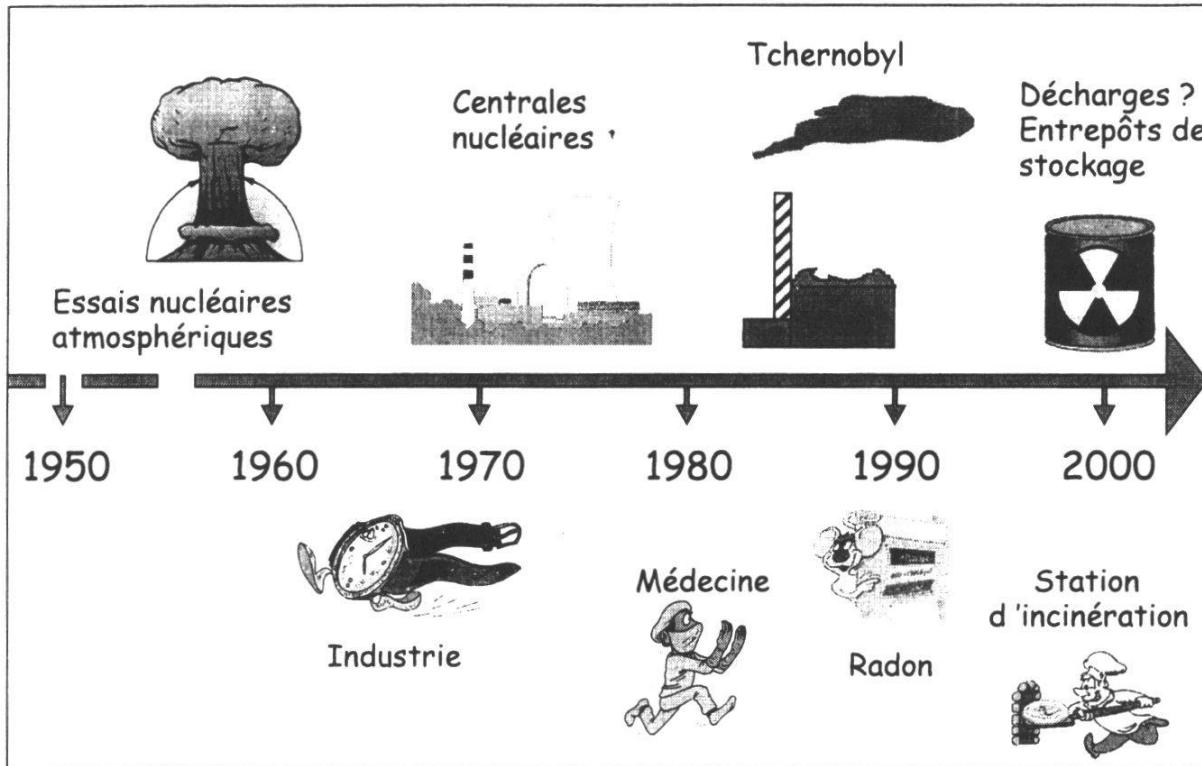
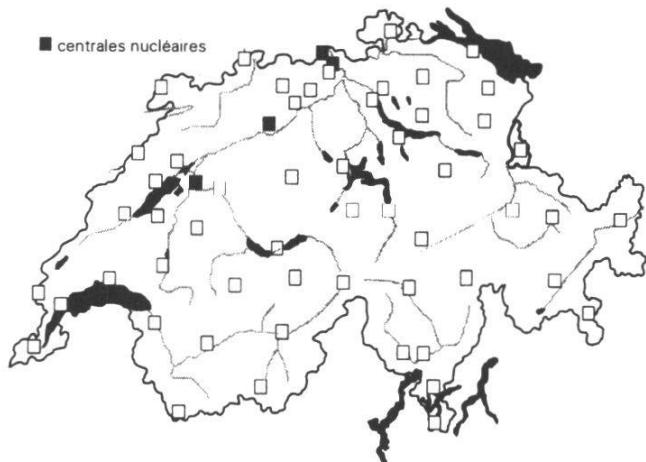


Fig. 1: Les enjeux de la radioprotection: s'adapter coûte que coûte.

1. L'exposition ambiante: le baromètre radiologique en alerte 24 h sur 24

L'exposition externe est habituellement recensée de manière globale, sans distinction de ses composantes. La Suisse dispose d'un réseau de 58 stations (NADAM) sur l'ensemble du territoire et d'un réseau de 57 stations (MADUK) auprès des installations nucléaires (Fig. 2). L'objectif de ces mesures en continu est de signaler des augmentations anormales du débit d'exposition. Ce dernier est cependant sujet à des fluctuations naturelles. Les caprices de la météo, pluie, neige et activité solaire (Fig. 3) influencent l'exposition ambiante. L'altitude est déterminante pour l'exposition au rayonnement naturel d'origine cosmique. Un vol de ligne de 10 h à 10 000 m occasionne par exemple pour les passagers une exposition supplémentaire d'environ 0.05 mSv. Les mesures de l'exposition ambiante avec une chambre d'ionisation lors d'un vol en ballon (Murith, 1987) illustrent l'augmentation du rayonnement cosmique (Fig. 4) en fonction de l'altitude. La mesure sur le lac de Neuchâtel, où la part terrestre est absorbée, permet d'extrapoler la contribution cosmique au niveau du sol. Il est ainsi possible de différencier localement l'exposition au rayonnement cosmique de celle attribuable aux rayonnements gamma des radionucléides primordiaux des séries ^{238}U et ^{232}Th et du ^{40}K , naturellement présents dans la croûte terrestre. Au niveau de la mer, l'exposition externe attribuable au *rayonnement cosmique* représente 0,27 mSv/an, dont 0,03 mSv/an de la composante neutronique de ce rayonnement (UNSCEAR, 1993).



Réseau NADAM-NAZ: 58 stations



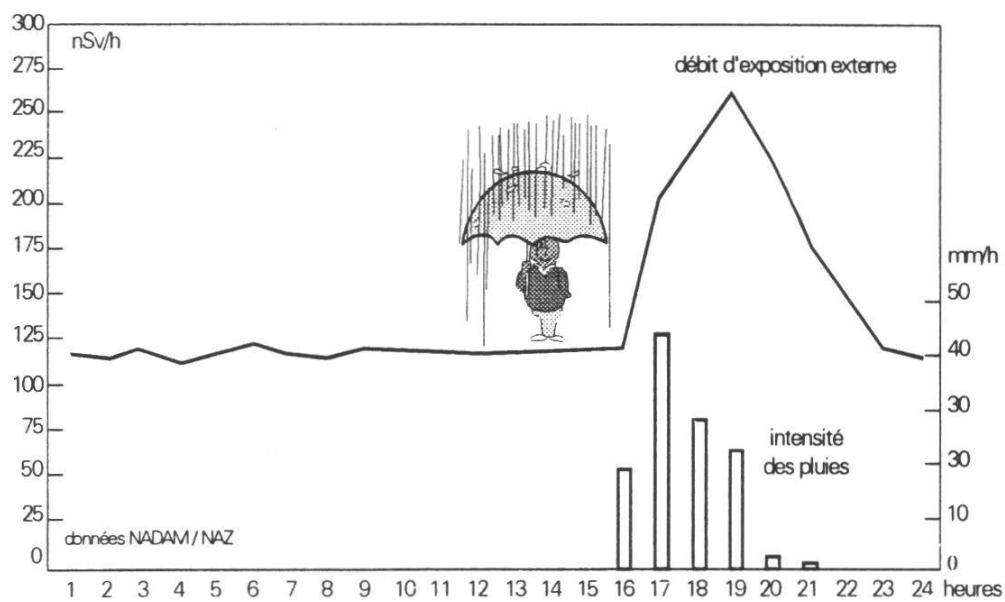
Réseau MADUK-HSK: 57 stations

Fig. 2: En alerte 24 heures sur 24: à gauche: réseau suisse; à droite: exemple d'une centrale nucléaire (Gösgen)

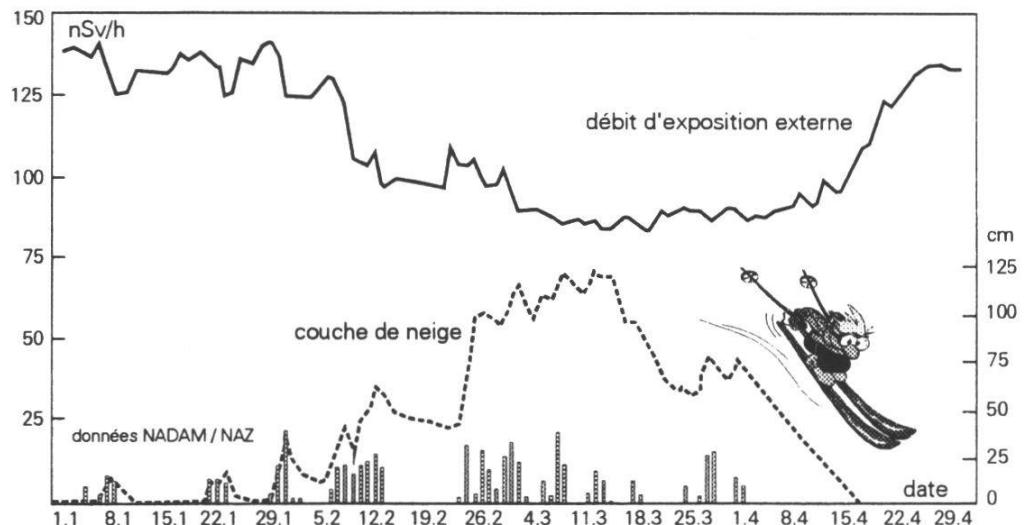
L'exposition externe due aux radionucléides primordiaux dépend essentiellement des sols et de leur origine géologique. Elle peut être déterminée directement par spectrométrie gamma in situ (ICRU 53, 1994). Cette technique de mesure performante est exploitée en Suisse depuis 1984. Ces mesures indiquent en moyenne pour la Suisse les concentrations et les débits d'exposition suivants: ^{238}U (26 Bq/kg et 12 nGy/h), ^{232}Th (25 Bq/kg et 15 nGy/h), ^{40}K (370 Bq/kg et 15 nGy/h). Les débits d'exposition sont calculés à 1m du sol et tiennent compte de tous les descendants supposés en équilibre. En plus de la variabilité géologique, on observe parfois l'influence des engrains sur les concentrations de ^{40}K et celle liée au dépôt des descendants du radon par la pluie. L'exposition au *rayonnement terrestre* obtenue par cartographie géostatistique des séries de mesures in situ (Allen, 1998) traduit la variabilité de cette composante sur le territoire suisse et fait ressortir les régions aux niveaux élevés (Fig.5). Les comparaisons avec les mesures de l'exposition externe globale (chambre d'ionisation) attestent de la fiabilité des contributions individuelles calculées à partir des concentrations in situ mesurées dans le sol, et en surface de celui-ci ou dans l'air, en cas de contamination (Murith, 1996). Les principaux atouts de la méthode par rapport aux mesures d'échantillons en laboratoire sont la disponibilité rapide des composantes du rayonnement gamma sur le site et l'obtention de moyennes sur des variations spatiales des sources à faible échelle, qui ne sont en réalité pas relevantes du point de vue de l'exposition ambiante.

Les matériaux de construction selon leur provenance renferment aussi dans différentes proportions les radionucléides primordiaux. Les comparaisons de l'exposition externe en plein air et dans des maisons à proximité indiquent en Suisse des valeurs en moyenne 10% plus élevées à l'intérieur qu'à l'extérieur (Fig.6). Cela semble signifier que l'exposition issue des radionu-

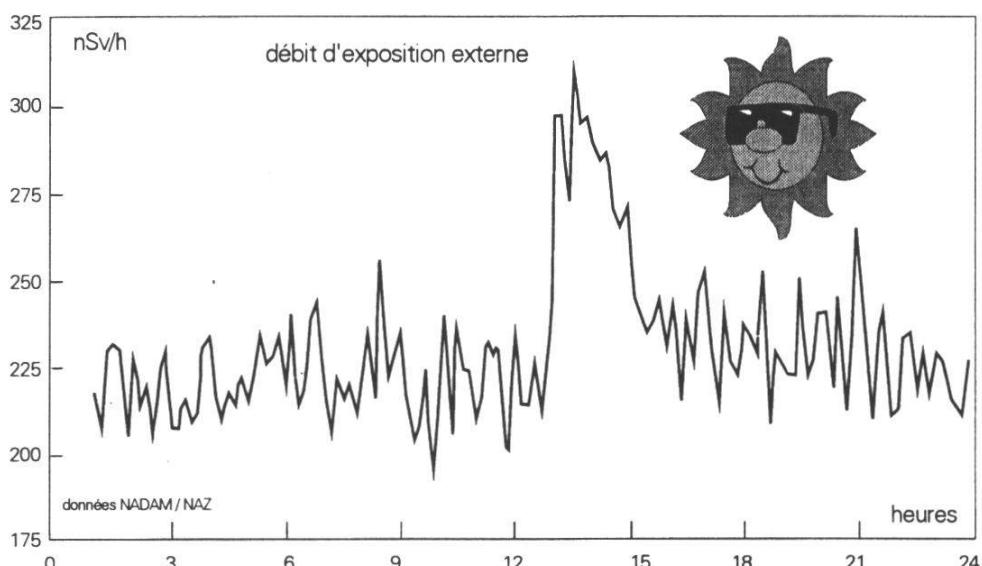
Fig. 3: Les caprices de la météo sur l'exposition ambiante.



Influence des précipitations.



Influence des précipitations et de la couverture neigeuse sur l'exposition externe.



Influence d'une éruption solaire (Jungfraujoch, 3700 m).

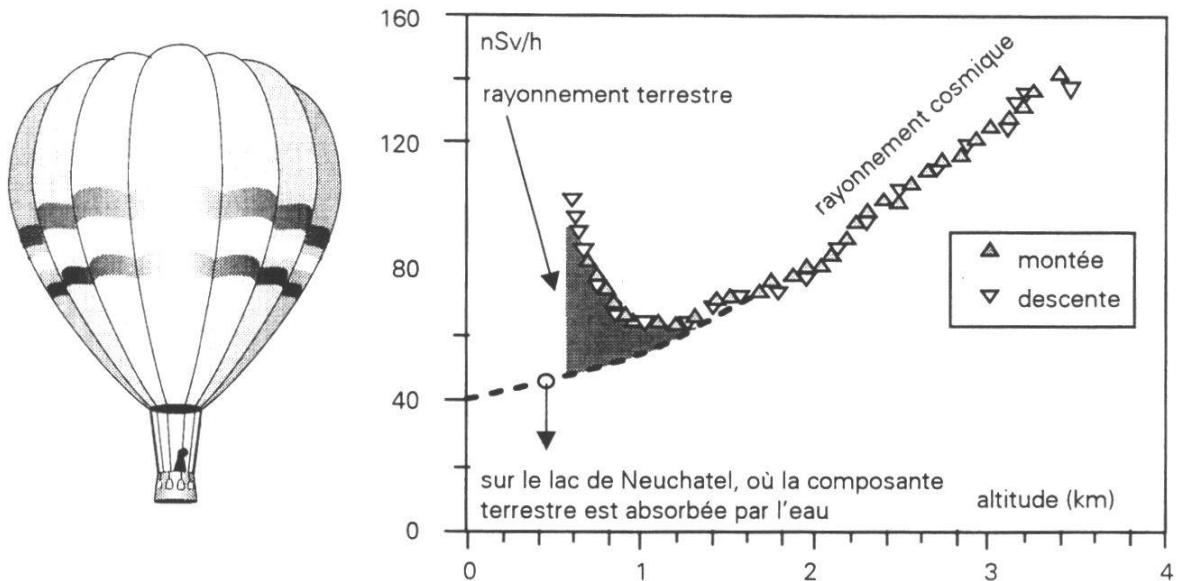


Fig. 4: Le rayonnement cosmique prend de l'altitude.

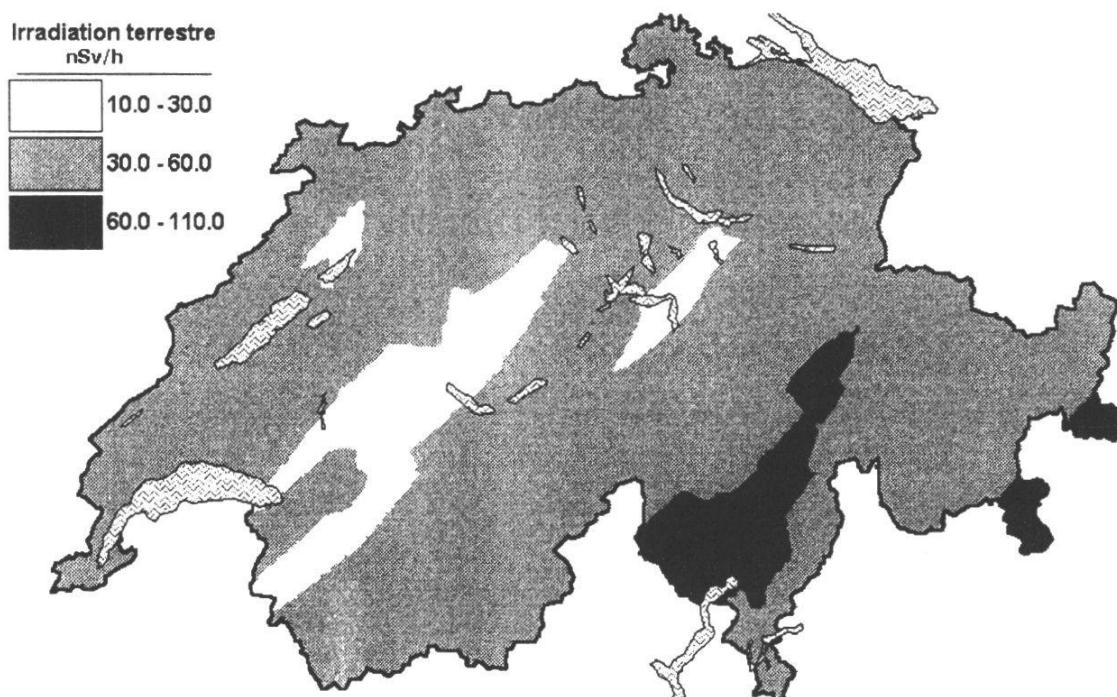


Fig. 5: La cartographie gamma in situ pour scruter l'épiderme de la terre.

cléides primordiaux dans les matériaux de construction est généralement plus importante que la réduction de la part cosmique due à la structure du bâtiment. Si l'on tient compte d'un séjour plus fréquent à l'intérieur (19h/jour) qu'à l'extérieur (5h/jour), l'exposition externe d'origine naturelle en Suisse correspond en moyenne à une dose efficace de 0,8 mSv/an pour un domaine de variation s'échelonnant de 0,5 à 2 mSv/an.

L'exemple de suivi de l'exposition ambiante annuelle (Fig. 7) met en évidence la part naturelle et ses fluctuations dans le voisinage du réacteur à eau pressurisée de Gösgen-Däniken ainsi que le rayonnement direct du produit d'activation ^{16}N provenant de la turbine du réacteur à eau bouillante de Leibstadt.

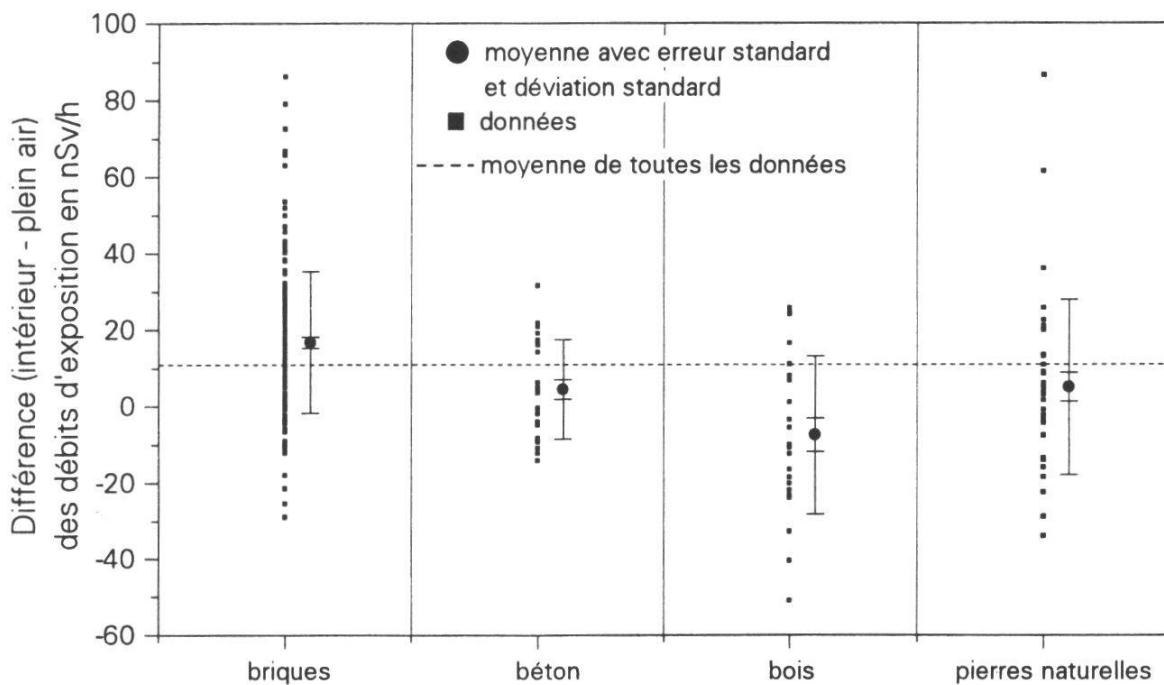


Fig. 6: La radioactivité, une «brique» élémentaire des matériaux de construction.

La surveillance de l'exposition ambiante est insuffisante pour une juste appréciation de l'impact radiologique sur l'homme et son environnement. Ainsi le suivi annuel auprès du réacteur à eau pressurisée de Gösgen-Däniken confirme que l'exposition se résume pratiquement à la part naturelle, car même l'influence de Tchernobyl sur les valeurs annuelles 1986 ne ressort pas de manière très significative du fond naturel et de ses fluctuations. Par contre l'influence maximale du rayonnement direct à la clôture du réacteur à eau bouillante de Leibstadt après sa mise en service (1985) apparaît clairement. Ce rayonnement localisé, qui décroît avec le carré de la distance, a néanmoins un impact moindre sur l'environnement et sa population par rapport à celui lié aux radionucléides de Tchernobyl, dont la contribution à l'échelle nationale ne se limite pas à l'exposition externe mais se répercute aussi sur l'exposition interne par inhalation et par ingestion. Il importe par conséquent de déterminer spécifiquement les radionucléides présents dans les différents compartiments environnementaux et d'en surveiller l'accumulation et le transfert jusque dans le corps humain. La composante d'origine artificielle peut être distinguée de celle d'origine naturelle par spectrométrie gamma in situ. Cette distinction (Fig. 8) permet de suivre le recul de la contribution artificielle à l'exposition externe en raison de la décroissance des contaminants gamma impliqués et de leur transfert partiel dans le sol.

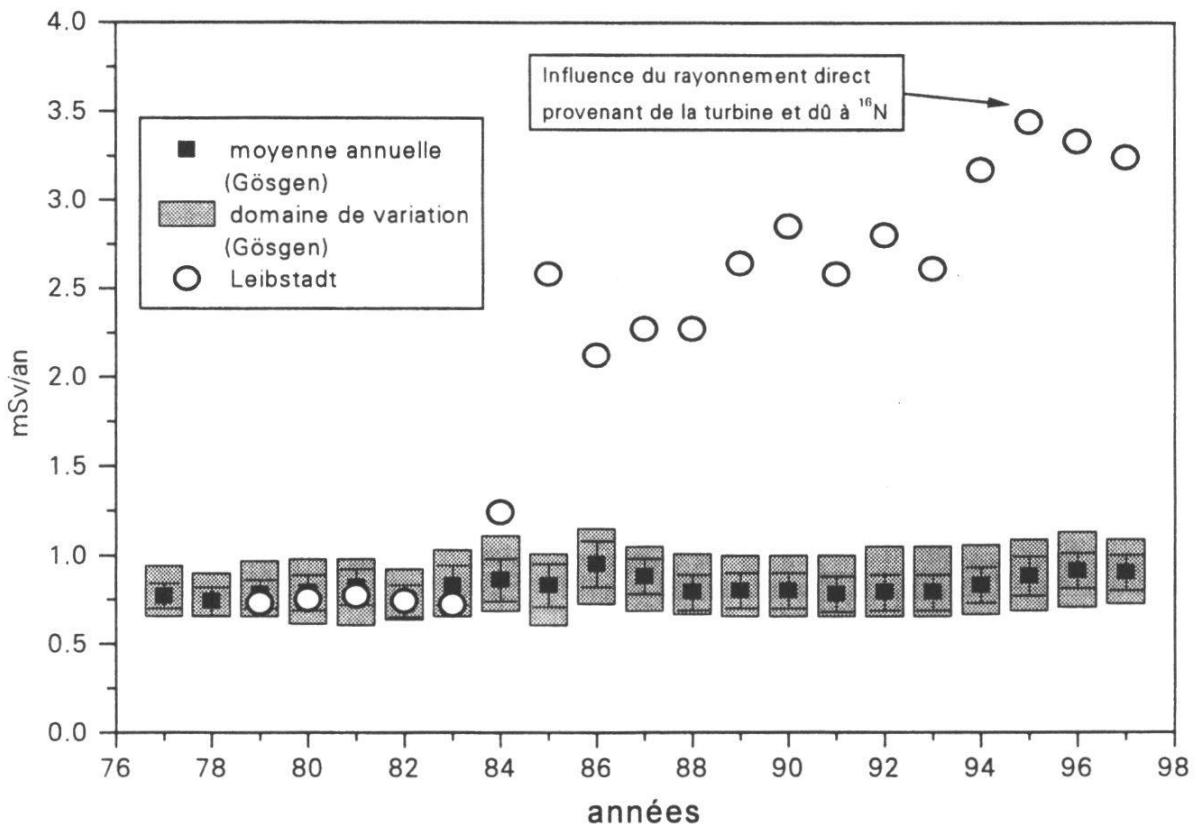


Fig. 7: Le rayonnement peut être direct.

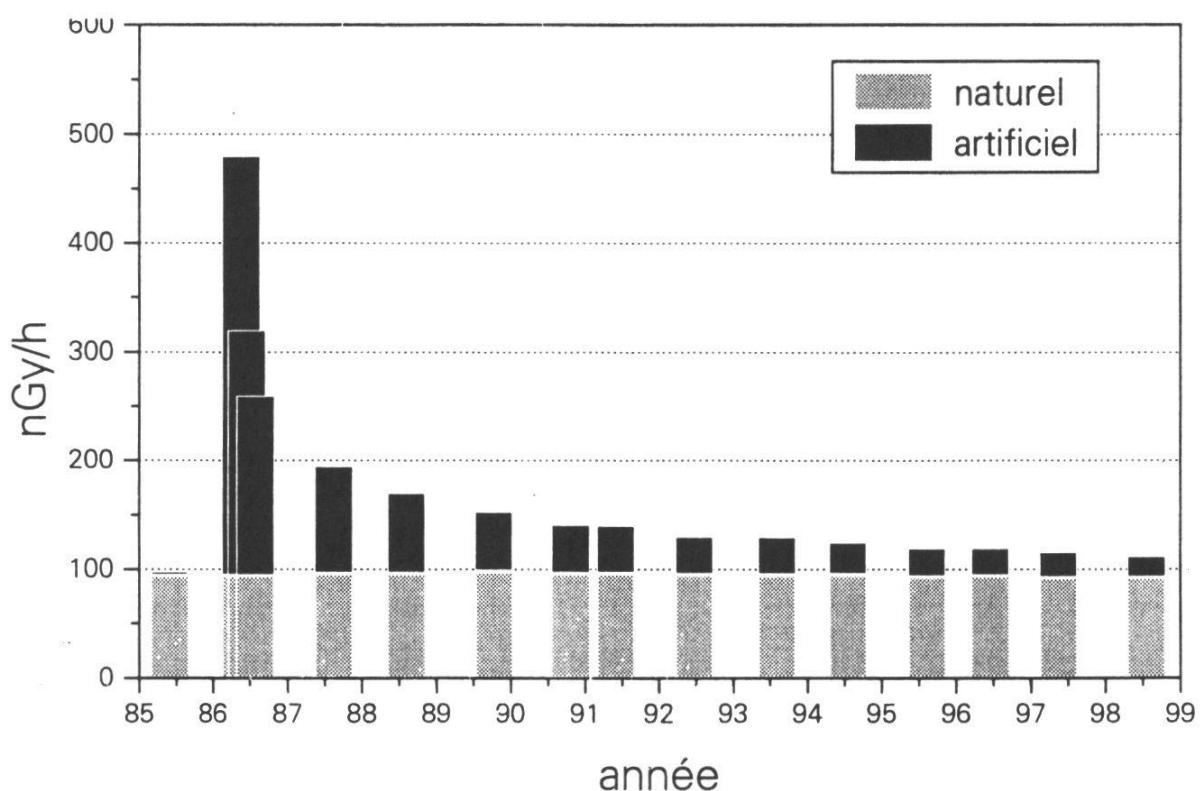


Fig. 8: La spectrométrie γ in situ pour distinguer l'exposition ambiante artificielle et naturelle à Caslano/TI.

2. L'air: mieux voir pour mieux prévoir.

La surveillance du milieu atmosphérique en Suisse (Fig. 9) vise 2 objectifs distincts:

la détection en tout temps d'une augmentation significative de la radioactivité de l'air par le réseau RADAIR. Grâce à la compensation de l'activité naturelle qui fluctue de quelques Bq/m^3 à environ $60 \text{ Bq}/\text{m}^3$, des contaminations de l'ordre de $0,5 \text{ Bq}/\text{m}^3$ peuvent être détectées en $1/2$ heure. Ces mesures en continu sont complétées par des prélèvements aériens militaires dans les masses d'air susceptibles de véhiculer une contamination.

la détection bas niveau des traces artificielles sur les filtres aérosols collectés hebdomadairement par 5 installations à haut débit (500 à $800 \text{ m}^3/\text{h}$). Ces dispositifs aux limites de détection très basses (~ 1 désintégration par m^3 d'air tous les 15 jours pour le ^{137}Cs) ont permis de distinguer en Suisse des concentrations ^{137}Cs dues au rejet accidentel de l'aciérie Acerinox à Algéciras dans le sud de l'Espagne le 30 mai 1998, environ 10 000 fois inférieures à celles enregistrées dans notre pays suite à l'accident de Tchernobyl.

Réseau RADAIR

Information rapide permanente en 11 stations α / β
+ 3 moniteurs iodé
+ 1 moniteur spectro γ
Débit: $\sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$
 α naturel: 1 - $60 \text{ Bq}/\text{m}^3$
 β artificiel: LD $\sim 1 \text{ Bq}/\text{m}^3$

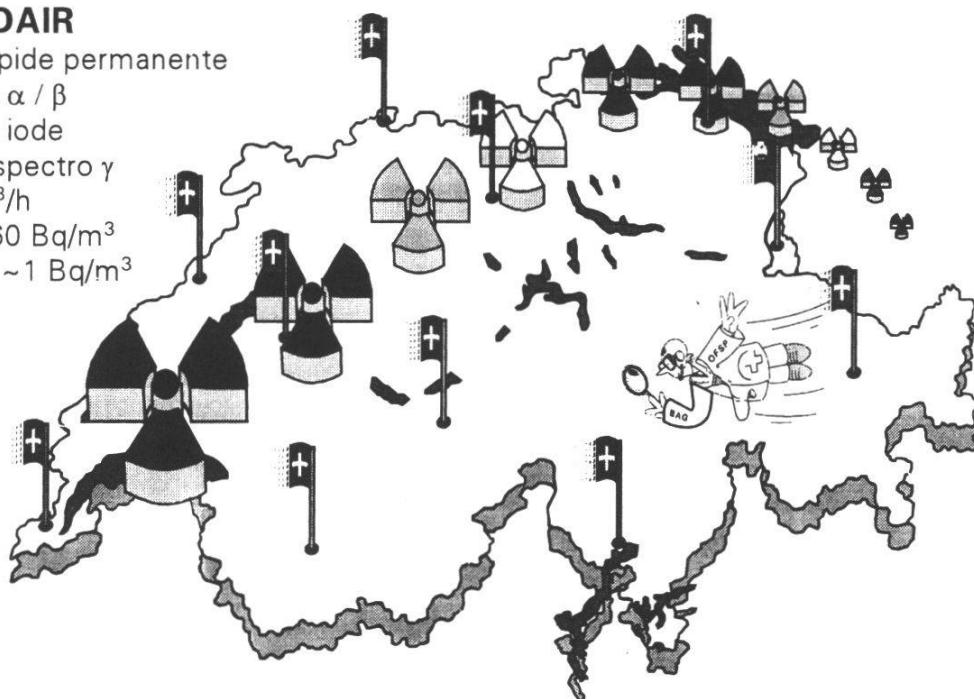
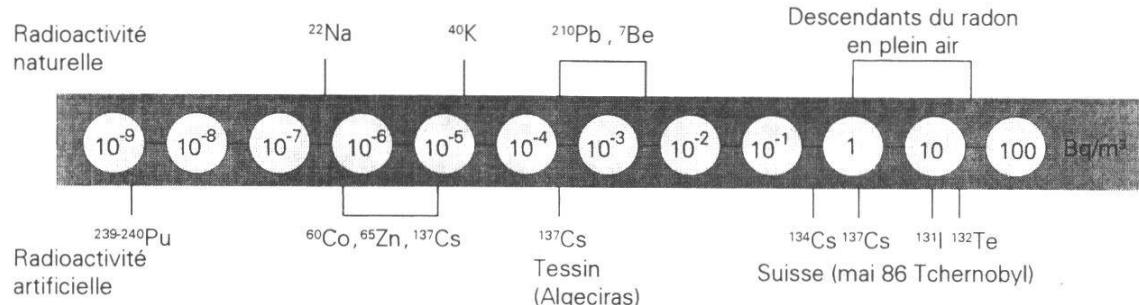
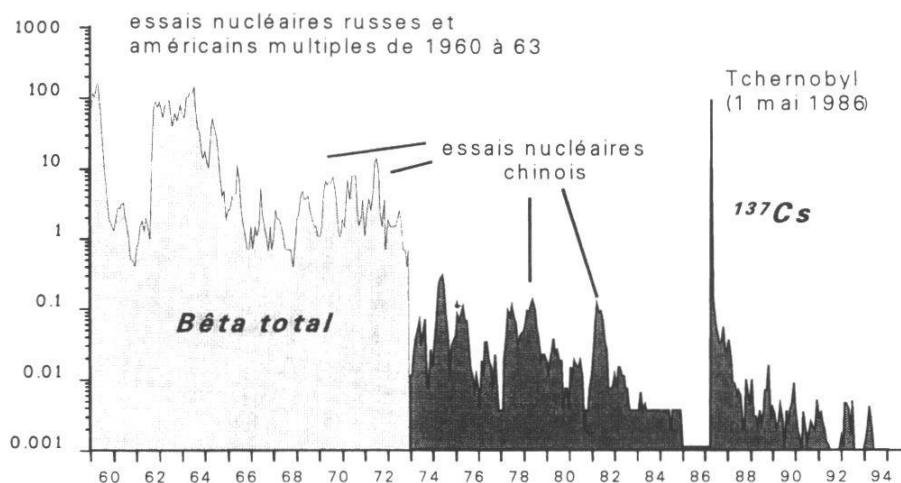


Fig. 9: Mieux voir pour mieux prévoir: le défi de la surveillance atmosphérique.

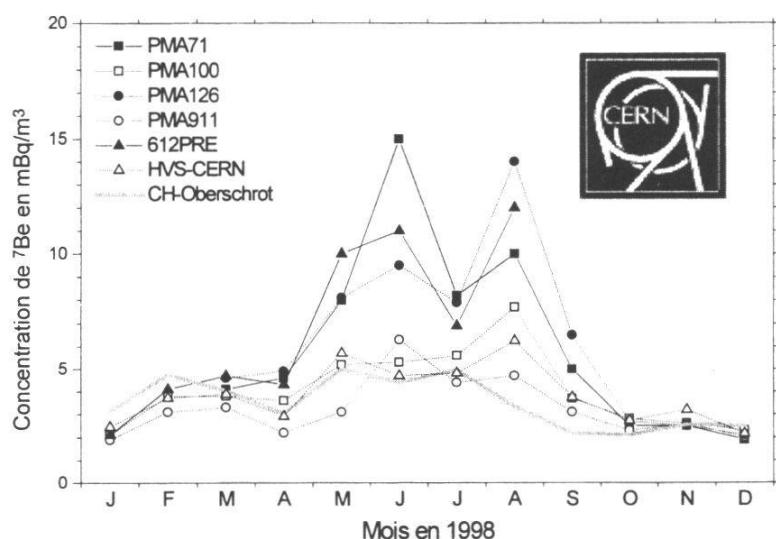
Le suivi des concentrations dans les aérosols en Suisse (Fig.10) traduit les progrès des techniques de mesurage. Des années 60 à aujourd'hui, la mesure a évolué de l'analyse «bêta total» à la spectrométrie de traces à l'aide de détecteurs Ge(HP) en passant par les détecteurs NaI(Tl). Ainsi les seuils de détection sont actuellement inférieurs au $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Outre la présence passagère des radionucléides artificiels dans le milieu atmosphérique, les mesures



L'échelle des valeurs en Bq/m^3 dans l'atmosphère (aérosols).



Des essais nucléaires à Tchernobyl: le témoignage des aérosols.



Activité de ^{7}Be dans les aérosols pour sept stations de mesure dont six au CERN durant l'année 1998. Station de mesure PMA71: Près de l'expérience neutrino. PMA100: Site de Meyrin. PMA126: Proche du PS. PMA911: Près d'une ferme de Meyrin. 612PRE : Station de mesure de l'OPRI à la douane de Meyrin, proche de l'expérience neutrino. HVS-CERN : échantilleur de l'OFSP à haut débit sur le site de Meyrin. CH-Oberschrot : échantilleur de l'OFSP à haut débit à Oberschrot/FR.

Fig. 10: Du Bq/m^3 au $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$: toujours plus sensible.

dans l'atmosphère (aérosols) indiquent la présence permanente des radionucléides naturels, dont les niveaux sont comparés à ceux d'origine artificielle sur une échelle de variations. Pour le ^{7}Be naturel produit par des interactions (spallations) des rayons cosmiques avec l'azote et l'oxygène de l'air, on constate en 3 stations limitrophes du CERN l'influence du fonctionnement des accélérateurs. Toutefois l'impact dosimétrique du ^{7}Be est négligeable en raison de sa très faible toxicité radiologique. Il en va de même pour le ^{37}Ar mesuré dans l'air troposphérique, dont les concentrations accrues de 0.7 à 4 mBq/m³ par rapport au niveau naturel de l'ordre de 0.5 mBq/m³ témoignent de l'exploitation des installations nucléaires européennes.

3. Les sédiments, les glaces et les sols: la mémoire de la terre

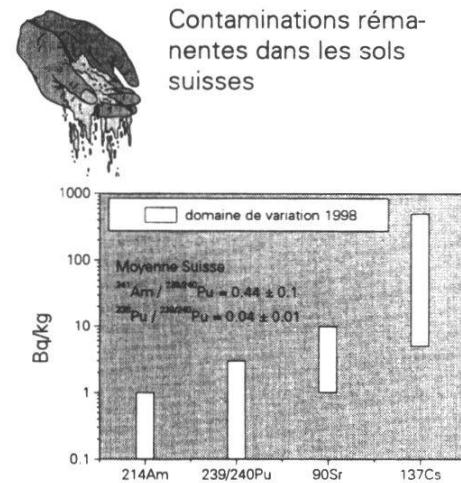
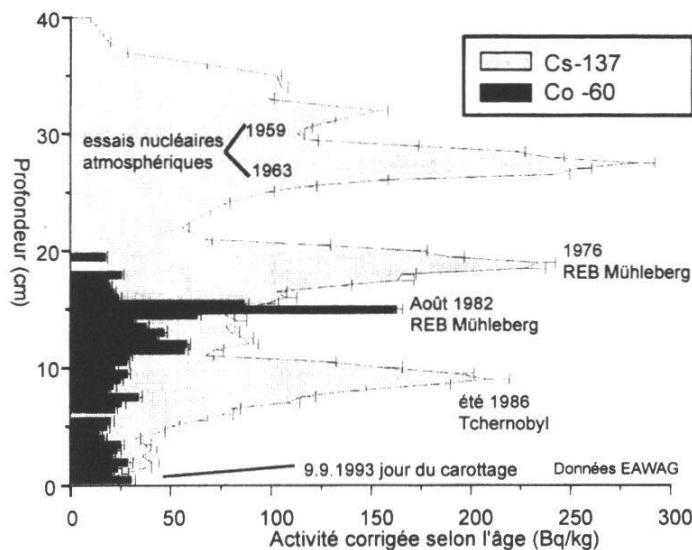
Les injections artificielles atmosphériques occasionnent des contaminations de l'environnement suite à leur déposition sèche et surtout humide. Afin de faire l'inventaire de ces contaminations et de vérifier le cas échéant l'accumulation de certains radionucléides de longue vie, il convient d'examiner des milieux susceptibles d'intégrer les polluants radioactifs. Dans cette perspective il s'avère approprié de consulter la mémoire des sédiments, des glaces et des sols (Fig. 11).

La prise en compte du transfert en profondeur des contaminations au fil du temps impose de procéder par carottages. La technique de datation des contaminations est particulièrement performante pour les sédiments. En utilisant les pics de 1963 et 1986 et les taux moyens de sédimentation, chaque profil peut être daté et les concentrations des radionucléides corrigées à la date du dépôt. Cette technique a permis l'archivage chronologique complet du ^{137}Cs sédimenté dans le delta de l'Aar sur les 40 dernières années. On distingue les injections des essais nucléaires (1959 et 1963), les rejets de la centrale nucléaire de Mühleberg (1976) confirmés par l'archivage du ^{60}Co et la retombée de Tchernobyl (1986). De même la mémoire des glaces montre clairement l'influence des essais nucléaires sur les teneurs de tritium dans les années 60.

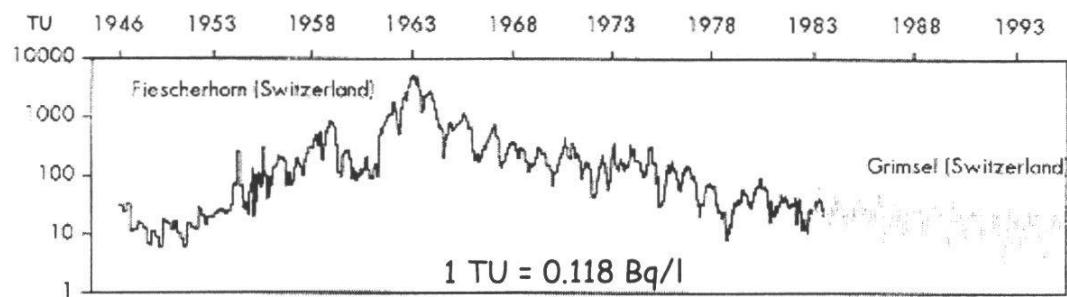
Concernant le sol, la technique de datation n'est pas très évidente. Le sol est toujours en mouvement. Le ruissellement de l'eau agit aussi bien verticalement que latéralement en surface comme en profondeur. A cette dynamique s'ajoute celle engendrée par les artisans du sol. En effet chaque mètre cube de sol contient des millions d'animaux, de champignons, des milliards de microbes qui transforment la matière puisqu'ils s'en nourrissent. La distinction des contaminations selon leur origine y devient donc toujours plus imprécise et l'incertitude de l'information dépend de la représentativité du prélèvement, de son traitement ainsi que de la structure mouvante des sols. L'exemple du suivi annuel à Davos rend compte de l'évolution des concen-

trations ^{137}Cs et ^{90}Sr issues des essais nucléaires dans la couche superficielle (0–5cm) de sol. On note d'un an sur l'autre des augmentations qui ne sont en réalité pas liées à des injections correspondantes. Le suivi indique aussi que le site en question n'a guère été marqué par la retombée de Tchernobyl.

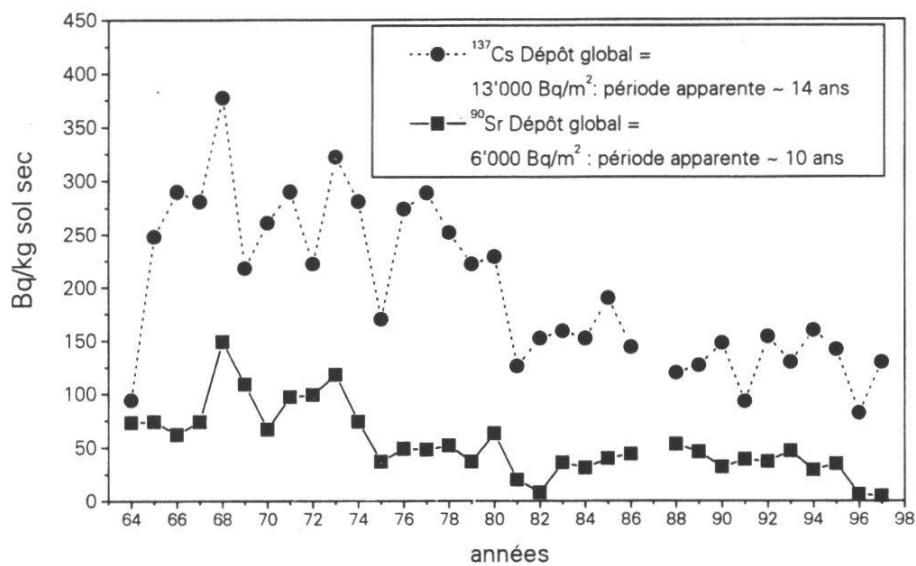
Afin de contourner les variations spatiales à courte échelle des sources présentes dans le sol, qui ne sont pas relevantes du point de vue de l'exposition externe, la spectrométrie gamma in situ (Fig.12) permet de caractériser la radioactivité moyenne d'un site sur une surface étendue. Cette méthode a fait ses preuves pour évaluer le degré de contamination suite à Tchernobyl et pour suivre son évolution dans le temps (Murith et Gurtner, 1995). La cartographie géostatistique confirme la corrélation spatiale entre les précipitations et les niveaux de contamination. Le suivi in situ à Caslano montre un recul plus prononcé du ^{137}Cs que ne le laissait prévoir sa période de 30 ans en raison de son transfert partiel dans le sol. Ce transfert se répercute aussi sur l'exposition externe (cf. Fig.8). Après la nette augmentation initiale, on constate la diminution rapide de la part artificielle due à la décroissance des radionucléides de courte période. Il convient de rappeler qu'en début mai 1986, le ^{137}Cs ne représentait qu'environ 5% du dépôt et de l'exposition ambiante globalement attribuable à Tchernobyl. Aujourd'hui il constitue l'essentiel du dépôt rémanent et sa contribution est comparable à celle attribuable avant l'accident à la part subsistante des essais nucléaires. Ces derniers contribuent majoritairement aux concentrations ^{90}Sr dans le sol, du fait des rapports $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ spécifiques des retombées: (>50% pour les essais nucléaires et <1% pour Tchernobyl). De même le rapport $^{239}\text{Pu}/^{90}\text{Sr}$ voisin de 0.02 lors des retombées des années 60 confirme que les faibles concentrations ^{239}Pu (0.2–2 Bq/kg de sol) proviennent avant tout des essais nucléaires. Le suivi de l'exposition externe montre par ailleurs la prédominance à long terme des composantes naturelles.



Archivage des contaminations dans une carotte sédimentaire du delta de l'Aar et dans les sols suisses.

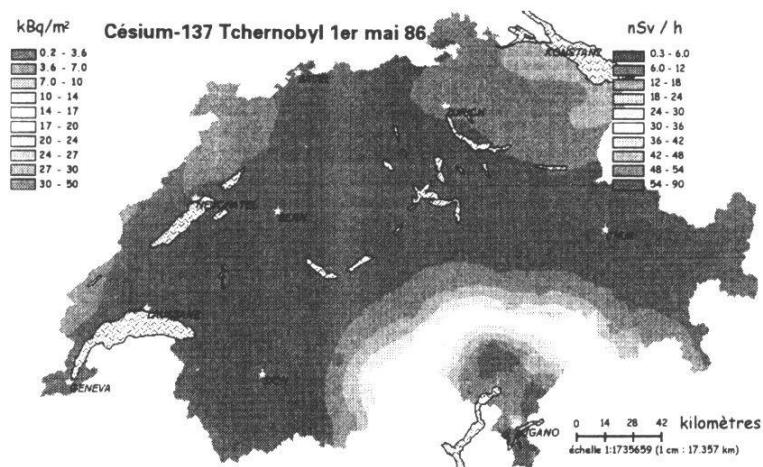
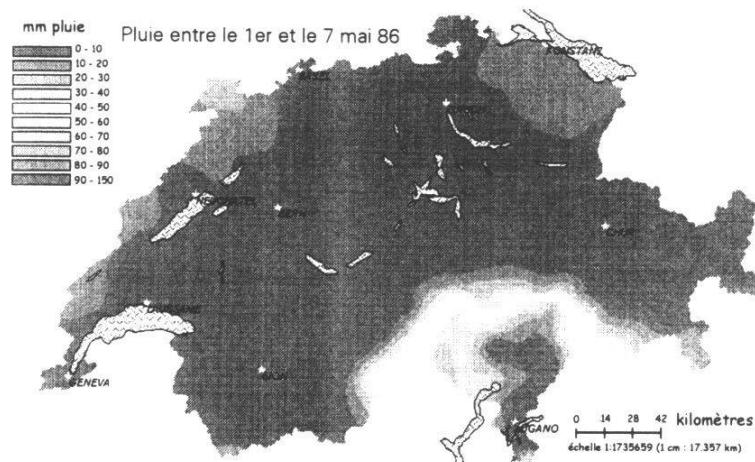


Suivi des teneurs en tritium dans la mémoire des glaces

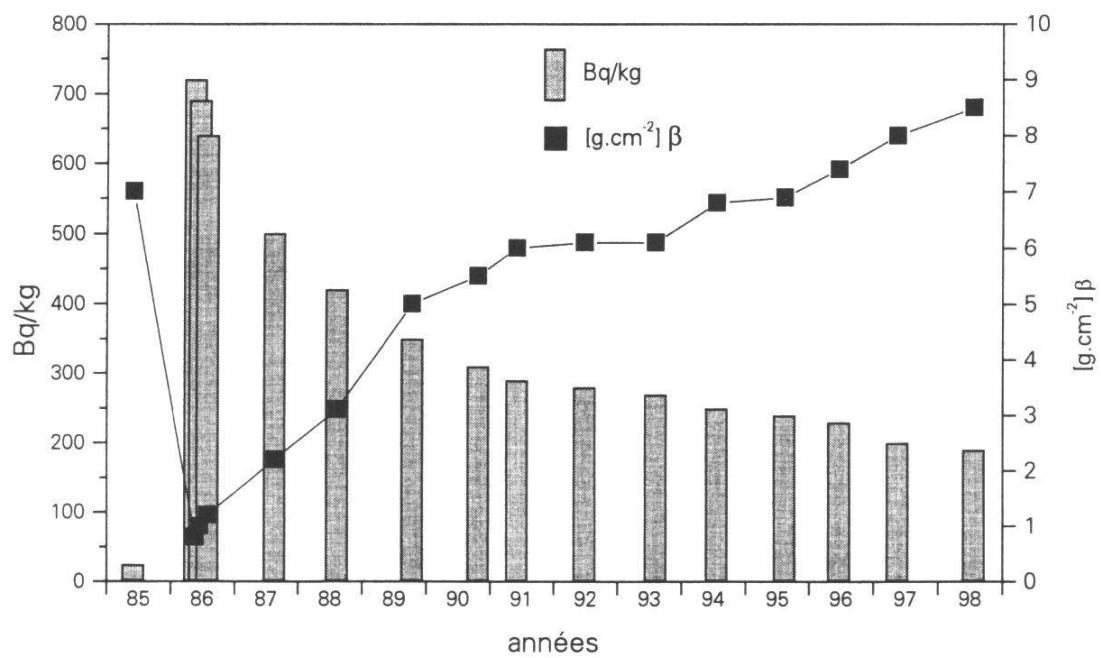


Suivi des contaminations ^{90}Sr et ^{137}Cs dans la couche 0-5 cm du sol à Davos

Fig. 11: Les sédiments, les glaces et les sols ont la mémoire longue.



Corrélation entre la cartographie des précipitations et des dépôts *in situ*



Evolution du ^{137}Cs converti en Bq/kg *in situ* et du paramètre de relaxation correspondant β (g cm^{-2})

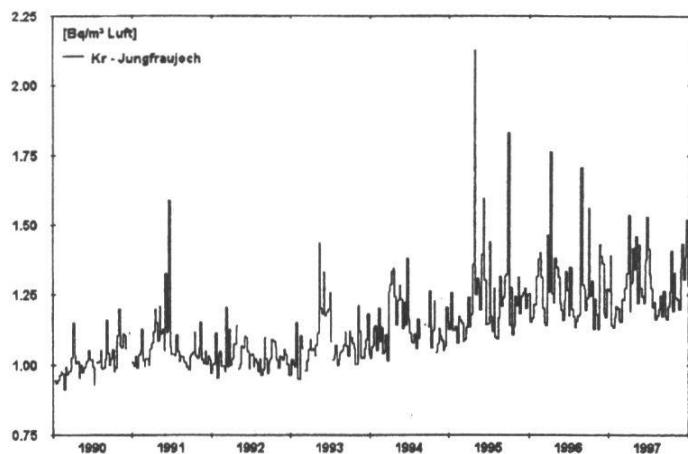
Fig. 12: La spectrométrie gamma *in situ*: les performances de la mesure en direct.

4. Des traceurs très spéciaux: ^{85}Kr dans l'air, ^{14}C dans les végétaux et ^3H dans le vin.

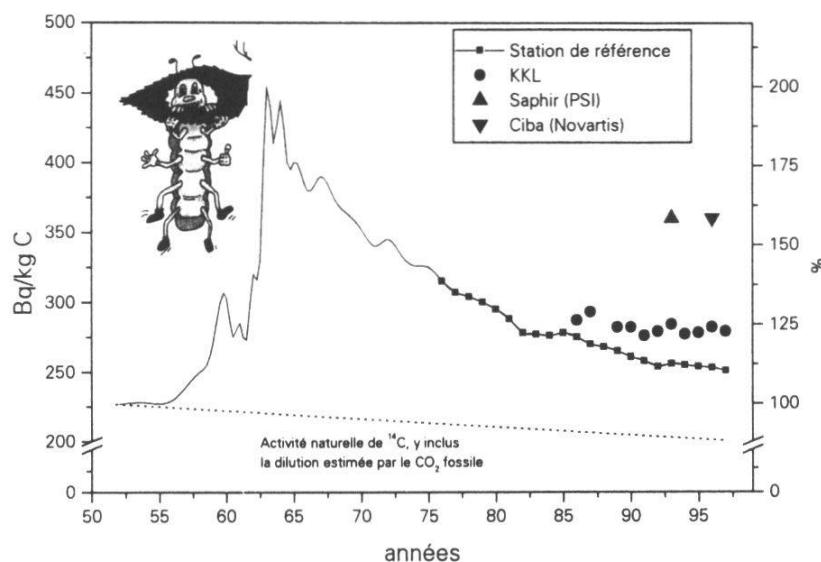
Certains radionucléides comme les ^{85}Kr , ^3H ou ^{14}C (Fig.13) s'avèrent d'excellents traceurs de la dispersion atmosphérique, hydrologique ou océanographique. Souvent difficile à mesurer, ils ont la particularité d'être impliqués dans des processus naturels, mais également d'être rejetés par des installations diverses.

Les séries de mesures ^{85}Kr dans l'air confirment une augmentation progressive de ce gaz rare dans l'atmosphère. Au ^{85}Kr d'origine naturelle, produit par l'action des rayons cosmiques sur les isotopes stables du krypton, s'ajoutent la contribution issue des essais nucléaires atmosphériques dans les années 60 et celle provenant des usines de retraitement de La Hague et Sellafield, qui constituent actuellement la source majeure. La concentration ^{85}Kr est ainsi passée d'environ 0.1 Bq/m^3 en 1959 à 1.2 Bq/m^3 aujourd'hui. Même si le ^{85}Kr est le radionucléide artificiel présentant les concentrations les plus élevées dans l'air, son impact radiologique est minime (dose efficace annuelle: $\sim 0.04 \mu\text{Sv}$ en Suisse). L'exposition principale au ^{85}Kr est celle par irradiation directe (exposition externe β à la peau et γ). L'exposition par ingestion ou inhalation est toujours inférieure à la composante externe car d'une part l'ingestion de ^{85}Kr est impossible, d'autre part contrairement au gaz rare radon le ^{85}Kr n'a pas de descendants solides susceptibles de se fixer dans le système pulmonaire.

La photosynthèse joue un rôle fondamental dans presque tout le monde végétal. C'est par photosynthèse que le dioxyde de carbone arrive dans la biosphère et ainsi dans la chaîne alimentaire terrestre. Le carbone est constitué de 2 isotopes stables ^{12}C et ^{13}C et d'un isotope radioactif ^{14}C . Ce radionucléide naturel est formé par une réaction de neutrons avec l'azote $n(^{14}\text{N}, ^{14}\text{C})p$ dans la stratosphère. Pour un gramme de carbone dans le circuit atmosphérique il en résulte 13,56 désintégrations radioactives par minute ($0,226 \text{ Bq/g C}$). Suite aux essais nucléaires une activité ^{14}C supplémentaire de $2,2 \cdot 10^{17}$ à $2,6 \cdot 10^{17} \text{ Bq}$ a été dégagée et l'activité spécifique du carbone dans l'atmosphère et dans la biosphère a presque doublé. Après l'arrêt des essais nucléaires en 1963, on peut enregistrer jusqu'à présent une diminution continue de l'activité spécifique ^{14}C en raison de sa dilution par le dioxyde de carbone provenant de la combustion de porteurs d'énergie fossiles et de sa liaison par les océans. Les installations nucléaires et les fours d'incinération de déchets chimiques contribuent également à des augmentations locales du ^{14}C . L'activité spécifique dans la chaîne alimentaire peut être dérivée de celle rejetée dans l'air. La confrontation des modèles avec les mesures dans les feuillages montre une bonne concordance. Le ^{14}C d'origine naturelle assimilé dans les aliments contribue à une exposition par ingestion quasi constante voisine de $13 \mu\text{Sv/an}$. La contribution subsistante des essais nucléaires esti-

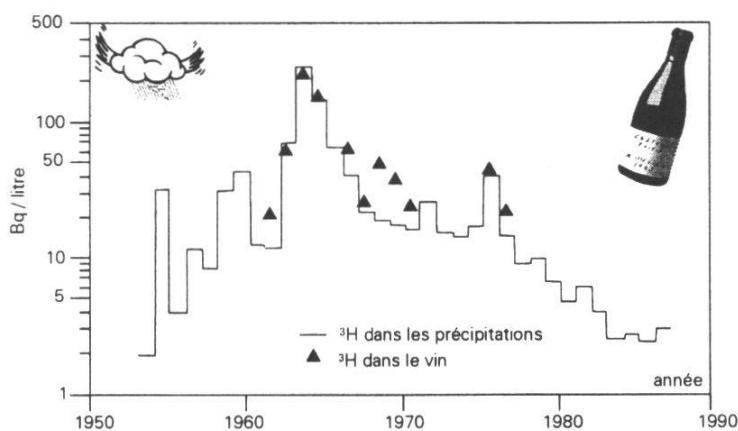


Le ^{85}Kr : un gaz rare de plus en plus fréquent



Le ^{14}C : la clé de la photosynthèse

Augmentation des concentrations tritium (^{3}H) suite aux essais nucléaires atmosphériques



Le ^{3}H : in vino veritas

Fig. 13: Sur les traces du ^{85}Kr , du ^{14}C et du ^{3}H .

mée actuellement à $2 \mu\text{Sv}/\text{an}$ est du même ordre de grandeur que celle induite localement en Suisse par les réacteurs à eau bouillante ou les incinérateurs de déchets chimiques (Bâle).

Le suivi du ${}^3\text{H}$ dans les précipitations indique actuellement quelques fractions de Bq/l issus de la production naturelle par les rayons cosmiques, quelques Bq/l provenant encore de la part des essais nucléaires des années 60 et localement jusqu'à plusieurs centaines de Bq/l à proximité d'entreprises suisses de peinture luminescente. Des contrôles dans l'urine ont montré que le personnel de ces entreprises est exposé à des doses collectives voisines de celles du personnel d'une centrale nucléaire. Comme il existe des alternatives sans radioactivité au ${}^3\text{H}$, son utilisation n'est plus justifiée dans l'industrie horlogère et sera abandonnée, même si les doses aux porteurs de montres ${}^3\text{H}$ sont négligeables. Le suivi ${}^3\text{H}$ montre que la mémoire du vin à l'image de celle des glaces rend aussi compte de l'évolution de ce radionucléide en cohérence avec les mesures dans les précipitations. Dans le Rhin, le Rhône, l'Aar et le Ticino, les valeurs ${}^3\text{H}$ sont comparables à celles dans les précipitations (quelques Bq/l). Par contre le Doubs (St. Ursanne) témoigne de l'influence de l'industrie horlogère avec des valeurs ${}^3\text{H}$ généralement 10 fois plus élevées.

5. La radioactivité au quotidien dans nos maisons et à la carte de nos menus.

Les radionucléides présents dans l'environnement sont susceptibles d'être transférés par inhalation ou par ingestion dans le corps humain pour y exposer sélectivement des organes. L'exposition qui en résulte dépend de nombreux paramètres, qui varient du nourrisson à l'adulte, tels le type d'aliments, les taux de consommation et de respiration ainsi que la toxicité radiologique des radionucléides impliqués.

L'exposition interne par *inhalation* est dominée par le radon, qui émane des roches du sous-sol, et atteint dans certaines maisons des taux préoccupants. Le radon même, en tant que gaz inerte à l'image du krypton, ne se fixe pas dans notre corps et n'y engendre pas de dégâts. En revanche les métaux de filiation du radon, bismuth, plomb et surtout les émetteurs alpha du polonium (${}^{218}\text{Po}$ et ${}^{214}\text{Po}$), inhalés avec l'air, les poussières ou la fumée, irradiient les voies bronchiques, où se trouvent les cellules les plus sensibles au développement d'un cancer du poumon. L'examen de 25'000 maisons suisses (Fig.14) indique une moyenne géométrique de $60 \text{ Bq } {}^{222}\text{Rn}/\text{m}^3$ d'air. En se basant sur des taux d'occupation de 7000 h/an et un facteur de dose de $2.44 \cdot 10^{-6} \text{ mSv}$ par Bqh/m^3 pour l'habitation, resp. $2'000 \text{ h}/\text{an}$ et $3.17 \cdot 10^{-6} \text{ mSv}$ par Bqh/m^3 pour le lieu de travail, on obtient une dose efficace annuelle due au radon de $1\text{mSv}/\text{an}$ (habitation) respectivement de $0.4 \text{ mSv}/\text{an}$ (travail). Ces valeurs sont encore augmentées d'environ 10% si l'on tient compte du thoron

également naturel. Cela mène en moyenne pour la population suisse à une dose efficace annuelle due au radon et au thoron de l'ordre de 1,6 mSv/an. Environ 90% des maisons examinées montrent des concentrations radon situées en-dessous de la valeur directrice de 400 Bq/m³ et 2% d'entre elles des concentrations supérieures à la limite de 1'000 Bq/m³. En Suisse cette valeur limite est vraisemblablement dépassée dans quelques milliers de maisons. Leur recherche est prioritaire pour la mise en œuvre de mesures d'assainissements appropriées afin d'en réduire l'exposition. La concentration en radon la plus élevée dans l'air du sol a été mesurée dans le canton des Grisons (1'000'000 Bq/m³). Pour les amis des cavernes, un jour dans une grotte à 5'000 Bq/m³ cause environ 0,4 mSv.

L'exposition interne par *ingestion* d'aliments et de boissons est particulièrement considérée à la suite d'une contamination. Parmi les denrées alimentaires de base, le lait et ses produits dérivés jouent un rôle important surtout en regard de l'exposition par ingestion des nourrissons et des enfants en bas âge. Le suivi des contaminants ⁹⁰Sr et ¹³⁷Cs dans le lait de Davos (Fig.15) confirme l'image du suivi correspondant dans le sol (cf. Fig.11), à savoir la prédominance de la contribution des essais nucléaires. Pour ce site d'altitude, les concentrations sont décalées vers le haut par rapport aux échantillons de plaine, qui indiquent des périodes apparentes voisines de 10 ans pour le ⁹⁰Sr aussi bien dans le sol, l'herbe et le lait. Cette plus grande disponibilité des contaminations dans les sites de montagne est similaire à celle observée aussi après Tchernobyl dans l'écosystème forestier, où les contaminations favorablement interceptées alimentent plus durablement le milieu. Cette rémanence prononcée se traduit surtout dans les champignons, les baies ou le gibier, dont les taux de consommation sont cependant plus faibles à fortiori chez l'enfant.

Les radionucléides naturels participent aussi à l'exposition interne. Ainsi le ²¹⁰Po présente des concentrations relativement élevées dans les produits de la mer. En admettant qu'un adulte consomme annuellement 13 kg de poissons, 1kg de mollusques et 1kg de crustacés, il ingère près de 50 Bq ²¹⁰Po/an. Compte tenu de l'importante toxicité radiologique du ²¹⁰Po (1,2 10⁻⁶ Sv/Bq ingéré), il en résulte une dose efficace de 60 µSv/an. En Suisse on estime la contribution naturelle à l'exposition interne par ingestion à environ 400 µSv/an sous l'hypothèse d'un comportement alimentaire habituel. La contribution majeure provient du potassium-40, tandis que les radionucléides cosmogéniques occasionnent ensemble des doses efficaces 10 fois moindre. Au niveau des séries ²³⁸U et ²³²Th, la consommation régulière d'eaux minérales de teneurs accrues peut aussi entraîner une exposition additionnelle de l'ordre de 100 jusqu'à 300 µSv/an (Métivier et Roy, 1997).

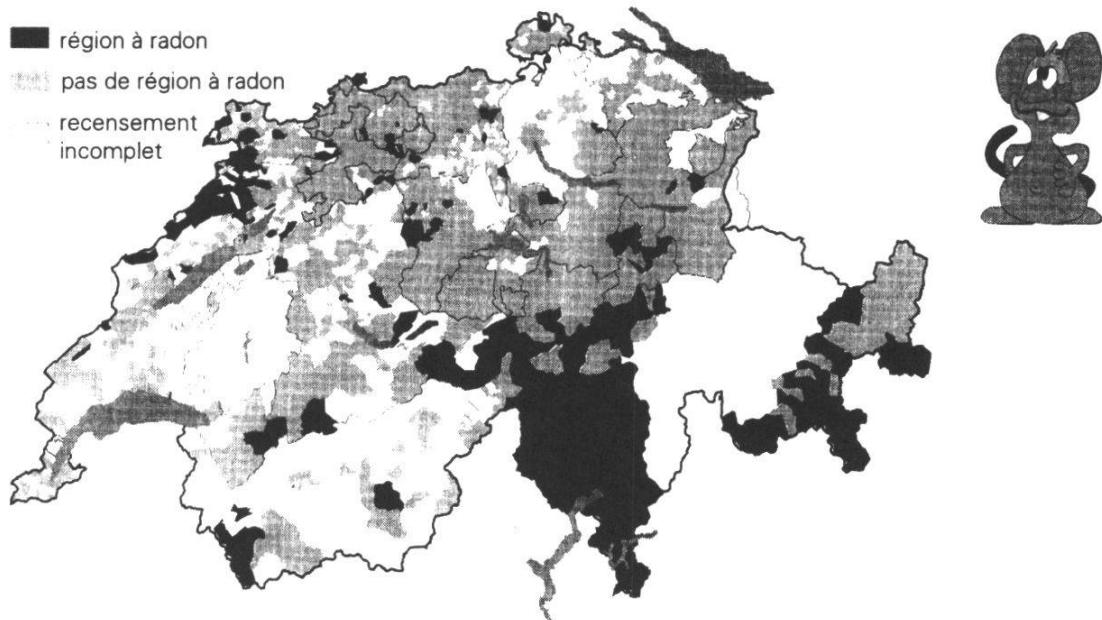


Fig. 14: Le radon: il fait un tabac dans nos baraqués.

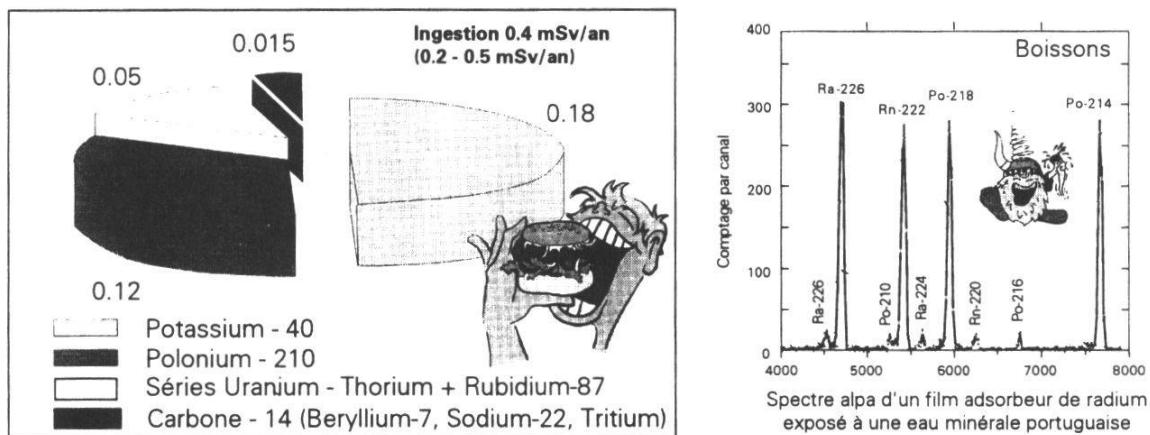
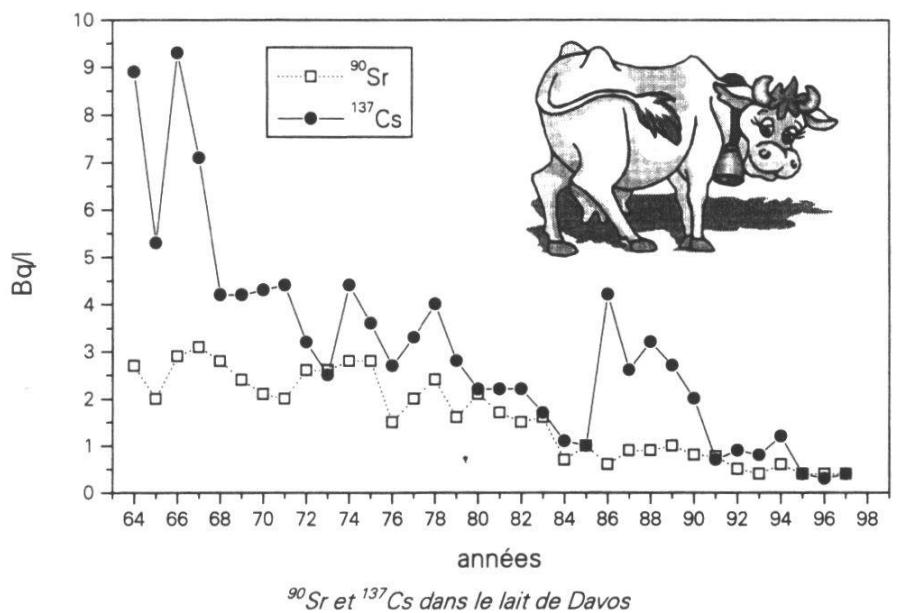


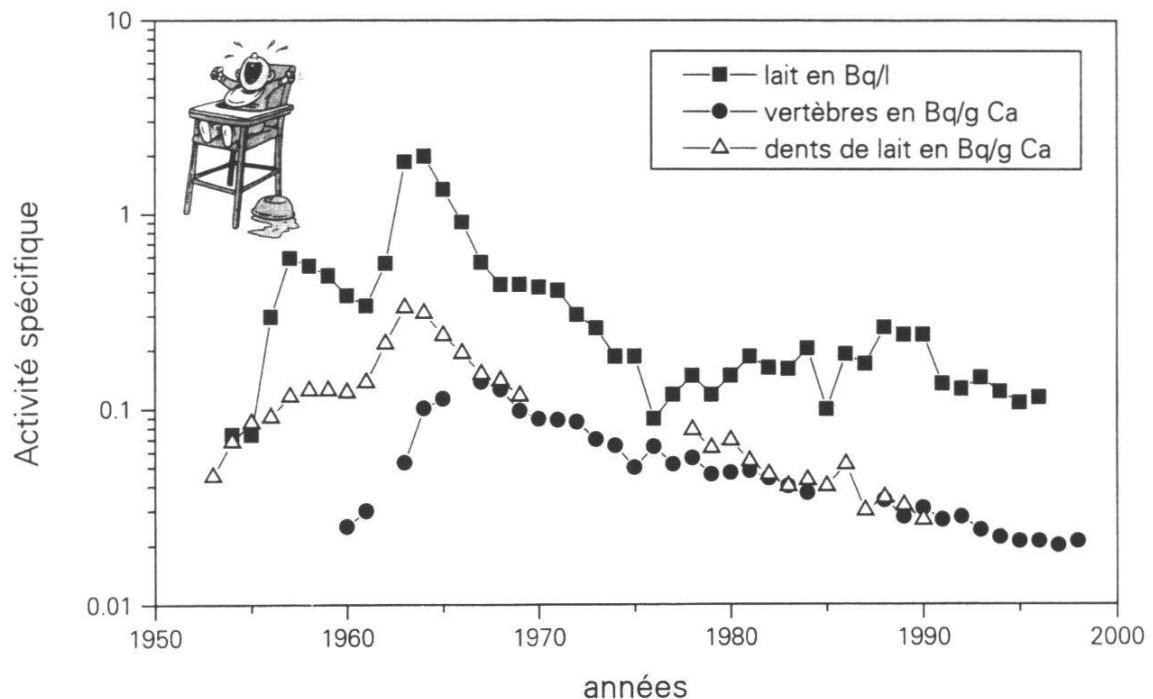
Fig. 15: Au menu: assiette froide, boisson chaude

6. La radioactivité dans la peau: le verdict du corps humain.

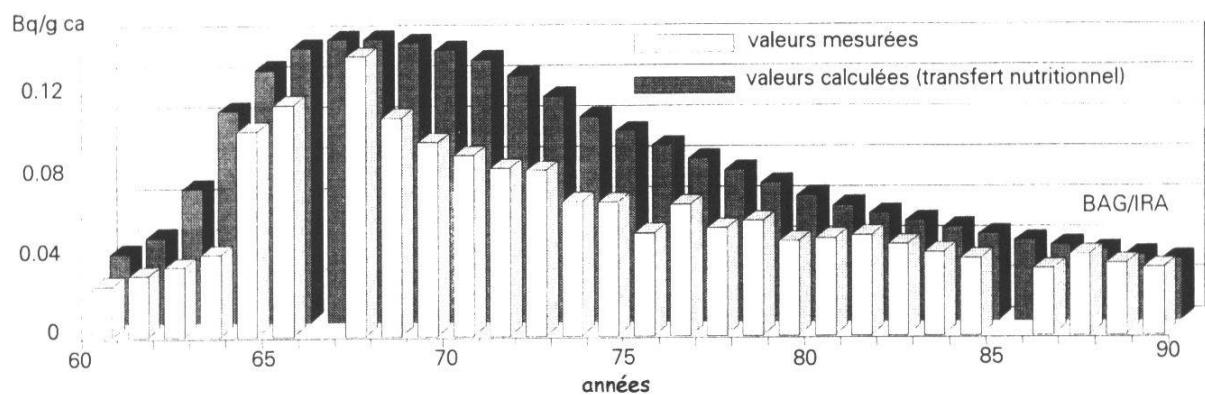
A partir des radionucléides mesurés dans l'environnement et dans les aliments et des paramètres liés à leur assimilation dans le corps humain, il est possible d'estimer l'impact de leur transfert sur l'exposition interne des personnes. Afin de vérifier la fiabilité des modèles de transfert, on peut également examiner directement le corps humain (Fig. 16). Cette démarche fait partie de la tradition en Suisse et constitue le juge de paix dans l'appréciation de l'impact des radionucléides et de leur transfert jusqu'à l'homme. Il s'agit en particulier des mesures thyroïdiennes pour l'iode, du corps entier pour le césium, des vertèbres et des dents de lait pour le strontium ou encore de l'urine pour le tritium.

Pour l'exposition par ingestion, le ^{90}Sr est spécialement examiné en raison de sa longue période (28 ans), de l'énergie bêta maximale élevée de son produit de filiation (^{90}Y) et de son métabolisme apparenté à celui du calcium, qui explique que le ^{90}Sr se fixe dans le squelette et les autres tissus calcifiés. Les concentrations en ^{90}Sr , rapportées au calcium, permettent un dosage plus précis et une meilleure représentativité des résultats. Leur suivi dans le lait, les dents de lait (rapporté à l'année de naissance de l'enfant) et les vertèbres humaines (rapporté à l'année de décès) montre surtout l'influence des essais nucléaires (Völkle et al., 1989). Le décalage dans les vertèbres s'explique par des raisons physiologiques. Les déterminations du ^{90}Sr dans le lait sont à la base de l'estimation de l'apport alimentaire en ^{90}Sr . Les résultats de la modélisation pour le compartiment en bout de chaîne, les vertèbres humaines, sont comparés aux moyennes mesurées. Les valeurs calculées sont proches des mesures si l'on considère qu'aucun ajustement n'a été effectué et que les valeurs des paramètres de transfert tirés de la littérature peuvent présenter une large dispersion.

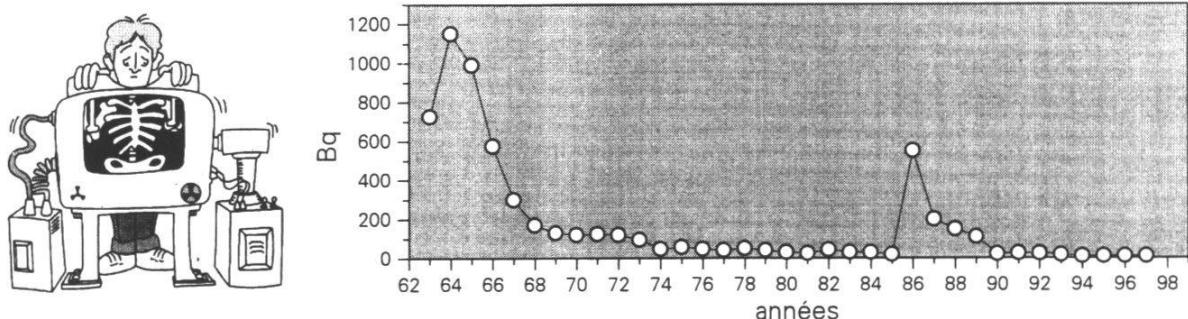
Autre radionucléide de long terme, le ^{137}Cs , dont le métabolisme s'apparente à celui du ^{40}K , a fait l'objet d'un suivi en Suisse par des mesures du corps entier depuis 1963. L'évolution du contenu moyen en ^{137}Cs dans le corps de collégiens du canton de Genève montre les apports respectifs issus des essais nucléaires et de Tchernobyl. Contrairement au ^{90}Sr avant tout représentatif des essais nucléaires, l'exposition par ingestion de ^{137}Cs a pu être plus importante selon les régions pour Tchernobyl que pour les essais nucléaires. Cela tient aussi au fait que la retombée de Tchernobyl était beaucoup plus hétérogène. Ainsi des valeurs extrêmes jusqu'à 15'000 Bq pour la somme ^{134}Cs et ^{137}Cs ont été mesurées en 1986 dans le corps des personnes les plus exposées en Suisse de par leur mode de vie. Ces mesures du corps entier (^{137}Cs) et celles de la thyroïde (^{131}I) confirment dans leur ensemble une sur-estimation d'un facteur 2 de la quantité corporelle de ces radionucléides calculée d'après l'activité et le taux d'ingestion des denrées alimentaires, par rapport à la mesure effective. L'impact radiologique global des essais



Le ^{90}Sr du lait aux vertèbres humaines en passant par les dents de lait



Confrontation modèle-mesures concernant le ^{90}Sr dans les vertèbres



Suivi du ^{137}Cs dans le corps de collégiens à l'hôpital cantonal de Genève

Fig. 16: Les secrets du corps humain.

nucléaires a représenté en moyenne pour la population suisse 1,2 mSv (domaine de variation: 0,5 à 5 mSv) et celui de Tchernobyl 0,5 mSv (domaine de variation: 0,2 à 5 mSv). La majeure partie de ces doses a été accumulée dans les premières années consécutives aux retombées de ces événements. Les mesures dans le corps entier, qui servent à vérifier le transfert de la radioactivité de l'environnement vers l'homme, indiquent également une activité naturelle permanente de 3'000 à 5'000 Bq de ^{40}K dans le corps, entraînant une exposition voisine de 0,2 mSv/an.

Des radionucléides naturels sont aussi présents dans des objets courants, tels les carrelages, la poterie et la verrerie (^{238}U , ^{232}Th), les manchons des lampes à incandescence et la céramique dentaire (^{232}Th), les paratonnerres (^{226}Ra), des batteries de téléphone mobile (^{138}La) ou écouteurs de Walkman (^{147}Sm) et le tabac (^{210}Po). Leur contribution globale peut être estimée à 0,1 mSv/an. L'OFSP a mis en œuvre des actions de ramassage en particulier concernant la gestion des anciens dispositifs contenant du ^{226}Ra , afin que ces derniers ne soient pas éliminés «sauvagement» dans les décharges. L'OFSP prend au sérieux toute découverte ou soupçon de sources ionisantes (incinération, ferraille, privé...) et aide à clarifier de telles situations en prenant en charge le conditionnement approprié.

7. Synthèse

L'exposition annuelle moyenne de la population suisse aux rayonnements ionisants est voisine de 4 mSv/an. La contribution d'origine naturelle domine avec environ 2,8 mSv/an, dont 2,0 mSv/an par exposition interne (radon dans les maisons ~1,6 mSv/an + alimentation ~0,4 mSv/an) et 0,8 mSv/an par exposition externe (exposition en plein air + matériaux de construction). Aux doses dues aux essais nucléaires et à Tchernobyl, s'ajoutent encore celles de la médecine, en moyenne pour la Suisse 1 mSv/an avec un domaine jusqu'à 100 mSv/an, ainsi que celles incombant au fonctionnement des installations nucléaires suisses (Fig.17), qui n'ont jamais dépassé 0,2 mSv/an (Murith et Gurtner, 1994). L'indication de valeurs moyennes ne doit cependant pas occulter qu'il est important d'orienter les actions de radioprotection vers la réduction des valeurs extrêmes (Fig.18) en regard des concepts de justification et d'optimisation. C'est la stratégie adoptée par l'OFSP en Suisse.

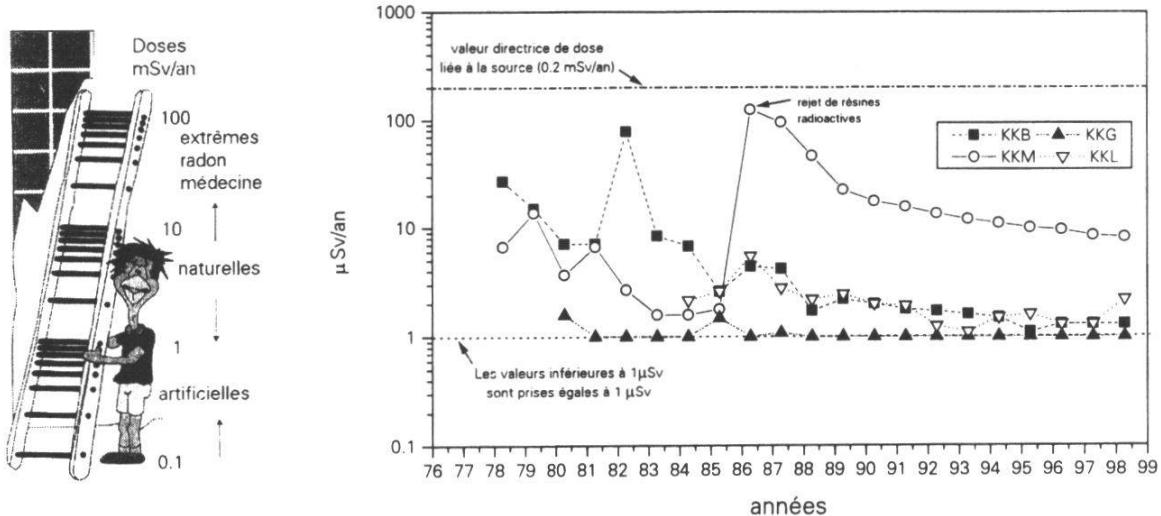


Fig. 17: Suivi de la dose accumulée par la personne fictive la plus exposée dans les voisinages respectifs des centrales nucléaires suisses, calculée à partir des rejets effectifs (HSK).

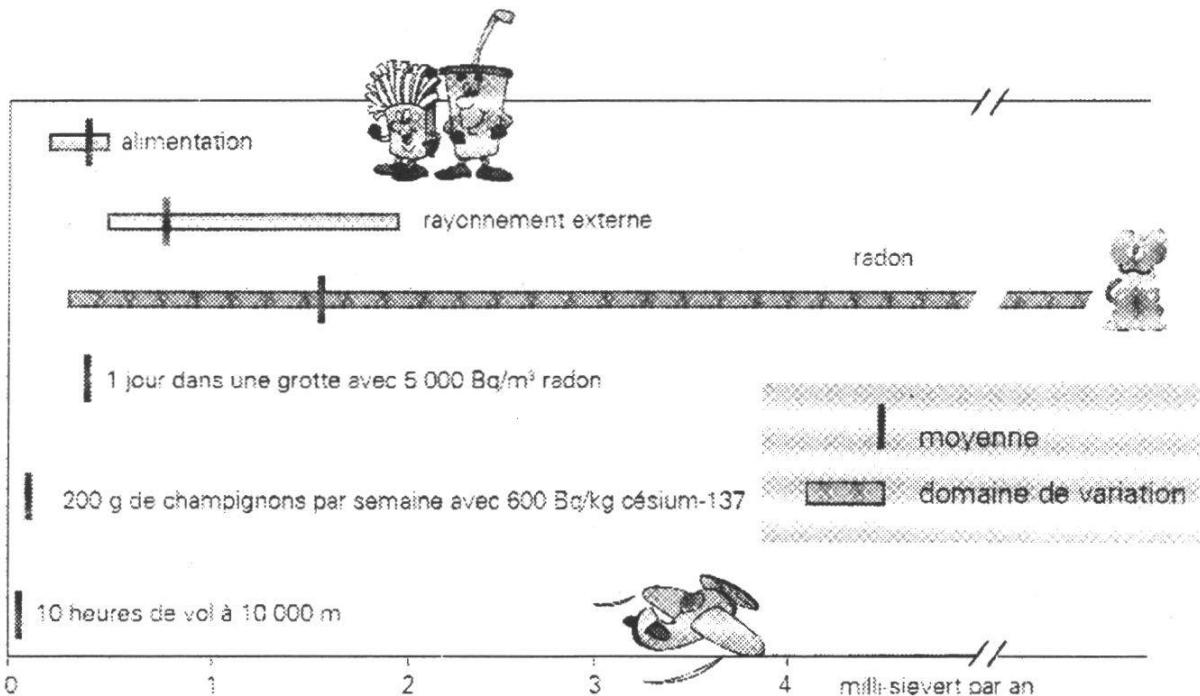


Fig. 18: Quelques expositions de la population en bref.

Les enjeux à venir: maîtres mots: environnement, santé publique et information.

Le suivi temporel sensible de la radioactivité incite les scientifiques à élaborer de nouvelles méthodes pour détecter les sources d'agression, dont les niveaux en situation normale s'avèrent très faibles dans l'environnement et souvent inférieurs aux seuils de détection en raison d'une meilleure maîtrise de la gestion des rejets du terme source. Devant cette tendance, un bel avenir se

profile pour l'utilisation des sentinelles biologiques de l'environnement, que sont les bio-indicateurs, afin de compléter l'information des suivis conventionnels dans l'air, l'eau et le sol. Il s'agit par exemple des mousses et des lichens très sensibles aux contaminants atmosphériques, des algues et d'espèces aquatiques (mollusques et crustacés) indicateurs des pollutions de l'eau ainsi que des champignons et des escargots récepteurs de la contamination du sol.

L'aspect scientifique de la surveillance ne doit cependant pas se faire au détriment de l'aspect santé publique, qui traite avec grande priorité les expositions radiologiquement significatives et oriente aussi son action vers la maîtrise de sources indésirables «héritées» ou «vagabondes». L'impact des stations d'incinération de déchets, des décharges et surtout des sites de stockage sur leur voisinage font partie des domaines de suivi dans le futur. La stratégie de privilégier le point de vue santé publique par rapport au côté purement scientifique favorise la communication et la relation avec le public ce qui renforce la confiance de ce dernier envers les autorités.

«*La chose la plus incompréhensible du monde, c'est que le monde est compréhensible*» (Einstein). Encore faut-il le rendre toujours compréhensible au public. La radioprotection aussi complexe soit elle n'échappe pas à cet enjeu permanent de l'information.

Références

- ALLEN O. (1998) Innovations méthodologiques et cartographie, Dipl. de géologie et minéralogie, Uni Lausanne.
- ICRU (1994), Gamma-Ray Spectrometry in the Environment, ICRU Report 53, Bethesda, U.S.A.
- MÉTIVIER H. et ROY M. (1997) Dose efficace liée à la consommation d'eau minérale naturelle par l'adulte et le nourrisson, Radioprotection, 32 (4), 491–499.
- MURITH C. (1987) La radioactivité de l'environnement: une méthode rapide d'estimation de l'exposition externe du public, Radioprotection, 22 (3), 231–239.
- MURITH C. et GURTNER A. (1994) Radioactivité, Environnement et Centrales nucléaires (1984–1994), ISBN 3-905235-15-3, OFSP.
- MURITH C. et GURTNER A. (1995) Le sol, un témoin de notre patrimoine radioactif. Séminaire concernant l'impact sur l'environnement des radioéléments de longue période, juin 29, 1995, Lucerne, 87–96, ISBN 2-88444-005-4.
- MURITH C. GURTNER A. (1996), In situ spectrometry to follow the behaviour of the Chernobyl radionuclides in the soil, Symposium. d. Österr. Bodenkundl. Ges., April 22–24, 1996, Vienna, 53, 19–26, ISSN 0029-893-X.
- OFSP (1995) CD-ROM «Gaston Radon», OCFIM, 3000 Berne, Production: FRY ROM multimédia.
- UNSCEAR (1993) Report to the general Assembly with Annexes. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (United Nations, New York).
- VÖLKLE H. MURITH C. et SURBECK H. (1989), Fallout from atmospheric bomb tests and releases from nuclear installations, Radiat. Physics and Chemistry, Special Issue, Radionuclides in the Environment, 34 (2), 261–277.

