

Zeitschrift:	Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz = Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse = Radioattività dell'ambiente e dosi d'irradiazione in Svizzera
Herausgeber:	Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz
Band:	- (2007)
Rubrik:	Überwachung der Kernanlagen : Emissionen und Immission = Surveillance des installations [i.e. installations] nucléaires : émissions et immissions

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: 16.02.2026

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

Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz

Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse

Ergebnisse 2007
Résultats 2007

Kapitel 8
Überwachung der Kernanlagen:
Emissionen und Immissionen

Chapitre 8
Surveillance des installations nucléaires:
Emissions et Immissions

Inhaltverzeichnis / Sommaire

Kapitel 8 Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen	91
Zusammenfassung	91
Kapitel 8.1 Emissionen aus den Kernanlagen	92
Kapitel 8.2 Ortsdosis und Ortsdosisleistungen in der Umgebung der Kernanlagen	100
Kapitel 8.3 Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK)	101
Zusammenfassung	101
Übersicht	101
Systeminstandhaltung und –ergänzung	101
Systemverfügbarkeit und Störungen	102
Qualitätssicherung	103
Messergebnisse	103
Chapitre 8.4. Les installations nucléaires et l'environnement	105
Résumé	105
Introduction	105
Mesures à la source	106
Mesures de l'exposition ambiante	106
Mesures dans le milieu atmosphérique	107
Mesures dans le milieu terrestre	109
Mesures dans le milieu aquatique	110
Situation radiologique du site démantelé de	111
l'ancienne centrale expérimentale de Lucens	111
Conclusions	112
Chapitre 8.5 Rejets et environnement du CERN (mesures CERN)	113
Synthèse	113
Objets de la surveillance	114
Contrôle des émissions	114
Contrôle des immissions	115
Conclusions	117
Chapitre 8.6 Environnement du CERN (mesures OFSP)	118
Résumé	118
Programme de surveillance de l'OFSP	118
Mesures de l'exposition ambiante	119
Mesures dans le milieu atmosphérique	119
Mesures dans le milieu terrestre	120
Mesures dans le milieu aquatique	120
Conclusions	121
Chapitre 8.7 "Point zéro du CERN"	122
Introduction	122
La mesure des concentrations et des niveaux d'irradiation	123
Interprétation des résultats	126
Information du public	127
Conclusions	128
Bibliographie	128
Annexes	128

Kapitel 8

Überwachung der Kernanlagen: Emissionen und Immissionen

F. Cartier, A. Leupin

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK, 5232 Villigen-HSK

Zusammenfassung

Die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser und der Abluft lagen im Jahr 2007 für die vier Schweizer Kernkraftwerke Beznau (KKB 1 und KKB 2), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie für das Paul Scherrer Institut (PSI) und das am gleichen Standort gelegene Zentrale Zwischenlager Würenlingen (ZZL) deutlich unterhalb der Jahres- und Kurzzeit-Abgabelimiten. Die aus den tatsächlichen Abgaben und der Direktstrahlung aus der jeweiligen Anlage errechnete Strahlenexposition liegt selbst unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren für Erwachsene und Kleinkinder weit unterhalb des für Standorte von Kernanlagen festgelegten quellenbezogenen Dosisrichtwerts von 0.3 mSv pro Jahr.

Die externe Strahlung wird mit dem Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK) ständig überwacht. In der Umgebung des KKB und des PSI sind 17, beim KKG 16 und beim KKL und KKM je 12 Messsonden in einem Abstand von bis zu ca. 5 km um die Anlagen in Betrieb. Die Messwerte dieser MADUK-Sonden werden alle 10 Minuten in die Zentrale der HSK übertragen und automatisch analysiert. Allfällige Abweichungen vom Schwankungsbereich der natürlichen Strahlung werden signalisiert und automatisch dem Pikettingenieur der HSK gemeldet. Die im Berichtsjahr registrierten, nicht meteorologisch bedingten Abweichungen oder Ausfälle liessen sich mit in der Nähe der MADUK-Sonden durchgeföhrten Kalibrierungsarbeiten an NADAM-Sonden, mit Defekten der Sondenelektronik oder mit Umbauten an MADUK-Sonden erklären. Für detaillierte Angaben sei auf das Kapitel 8.3 verwiesen.

Im Rahmen des permanenten Probenahme- und Messprogramms für Immission wurden die wichtigsten Expositionspfade radioaktiver Stoffe in der Umgebung der Kernanlagen überwacht.

Die im Boden gemessenen künstlichen Radionuklide (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs) können im Allgemeinen mit den Atomwaffentests oder mit dem Reaktorunfall in Tschernobyl in Verbindung

gebracht werden. Die langjährige Messreihe der Universität Bern von ¹⁴C in Baumblättern in der Umgebung der Kernkraftwerke wurde fortgesetzt.

Im aquatischen Milieu zeigten Wasser- und Sedimentproben Spuren von künstlichen Radionukliden, wie ⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co und ⁶⁵Zn, welche aus den Abgaben der Kernanlagen stammen. Die grössten Abgaben radioaktiver Stoffe (ausser Tritium) erfolgen während den Revisionsabstellungen. Für das insbesondere in Sedimentproben ebenfalls gemessene ¹³⁷Cs ist keine eindeutige Zuordnung in Anteile aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl und den Abgaben der Kernkraftwerke mehr möglich. Bei den andern Nukliden zeigen die Messungen generell den aufgrund der Abgaben erwarteten Verlauf, wobei gewisse Messwerte vermutlich durch einen relativ langsamen Partikeltransport in den Monaten nach dem Revisionsstillstand höher liegen.

In einer von dreizehn Grasproben aus der Umgebung des KKM konnten die Radionuklide ⁶⁰Co und ⁵⁴Mn, die dem Kernkraftwerk zuzuordnen sind, festgestellt werden (1.3 respektive 1.4 Bq/m²). Diese Grasprobe wurde am 22. August 2007 beim Zusammenfluss von Saane und Aare erhoben. Da dieser Ort während des grossen Hochwassers am 9. August 2007 überflutet war, ist anzunehmen, dass das Gras durch das Abwasser und aufgewühlte Sedimente verschmutzt wurde. Eine später an demselben Ort erhobene Grasprobe ergab Messwerte unterhalb der Nachweisgrenze. In der Umgebung von Mühleberg wurde im Berichtsjahr häufiger ⁶⁰Co gemessen als in den Vorjahren: im Niederschlag in den Monaten März und November (2 respektive 14 mBq/Liter) sowie in den Luftfiltern des Hochvolumensammlers in den Monaten Januar, März, April, Mai, Juli (0.5 bis 1.2 mikroBq/m³) sowie im September (6.4 mikroBq/m³). Dies ist darauf zurückzuföhren, dass der benutzte Detektor eine um den Faktor 3 besseren Nachweisgrenze aufweist. Diese Messwerte sind im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten gemäss Artikel 102 radiologisch unbedeutend. In Lebensmitteln konnte keine Erhöhung von künstlichen Radionukliden gemessen werden, die auf Abgaben der schweizerischen Kernanlagen schliessen lassen.

Kapitel 8.1

Emissionen aus den Kernanlagen

F. Cartier, A. Leupin

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK, 5232 Villigen-HSK

Die Abgaben von radioaktiven Stoffen mit der Abluft und dem Abwasser der schweizerischen Kernkraftwerke sind in den Figuren 1a bis 1c für die letzten fünf Jahre zusammen mit den entsprechenden Jahreslimiten dargestellt. Tabelle 1 zeigt die in den Kernkraftwerken und im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) gemessenen Abgabewerte sowie die unter ungünstigen Annahmen errechnete Personendosis für Erwachsene und Kleinkinder in der Umgebung der betreffenden Anlage im Jahr 2007. Die Abgaben des Paul Scherrer Instituts und die daraus in gleicher Weise berechneten Dosiswerte sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Eine nuklidspezifische Aufschlüsselung der Aktivitätsabgaben mit dem Abwasser ist in Tabelle 3a, mit der Abluft in den Tabellen 3b und 3c aufgelistet. Die Fussnoten zu den Tabellen geben Hinweise zu den Limiten, den Messungen und den bei der Berechnung der Jahresdosis verwendeten Annahmen.

Alle Kernanlagen haben die vorgeschriebenen Jahres- und die Kurzzeitlimiten eingehalten. Die Behörden haben die Messverfahren der Kernanlagen mit über 150 Proben kontrolliert. Dabei wurden Aerosol- und Jodfilter sowie Abwasserproben stichprobenweise analysiert. Die Ergebnisse stimmen überein und zeigen, dass die Abgaberegelmente eingehalten werden.

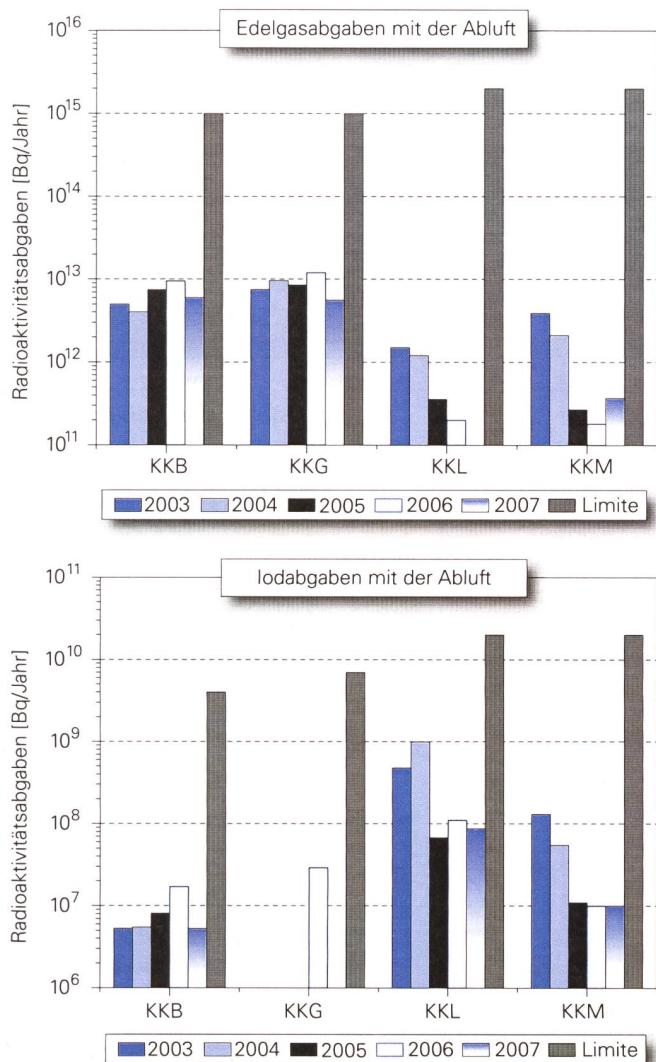
Die aus den Emissionen der Kernkraftwerke errechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe der Anlage beträgt unter Berücksichtigung der Ablagerungen aus den Vorjahren beim KKB ungefähr 0.002 mSv, beim KKG 0.001 mSv, beim KKL 0.005 mSv und beim KKM 0.005 mSv. Die Dosiswerte für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung betragen somit im Jahr 2007 nur einen Bruchteil des quellenbezogenen Dosisrichtwerts. Die errechneten Dosiswerte liegen wie in den Vorjahren alle unter 0.01 mSv.

Aufgrund eines internationalen Vergleichs stellte die HSK im Rahmen der Aufhebung der Befristung der Betriebsbewilligung für den Block 2 des KKB die Auflage, dass das KKB bis im Jahr 2007 seine Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser auf den Medianwert der europäischen Druckwasserreaktoren senken soll. KKB hat im Berichtsjahr die dafür installierte Nanofiltrationsanlage definitiv in Betrieb genommen und erstmals die Abgaben soweit reduziert, dass die Auflage erfüllt ist. Die HSK stellte beim KKM, im Rahmen der vom Bundesrat für das Jahr 2005 verlangten Periodischen Sicherheitsüberprüfung, eine entsprechende Auflage: KKM hat Massnahmen zu ergreifen, um die Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser ab Ende 2010, unter Wahrung der Verhältnismässigkeit, auf einen Zielwert von we-

niger als 1 GBq pro Jahr (ohne Tritium) zu reduzieren. Die HSK berücksichtigt bei den Dosisberechnungen die ^{14}C -Abgaben, da diese seit einigen Jahren aufgrund der geringen übrigen Abgaben die Dosis dominieren. Das radioaktive Kohlenstoffisotop ^{14}C entsteht im Reaktor durch Kernreaktionen von Neutronen mit Stickstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff. Die ^{14}C -Abgaben der Kernkraftwerke sind systembedingt begrenzt, weil die Abgaberate primär von der Reaktorleistung abhängig ist. Alle Schweizer Kernkraftwerke führten 2007 die ^{14}C - und die ^3H -Messungen in der Abluft fort. Daher wurden die Dosisbeiträge von ^{14}C wiederum aus den Messwerten ermittelt. Für die Interpretation der früheren Dosiswerte ist folgendes erneut zu erwähnen: Mitte 1998 wurde die Apparatur des KKL zur Messung von ^{14}C aufgrund der Resultate einer internationalen Vergleichsmessung neu kalibriert, was dazu führte, dass die für Einzelpersonen der Bevölkerung errechnete Dosis seit 1998 etwas höher ist. Beim KKG werden die für Einzelpersonen der Bevölkerung errechnete Dosis der Jahre 2001 bis 2003 im nachhinein als um den Faktor 3 zu hoch eingeschätzt, dies aufgrund der Ergebnisse der Kalibrierung der Messapparatur mit zwei unterschiedlichen Standards zu Beginn des Jahres 2004.

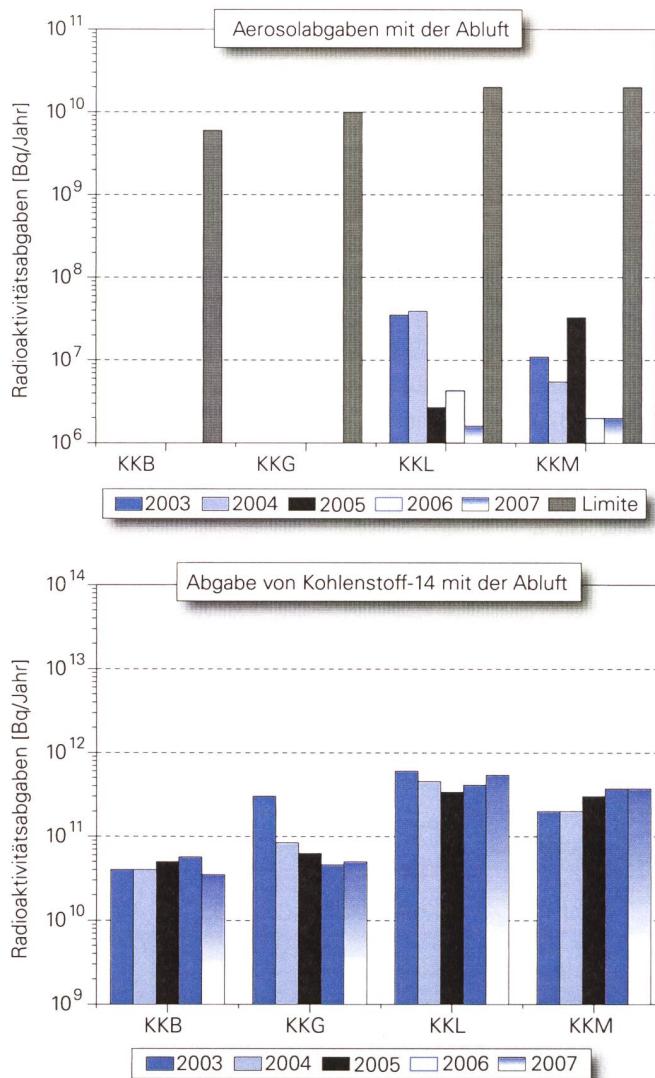
Das PSI ist aufgrund der Bewilligung für die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Direktstrahlung verpflichtet, sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für die Gesamtanlage des PSI die aus den Abgaben resultierende Dosis in der Umgebung zu berechnen. Beim PSI errechnet die HSK eine Jahresdosis für Einzelpersonen in der Umgebung von weniger als 0.008 mSv. Beinahe die gesamte Dosis ergibt sich im PSI durch die Abgabe von kurzlebigen radioaktiven Edelgasen aus den Teilchenbeschleunigern im West-Areal des Institutes. Die vom PSI und von der HSK unabhängig voneinander durchgeföhrten Berechnungen zeigen, dass selbst unter ungünstigen Annahmen die Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung in der Umgebung deutlich unterhalb des für das PSI bewilligten Anteils von 0.15 mSv pro Jahr am quellenbezogenen Dosisrichtwert für den gemeinsamen Standort des PSI und des ZZL liegt. Für das ZZL beträgt der Anteil 0.05 mSv pro Jahr.

Im Zentralen Zwischenlager Würenlingen (ZZL) erfolgten im Berichtsjahr weitere Einlagerungen in die Lagergebäude für hoch- und mittelaktive Abfälle und im Hochregallager der Konditionieranlage. In der Plasma-Anlage fand wiederum im Frühjahr und im Herbst eine Verbrennungskampagne statt. Die für das Jahr 2007 bilanzierten Abgaben des ZZL sind in den Tabellen 1 und 3a bis 3c zusammengestellt. Die aufgrund der Abgaben unter ungünstigen Annahmen berechnete Jahresdosis für Einzelpersonen der Umgebungsbevölkerung lag bei 0.001 mSv.



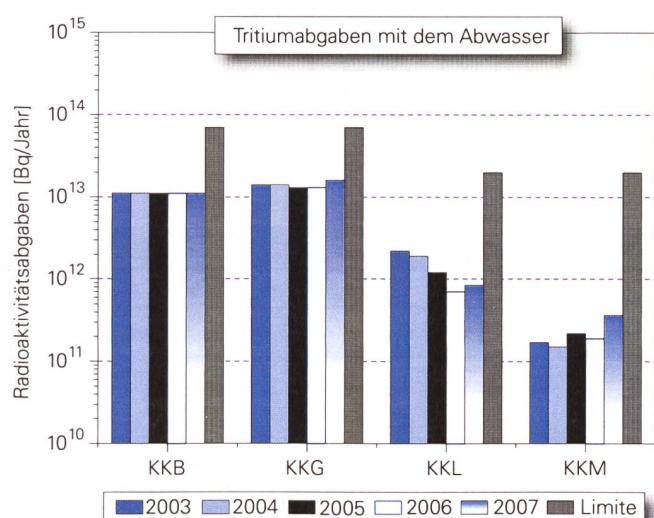
Figur 1a:

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre in den letzten fünf Jahren (2003 bis 2007) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Falls die Abgaben von Jod unterhalb von 1.0×10^6 Bq liegen, werden sie im Diagramm nicht dargestellt.



Figur 1b:

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an die Atmosphäre in den letzten fünf Jahren (2003 bis 2007) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Falls die Abgaben von Aerosolen unterhalb von 1.0×10^6 Bq liegen, werden sie im Diagramm nicht dargestellt. Für ^{14}C besteht keine Abgabelimite.



Figur 1c:

Abgaben der schweizerischen Kernkraftwerke an das Abwasser in den letzten fünf Jahren (2003 bis 2007) im Vergleich mit den Jahres-Abgabelimiten. Falls die Abgaben mit dem Abwasser unterhalb von 1.0×10^7 Bq liegen, werden sie im Diagramm nicht dargestellt.

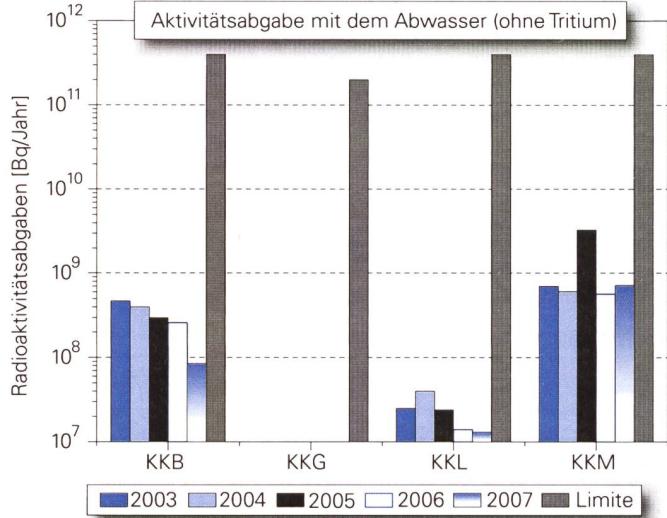


Tabelle 1:

Zusammenstellung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung im Jahr 2007 für die Kernkraftwerke (siehe Figur 1) und das Zentrale Zwischenlager Würenlingen und die daraus berechnete Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Ort	Medium	Art der Abgaben ⁴	Limiten ¹	Tatsächliche Abgaben ^{2,4}				Berechnete Jahresdosis ³		
				Äquivalentabgaben						
				Bq pro Jahr	Bq pro Jahr	Prozent der Limite	Bq pro Jahr	Erwachsene mSv/Jahr	Kleinkind mSv/Jahr	
KKB1 + KKB2	Abwasser 3'870 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4·10 ¹¹	-	<0.1%	6.9·10 ⁸	<0.001	<0.001	<0.001	
		Tritium	7·10 ¹³	1.1·10 ¹³	16%	1.1·10 ¹³	<0.001	<0.001	<0.001	
	Abluft	Edelgase	1·10 ¹⁵	6.0·10 ¹²	0.6%	5.5·10 ¹²	<0.001	<0.001	<0.001	
		Aerosole	6·10 ⁹	-	<0.1%	9.9·10 ⁴	<0.001	<0.001	<0.001	
		Iod: ¹³¹ I	4·10 ⁹	5.3·10 ⁶	0.1%	5.3·10 ⁶	<0.001	<0.001	<0.001	
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	3.5·10 ¹⁰	0.0010	0.0017		
	Dosis total						0.0012	0.0020		
KKM	Abwasser 7'354 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4·10 ¹¹	7.2·10 ⁸	0.2%	7.6·10 ⁹	<0.001	<0.001	<0.001	
		Tritium	2·10 ¹³	3.7·10 ¹¹	1.9%	3.7·10 ¹¹	<0.001	<0.001	<0.001	
	Abluft	Edelgase	2·10 ¹⁵	-	<0.1%	1.1·10 ¹¹	<0.001	<0.001	<0.001	
		Aerosole	2·10 ¹⁰	-	<0.1%	2.0·10 ⁶	0.0038	0.0033		
		Iod: ¹³¹ I	2·10 ¹⁰	-	<0.1%	1.0·10 ⁷	<0.001	<0.001		
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	3.7·10 ¹¹	0.0013	0.0022		
	Dosis total						0.0051	0.0054		
KKG	Abwasser 6'633 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2·10 ¹¹	-	<0.1%	2.2·10 ⁶	<0.001	<0.001	<0.001	
		Tritium	7·10 ¹³	1.6·10 ¹³	23%	1.6·10 ¹³	<0.001	<0.001	<0.001	
	Abluft	Edelgase	1·10 ¹⁵	<5.6·10 ¹²	<0.6%	<5.4·10 ¹²	<0.001	<0.001	<0.001	
		Aerosole	1·10 ¹⁰	-	<0.1%	5.0·10 ⁵	<0.001	<0.001	<0.001	
		Iod: ¹³¹ I	7·10 ⁹	-	<0.1%	-	<0.001	<0.001	<0.001	
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	5.0·10 ¹⁰	<0.001	<0.001	<0.001	
	Dosis total						<0.001	<0.001		
KKL	Abwasser 14'129 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	4·10 ¹¹	-	<0.1%	7.7·10 ⁷	<0.001	<0.001	<0.001	
		Tritium	2·10 ¹³	8.4·10 ¹¹	4.2%	8.4·10 ¹¹	<0.001	<0.001	<0.001	
	Abluft	Edelgase	2·10 ¹⁵	-	<0.1%	1.3·10 ¹¹	<0.001	<0.001	<0.001	
		Aerosole	2·10 ¹⁰	-	<0.1%	1.6·10 ⁶	<0.001	<0.001	<0.001	
		Iod: ¹³¹ I	2·10 ¹⁰	8.7·10 ⁷	0.4%	8.7·10 ⁷	<0.001	<0.001	<0.001	
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	5.4·10 ¹¹	0.0029	0.0049		
	Dosis total						0.0029	0.0050		
ZZL	Abwasser 450 m ³	Nuklidgemisch ohne Tritium	2·10 ¹¹	4.5·10 ⁸	0.2%	1.7·10 ⁹	<0.001	<0.001	<0.001	
		Tritium	-	-	-	1.3·10 ¹¹	<0.001	<0.001	<0.001	
	Abluft	β-/γ-Aerosole	1·10 ⁹	-	<0.1%	3.8·10 ⁵	<0.001	<0.001	<0.001	
		α-Aerosole	3·10 ⁷	-	<0.1%	9.8·10 ³	<0.001	<0.001	<0.001	
		Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	1·10 ¹²	1.5·10 ¹⁰	1.5%	1.5·10 ¹⁰	<0.001	0.001		
		Tritium	1·10 ¹⁴	3.1·10 ¹¹	0.3%	3.1·10 ¹¹	<0.001	<0.001	<0.001	
	Dosis total						<0.001	0.0011		

Tabelle 2:

Zusammenstellung der Abgaben des Paul Scherrer Instituts im Jahr 2007 und der daraus berechneten Dosen für Einzelpersonen der Bevölkerung (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

	Hochkamin	Saphir, Proteus	Forschungs- labor	PSI Ost Betriebs-Gebäude radioaktive Abfälle	Bundeszwischen- lager
Abgaben im Abwasser^{2,4} [Bq/a]					
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	-
Tritium	-	-	-	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]					
Edelgase und andere Gase	$1.2 \cdot 10^{11}$	-	-	-	-
β/γ -Aerosole ⁴ , ohne Iod	$1.5 \cdot 10^8$	-	-	-	$1.8 \cdot 10^4$
α -Aerosole	-	-	-	-	-
Iod	$2.7 \cdot 10^8$	-	-	-	-
Tritium in H ₂ O	$1.9 \cdot 10^{11}$	$4.3 \cdot 10^8$	-	$1.9 \cdot 10^{10}$	$2.8 \cdot 10^9$
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	-	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:					
Erwachsene	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Kleinkinder	0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert¹	0.1%	<0.1%	<0.1%	<0.1%	<0.1%

	Zentrale Fortluftanla- gen	PSI West			Gesamtanlage des PSI ^{2,4}		
		Injektor II	C-Labor		Abwasser 3016 m ³	Abluft	Aequivalent- abgaben
Abgaben im Abwasser^{2,4} [Bq/a]							
Nuklidgemisch ohne Tritium	-	-	-	-	$2.9 \cdot 10^8$	-	$7.1 \cdot 10^7$
Tritium	-	-	-	-	$4.3 \cdot 10^{12}$	-	-
Abgaben über die Abluft^{2,4} [Bq/a]							
Edelgase und andere Gase	$1.6 \cdot 10^{14}$	$7.1 \cdot 10^{10}$	-	-	-	$1.6 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^{14}$
β/γ -Aerosole ⁴ , ohne Iod	$4.0 \cdot 10^{10}$	$3.9 \cdot 10^6$	$6.6 \cdot 10^3$	-	-	$4.0 \cdot 10^{10}$	-
α -Aerosole	-	-	-	-	-	-	-
Iod	$8.4 \cdot 10^7$	-	-	-	-	$3.5 \cdot 10^8$	$2.8 \cdot 10^8$
Tritium in H ₂ O	$2.3 \cdot 10^{12}$	-	-	-	-	$2.5 \cdot 10^{12}$	-
Kohlenstoff: ¹⁴ C in CO ₂	-	-	-	-	-	-	-
Jahresdosis³ [mSv/Jahr] für:							
Erwachsene	0.0070	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.0075	
Kleinkinder	0.0071	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.00015	<0.0075	
Anteil am quellenbezogenen Dosisrichtwert¹	4.7 %	<0.1%	<0.1%	<0.1%	<0.1%	<5%	

Tabelle 3a:

Flüssige Abgaben der Kernanlagen an die Aare oder den Rhein, 2007:

Summe der bei Einzelmessungen nachgewiesenen Aktivitätsabgaben² - Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid	Abgaben [Bq im Jahr]						
	β/γ-Strahler	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
³ H		1.1·10 ¹³	1.6·10 ¹³	8.4·10 ¹¹	3.7·10 ¹¹	4.3·10 ¹²	1.3·10 ¹¹
⁷ Be						7.9·10 ⁶	
²² Na						8.4·10 ⁵	2.6·10 ⁷
²⁴ Na		9.5·10 ⁶			2.2·10 ⁶		
³⁵ S						1.3·10 ⁷	
⁵¹ Cr					7.3·10 ⁸		
⁵⁴ Mn		3.2·10 ⁶		3.4·10 ⁶	2.6·10 ⁹	2.4·10 ⁵	
⁵⁶ Mn							
⁵⁹ Fe		1.5·10 ⁵			4.8·10 ⁷		
⁵⁶ Co						3.9·10 ⁴	
⁵⁷ Co		4.3·10 ⁶				5.2·10 ⁵	
⁵⁸ Co		1.8·10 ⁸	1.0·10 ⁵	3.0·10 ⁶	8.6·10 ⁸	7.8·10 ⁵	
⁶⁰ Co		1.2·10 ⁸	9.3·10 ⁵	5.1·10 ⁷	3.1·10 ⁹	6.1·10 ⁵	2.6·10 ⁶
⁶⁵ Zn				6.0·10 ⁵	7.0·10 ⁷	1.1·10 ⁴	
⁸⁵ Sr							
⁸⁹ Sr		2.7·10 ⁷			1.6·10 ⁷		
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y		2.0·10 ⁶			8.0·10 ⁶	3.1·10 ⁷	
⁹⁵ Zr		2.7·10 ⁵					
⁹⁷ Zr							
⁹⁵ Nb		3.6·10 ⁵	1.7·10 ⁵		1.9·10 ⁶		
⁹⁹ Mo							
^{99m} Tc		1.8·10 ⁶					
¹⁰³ Ru		3.3·10 ⁴					
¹⁰⁶ Ru/Rh						1.3·10 ⁵	
¹¹⁰ mAg		1.2·10 ⁶			4.7·10 ⁵	6.4·10 ³	
¹²² Sb		8.2·10 ⁶					
¹²⁴ Sb		1.1·10 ⁸			8.0·10 ⁶	1.7·10 ³	
¹²⁸ Sb		3.0·10 ⁷		1.2·10 ⁷		3.1·10 ⁴	2.6·10 ⁵
^{123m} Te		5.2·10 ⁶	1.0·10 ⁶				
¹³² Te		1.9·10 ⁶					
¹²⁵ I						1.1·10 ⁶	
¹²⁶ I							
¹³¹ I		1.6·10 ⁷		4.2·10 ⁶		3.7·10 ⁵	
¹³³ I		4.3·10 ⁶					
¹³⁴ Cs		8.5·10 ⁶				6.9·10 ⁶	5.2·10 ⁷
¹³⁶ Cs							
¹³⁷ Cs		1.5·10 ⁸		1.4·10 ⁶	6.2·10 ⁷	2.0·10 ⁸	1.7·10 ⁹
¹³³ Ba							
¹⁴⁰ Ba							
¹⁴⁰ La							
¹⁴¹ Ce							
¹⁴⁴ Ce							
¹⁵² Eu							
¹⁵⁴ Eu							
¹⁷² Lu						1.4·10 ⁴	
¹⁸⁵ Os						3.6·10 ⁴	
²³⁹ Np							
α-Strahler					1.1·10⁵		
^{234/238} U						1.1·10 ⁴	
^{239/240} Pu		1.0·10 ⁴				1.1·10 ⁵	
²³⁸ Pu/ ²⁴¹ Am		1.2·10 ⁴				6.6·10 ⁴	
²⁴² Cm		2.1·10 ³					
^{243/244} Cm		1.2·10 ³				9.7·10 ³	

Tabelle 3b:Abgaben der Kernanlagen mit **der Abluft, Gase, Edelgase und Iod 2007**:

Summe der bei Einzelmessungen nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid β/γ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
Gase, Edelgase						
Tritium	$2.8 \cdot 10^{11}$	$7.1 \cdot 10^{11}$	$5.2 \cdot 10^{11}$	$2.1 \cdot 10^{10}$	$2.5 \cdot 10^{12}$	$3.1 \cdot 10^{11}$
^{11}C					$2.4 \cdot 10^{13}$	
$^{14}\text{C} (\text{CO}_2)$					$2.5 \cdot 10^{13}$	
^{13}N					$1.0 \cdot 10^{14}$	
^{15}O					$7.9 \cdot 10^{11}$	
^{18}F					$8.8 \cdot 10^{11}$	
^{24}Ne					$5.9 \cdot 10^{12}$	
^{41}Ar						
^{79}Kr					$1.2 \cdot 10^{11}$	
^{88}Kr				$5.3 \cdot 10^{10}$		
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$2.3 \cdot 10^{11}$			$2.7 \cdot 10^{10}$		$1.7 \cdot 10^8$
^{87}Kr						
^{88}Kr						
^{122}Xe						
^{125}Xe						
^{127}Xe						$2.7 \cdot 10^{11}$
$^{129\text{m}}\text{Xe}$						
$^{131\text{m}}\text{Xe}$						
^{133}Xe	$2.2 \cdot 10^{12}$		$2.1 \cdot 10^{10}$			
$^{133\text{m}}\text{Xe}$						
^{135}Xe	$2.7 \cdot 10^{12}$		$8.9 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^9$		
$^{135\text{m}}\text{Xe}$			$2.0 \cdot 10^{10}$			
^{137}Xe						
^{138}Xe						
EG-Aequiv. ⁴⁾				$8.6 \cdot 10^{10}$		
EG: β -total		$5.4 \cdot 10^{12}$				
Andere	$3.9 \cdot 10^{11}$					
Iod						
^{123}I					$6.1 \cdot 10^7$	
^{124}I					$1.7 \cdot 10^6$	
^{125}I					$3.0 \cdot 10^7$	
^{126}I					$1.2 \cdot 10^6$	
^{131}I	$5.3 \cdot 10^6$		$8.7 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$2.6 \cdot 10^8$	
^{133}I	$3.0 \cdot 10^7$					

Tabelle 3c:Abgaben der Kernanlagen **mit der Abluft, Aerosole 2007:**

Summe der bei Einzelmessungen nachgewiesenen Aktivitätsabgaben (Fussnoten siehe Ende Kap 8.1).

Nuklid β/γ -Strahler	Abgaben [Bq im Jahr]					
	KKB	KKG	KKL	KKM	PSI	ZZL
^{7}Be					$8.8 \cdot 10^4$	
^{22}Na					$1.5 \cdot 10^4$	
^{24}Na					$2.3 \cdot 10^5$	
^{38}S					$2.6 \cdot 10^9$	
^{38}Cl					$7.9 \cdot 10^7$	
^{39}Cl					$3.4 \cdot 10^{10}$	
^{51}Cr				$1.5 \cdot 10^5$		
^{54}Mn				$1.5 \cdot 10^5$		
^{58}Co		$1.5 \cdot 10^5$		$1.2 \cdot 10^5$		
^{60}Co		$2.6 \cdot 10^5$	$3.9 \cdot 10^4$	$8.7 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^6$	$4.4 \cdot 10^2$
^{65}Zn				$2.4 \cdot 10^5$		
^{72}As					$3.0 \cdot 10^7$	
^{75}Se					$4.7 \cdot 10^6$	
^{76}Br					$6.5 \cdot 10^5$	
^{77}Br					$1.4 \cdot 10^8$	
^{82}Br					$9.3 \cdot 10^8$	
^{90}Sr				$1.1 \cdot 10^5$		
^{99m}Tc					$7.5 \cdot 10^7$	
^{110m}Ag		$7.4 \cdot 10^4$				
^{131}I			$9.7 \cdot 10^5$			
^{134}Cs						$2.7 \cdot 10^2$
^{137}Cs		$4.8 \cdot 10^3$		$1.6 \cdot 10^5$		$1.0 \cdot 10^4$
^{140}Ba			$6.0 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^5$		
^{140}La			$1.0 \cdot 10^6$			
^{173}Lu					$5.1 \cdot 10^5$	
^{177m}Lu					$5.4 \cdot 10^4$	
^{175}Hf					$1.8 \cdot 10^6$	
^{181}Re					$1.4 \cdot 10^8$	
^{182}Re					$3.6 \cdot 10^8$	
^{182m}Re					$4.8 \cdot 10^5$	
^{182}Os					$9.5 \cdot 10^6$	
^{183m}Os					$6.8 \cdot 10^5$	
^{185}Os					$2.3 \cdot 10^7$	
^{191}Os					$2.5 \cdot 10^8$	
^{185}W					$4.2 \cdot 10^8$	
^{191}Pt					$3.3 \cdot 10^6$	
^{192}Au					$2.7 \cdot 10^9$	
^{193}Au					$2.6 \cdot 10^8$	
^{194}Au					$7.8 \cdot 10^7$	
^{195}Au					$2.1 \cdot 10^6$	
^{192}Hg					$2.5 \cdot 10^8$	
^{193m}Hg					$3.4 \cdot 10^8$	
^{195}Hg					$3.4 \cdot 10^{10}$	
^{195m}Hg					$1.5 \cdot 10^8$	
^{197}Hg					$1.2 \cdot 10^6$	
^{197m}Hg					$1.8 \cdot 10^8$	
^{203}Hg					$1.0 \cdot 10^7$	
Nicht spezifizierte	$9.9 \cdot 10^4$					$3.7 \cdot 10^5$
α -Aerosole	$6.2 \cdot 10^3$					$9.8 \cdot 10^3$

Fussnoten zu den Tabellen 1 bis 3

1] Abgabelimiten gemäss Bewilligung der jeweiligen Kernanlage. Die Abgabelimiten wurden so festgelegt, dass die Jahresdosis für Personen in der Umgebung (vgl. Fussnote 3) für die Kernkraftwerke unter 0.2 mSv/Jahr respektive das Zentrale Zwischenlager in Würenlingen (ZZL) unter 0.05 mSv/Jahr bleibt. Für das Paul Scherrer Institut (PSI) sind die Abgaben gemäss Bewilligung 6/2003 direkt über den quellenbezogenen Dosisrichtwert von 0.15 mSv/Jahr limitiert.

2] Die Messung der Abgaben erfolgt nach den Erfordernissen der Reglemente "für die Abgaben radioaktiver Stoffe und die Überwachung von Radioaktivität und Direktstrahlung in der Umgebung des..." jeweiligen Kernkraftwerkes resp. des ZZL oder PSI. Die Messgenauigkeit beträgt ca. $\pm 50\%$. Abgaben unterhalb 0.1% der Jahresabgabelimite werden von der HSK als nicht-relevant betrachtet.

3] Die **Jahresdosis** ist für Personen berechnet, die sich dauernd am kritischen Ort aufhalten, ihre gesamte Nahrung von diesem Ort beziehen und ihren gesamten Trinkwasserbedarf aus dem Fluss unterhalb der Anlage decken. Die Dosis wird mit den in der HSK-Richtlinie G14 angegebenen Modellen und Parametern ermittelt. Dosiswerte kleiner als 0.001 mSv – entsprechend einer Dosis, die durch natürliche externe Strahlung in ca. zehn Stunden akkumuliert wird – werden in der Regel nicht angegeben. Beim PSI wird die Jahresdosis der Gesamtanlage als Summe über die Abgabestellen gebildet.

4) Bei der **Art der Abgaben** resp. den **Tatsächlichen Abgaben** ist folgendes zu präzisieren:

Abwasser: Die Radioaktivität ist beim Vergleich mit den Abgabelimiten in Bq/Jahr normiert auf einen Referenz-LE-Wert von 200 Bq/kg angegeben. Die LE-Werte für die einzelnen Nuklide sind dem Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein LE-Wert von 200 Bq/kg entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Ingestions-Dosisfaktor von $5 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq. Die unnormierte Summe der Abwasserabgaben ist in einer weiteren Spalte angegeben.

Edelgase: Die Radioaktivität ist beim Vergleich mit den Abgabelimiten in Bq/Jahr normiert auf einen Referenz-CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ angegeben. Die CA-Werte für die Edelgasnuklide sind dem Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung (StSV) entnommen. Ein CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ entspricht einem Referenz-Nuklid mit einem Immersions-Dosisfaktor von $4.4 \cdot 10^{-7}$ (Sv/Jahr)/(Bq/m³). Die unnormierte Summe der Edelgasabgaben ist in einer weiteren Spalte angegeben.

Beim KKG wird für die Bilanzierung der Edelgase eine β -total-Messung durchgeführt; für die Aequivalent-Umrechnung wurde in diesem Fall ein Gemisch von 80% ¹³³Xe, 10% ¹³⁵Xe und 10% ⁸⁸Kr angenommen.

Gase: Beim PSI handelt es sich dabei vorwiegend um die Nuklide ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O und ⁴¹Ar. Deren Halbwertszeiten sind kleiner als zwei Stunden. Hier ist für die einzelnen Abgabestellen und das gesamte PSI die Summe der Radioaktivität dieser Gase und Edelgase ohne Normierung auf einen Referenzwert angegeben. Für die Gesamtanlage wird zusätzlich auch die auf den Referenz-CA-Wert von $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ normierten Abgabe aufgeführt.

Aerosole: Hier ist in jedem Fall die Summe der Radioaktivität ohne Normierung auf einen Referenzwert angegeben.

Der Dosisbeitrag von Aerosolen mit Halbwertszeiten kleiner 8 Tagen ist bei den Kernkraftwerken vernachlässigbar.

Beim KKM ergibt sich der Hauptbeitrag zur Dosis durch die Strahlung der abgelagerten Aerosole, die im Jahre 1986 durch eine unkontrollierte Abgabe in die Umgebung gelangten. Der Dosisbeitrag der Aerosole, welche im Berichtsjahr abgegeben wurden, ist dem gegenüber vernachlässigbar und liegt in der Größenordnung der anderen schweizerischen Kernkraftwerke.

Iod: Bei den Kernkraftwerken ist die Abgabe von ¹³¹I limitiert; somit ist bei den tatsächlichen Abgaben auch nur dieses Iod-Isotop angegeben. Beim PSI, bei dem andere Iod-Isotope in signifikanten Mengen abgegeben werden, ist die Abgabe für die einzelnen Abgabestellen und die Gesamtanlage als Summe der Aktivität der gemessenen Iod-Nuklide angegeben. Für die Gesamtabgabe wird zudem auch ein ¹³¹Iod-Aequivalent als gewichtete Summe der Aktivität der Iod-Nuklide angegeben, wobei sich der Gewichtungsfaktor aus dem Verhältnis des Ingestionsdosisfaktors des jeweiligen Nuklides zum Ingestionsdosisfaktor von ¹³¹I ergibt. Die Ingestionsdosisfaktoren sind der StSV entnommen.

Für die Berechnung der Jahresdosis werden sowohl für die KKW wie für das PSI immer sämtliche verfügbaren Iod-Messungen verwendet, d.h. es ist beispielsweise für KKB auch der Beitrag von ¹³³I berücksichtigt.

Kohlenstoff ¹⁴C: In den Tabellen ist der als Kohlendioxid vorliegende Anteil des ¹⁴C, der für die Dosis relevant ist, angegeben. Die für ¹⁴C angegebenen Werte basieren bei allen Werken auf aktuellen Messungen.

Kapitel 8.2

Ortsdosis und Ortsdosisleistungen in der Umgebung der Kernanlagen

F. Cartier, A. Leupin

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK, 5232 Villigen-HSK

Die Ortsdosis, respektive die Ortsdosisleistung durch externe Strahlung werden in der Umgebung der Kernanlagen und des PSI mit dem MADUK-Messnetz (siehe Kapitel 8.3), und mit Thermolumineszenzdosimetern (TLD) in der Umgebung sowie am Arealzaun überwacht. Zusätzlich dazu führt die HSK vierteljährlich stichprobenweise Dosisleistungsmessungen am Arealzaun sowie bei Bedarf spezielle Messkampagnen durch.

Die Ortsdosisleistung ist im Nahbereich der Siedewasserreaktoren in Mühleberg und in Leibstadt durch Direkt- und Streustrahlung aus dem Maschinenhaus erhöht. Diese Strahlung resultiert aus Zerfällen des kurzlebigen, im Reaktor produzierten Stickstoffnuklids ^{16}N , welches mit dem Dampf aus dem Reaktor in die Turbine im Maschinenhaus getragen wird. Des weitern können Abfalllager zu einer erhöhten Ortsdosis am Zaun beitragen.

Am Zaun des KKM wurden bei stichprobenweise, vierteljährlich von der HSK durchgeführten Messungen Dosisleistungen zwischen 0.08 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.34 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Auf ein Jahr hochgerechnet würde basierend auf diesen Momentanwerten am meist exponierten Ort eine Dosiserhöhung von ca. 2.2 mSv (ohne natürlichem Untergrund) resultieren. Die vom KKM ausgewerteten Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun ergeben für das Berichtsjahr eine Dosiserhöhung von 0.8 mSv, ohne natürlichen Untergrund von ca. 0.7 mSv.

Am Zaun des KKL wurden bei vierteljährlichen Stichproben der HSK während des Leistungsbetriebes Ortsdosisleistungen zwischen 0.06 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ (natürlicher Untergrund) und 0.19 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ermittelt. Dies entspricht nach Abzug des Untergrundes und unter Berücksichtigung der Betriebszeit am meist exponierten Ort einer Dosiserhöhung von ca. 1.0 mSv pro Jahr. Die höchste, mit den TLD am Zaun ermittelte Jahresdosis (nach Abzug des natürlichen Untergrundes von 0.6 mSv) beträgt 0.8 mSv.

Im Jahr 2007 betrug der höchste, mit einem Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) am Zaun des Paul Scherrer Instituts (PSI) gemessene Wert ca. 0.2 mSv (ohne natürlichen Untergrund von ca. 0.6 mSv). Der zugehörige Messpunkt liegt bei der Aktivlagerhalle am PSI-Ost. Auf Grund der stichprobenweise von der HSK gemessenen Ortsdosisleistung am Zaun des PSI-Ost ergibt sich hochgerechnet auf ein Jahr eine Ortsdosis von 0.8 mSv ohne natürlichen Untergrund.

Beim KKB, KKG und beim ZZL (Zentralen Zwischenlager Würenlingen) wurde am Zaun weder mittels TLD noch bei den vierteljährlichen Stichproben der HSK eine Erhöhung der Ortsdosis über dem natürlichen Untergrund festgestellt.

Die Immissionsgrenzwerte für die Direktstrahlung ausserhalb des Betriebsareals von 1 mSv pro Jahr für Wohn-, Aufenthalts- und Arbeitsräume und von 5 mSv pro Jahr für andere Bereiche nach Art. 102 Absatz 3 der Strahlenschutzverordnung wurden auch im Berichtsjahr von allen Anlagen eingehalten.

Kapitel 8.3

Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK)

F. Cartier, A. Leupin

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK, 5232 Villigen-HSK

Zusammenfassung

Das MADUK-System (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) inklusive der Einrichtungen zur Übernahme von Anlageparametern (ANPA) und Kaminemissionswerten aus den Kernkraftwerken wurde im Laufe des Jahres 1993 aufgebaut und ab Frühling 1994 in den operationellen Betrieb überführt. Da das System die Dosisleistung in der Umgebung der Kernkraftwerke ganzjährig rund um die Uhr misst und überwacht, dient es der Beweissicherung für die Behörden und gegenüber der Öffentlichkeit. Ebenso ermöglicht es das Erkennen von Betriebsstörungen und Unfällen, da Erhöhungen gegenüber den natürlichen Dosiswerten in der HSK automatisch angezeigt werden. Bei einem Störfall unterstützt MADUK die HSK Notfallorganisation bei der Bestimmung des betroffenen Gebietes und der Einschätzung der möglichen Massnahmen anhand des integrierten Ausbreitungsprogramms TIS/ADP und durch den schnellen Datenaustausch mit Behörden.

Übersicht

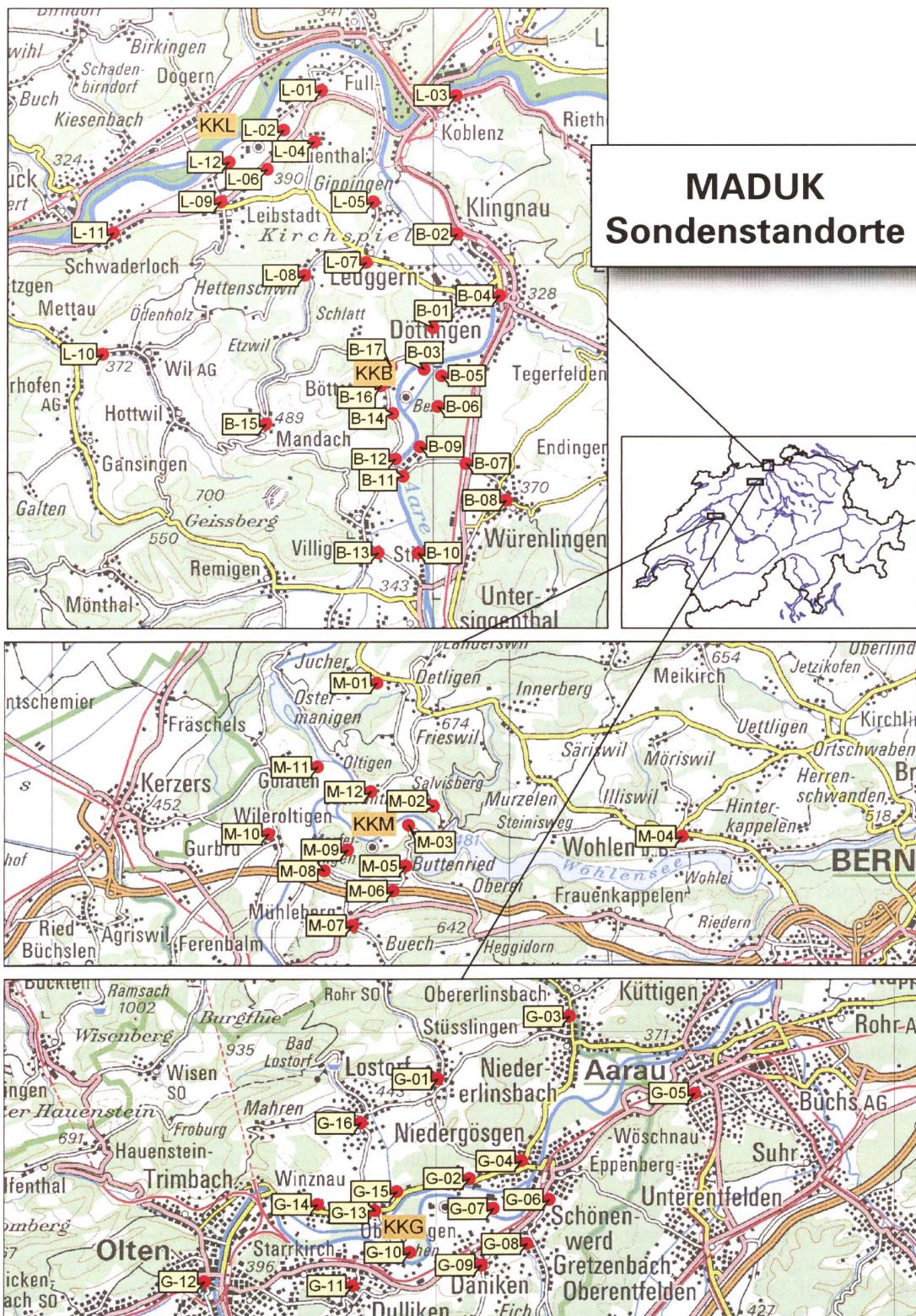
Das MADUK-Netz zur Messung der Dosisleistungen besteht aus insgesamt 57 Immissionsmessstationen (IMM-Stationen) in der Umgebung der vier Kernkraftwerke. Die Messsonden des MADUK-Systems komplettieren und ergänzen das gesamtschweizerische Messnetz zur Radioaktivitätsüberwachung, das mit dem NADAM-Netz auf weitere 58 Messstationen zählen kann. Die Geiger-Müller-Zählrohre in den Sonden ermitteln die Gamma-Dosisleistung im Messbereich von 10 nSv/h (Niederdosiszählrohr/e) bis 10 Sv/h (Hochdosiszählrohr). Zur Übernahme der Kaminemissionswerte der Kernkraftwerke und deren ANPA-Daten (die wichtigsten Anlagenparameter der Primär- sowie Sekundäranlage) und zur Datenzwischenspeicherung

vor Ort werden so genannte Frontendrechner innerhalb der Kernkraftwerke Beznau, Leibstadt und Mühleberg sowie in Olten für das Werk Gösgen eingesetzt. Neben den notwendigen Netzwerkeinrichtungen befinden sich in der MADUK-Zentrale der HSK ein UNIX Servercluster für das Verarbeiten und Archivieren von Daten, ein Alarmierungssystem und ein Backupsystem. Des Weiteren sorgen verschiedene Subsysteme für den Datenaustausch mit den externen Partnern: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Kernreaktorfernüberwachung Baden-Württemberg sowie MeteoSchweiz in Zürich. Die Subsysteme beliefern auch die Systeme ADAM und ADPIC in der HSK. Die Darstellung auf der nächsten Seite zeigt die Standorte der Messsonden in der Umgebung der Kernkraftwerke.

Die Daten von MADUK können mittels einer speziellen Software auf bestimmten Windows-Arbeitsplatzrechnern in der HSK, in den Kernkraftwerken und im Bundesamt für Gesundheit visualisiert werden. Auf der Internetseite www.hsk.ch unter der Rubrik Messen/Messwerte Radioaktivität sind die Stunden- und Tagesmittelwerte aller MADUK Stationen abrufbar.

Systeminstandhaltung und –ergänzung

In den Jahren 1999 – 2001 musste das System erstmals an den aktuellen technischen Stand angepasst werden. Weitere Erneuerungen und Ertüchtigungen werden nun seit 2002 jährlich umgesetzt. Die Investitionsmassnahmen im Jahr 2007 haben sich auf die Vorbereitungen für die Erneuerung der Datenkommunikation im Gesamtsystem konzentriert. Der Austausch im Feld wird im Jahr 2008 erfolgen.



Systemverfügbarkeit und Störungen

Die Systemverfügbarkeit ist bei MADUK von besonderer Bedeutung, da das System eine kontinuierliche Überwachung gewährleisten muss, die auch von der Öffentlichkeit wahrgenommen werden soll. Mit der Kenngrösse ‚Systemverfügbarkeit‘ im Management-Handbuch der HSK

wird die Einsatztauglichkeit des Gesamtsystems MADUK beurteilt: Systemstörungen, die zu wesentlichen Nutzungs-einschränkungen geführt haben, werden als Ausfallzeit in Stunden erfasst. Im Berichtsjahr lag die Systemverfügbarkeit bei 98.9 % (Verfügbarkeit der ANPA- und EMI-Daten eingerechnet). Über die wichtigen Systemstörungen und Betriebsvorkommisse wird im Folgenden kurz berichtet.

Störungen in der Telekommunikationskette zwischen Modem in der Station und Modem im Messringknoten haben bei der IMM-Station 5 bei Leibstadt sporadische aber auch längere Datenausfälle (bis zu 26 Tagen) produziert. Zudem sind Ausfälle mit Dauer von einigen Stunden bei den IMM-Stationen 10, 13 und 14 bei Beznau, 7 bei Gösgen sowie 1 und 11 bei Mühleberg Defekten in der Sonden-Hardware, oder gestörten Modems zuzuschreiben. Der Ausfall des Routers im Messringknoten Mühleberg legte für 6 Stunden die gesamte MADUK-Kommunikation nach Mühleberg lahm. Im Bereich Hardware kamen zwei Subsysteme-Rechner nach einem Ausschalten und wieder Einschalten nicht mehr hoch und wurden durch neue Maschinen ersetzt. Vermutlich war ein Problem bei einer Hardware, die lange im Betrieb war und dann komplett vom Strom getrennt wurde, Ursache des Ausfalls. Im Bereich zentrale Software gab es einen Datenbankabsturz und eine Erschöpfung der Kapazität des zentralen Filesystems, die den korrekten Betrieb für einige Stunden störten. Die Ursachen dieser Schwierigkeiten lagen in bekannten Bugs der INGRES-Datenbank bzw. in einem Fehler in der Systemkonfiguration (die Disks wurden in der Folge neu partitioniert). Nach allen im zentralen System verursachten Störungen konnten die Daten später wieder lückenlos erfasst werden. Bei der Erfassung der Meteoroden gab es Problem mit der Qualität der Daten, da diese teilweise Datenfehler aufwiesen. Meteoschweiz konnte das Problem prompt beheben und die korrekten Daten nachliefern.

Qualitätssicherung

Die Aufgaben im Bereich der Qualitätssicherung basieren auf dem Qualitätsmanagementsystem der HSK und dem darauf abgestützten Betriebshandbuch MADUK. Dadurch ist gewährleistet, dass alle Aufgaben im Zusammenhang mit dem Betrieb, der Wartung und der Instandhaltung/Erneuerung qualitätsgestützt und nachvollziehbar bearbeitet werden. Die wesentlichen qualitätssichernden Massnahmen werden im Folgenden beschrieben.

In Anlehnung an die "Empfehlungen zur Sicherstellung der Messdatenqualität von Umgebungsdosimetriesystemen" der Eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität vom 24. November 2004 werden die neu in Einsatz kommenden MADUK Sonden geeicht. Die Eichung hat eine dreijährige Gültigkeit. Das Messverhalten der Sonden zwischen den Eichungen wird mittels der halbjährlichen Genauigkeitstests verfolgt. Bei den Genauigkeitstests werden mit Hilfe einer Prüfquelle die Resultate des Niederdosis- und des Hochdosis-Zählrohres überprüft. Mit einer 460 kBq ¹³⁷Cs-Quelle werden erhöhte Werte bei jeder Sonde während ca. einer Stunde produziert und in einer späteren Analyse mit Referenzwerten verglichen. Gleichzeitig wird diese Sondenfunkti-

onskontrolle auch für die Überprüfung der Datenübermittlung, der korrekten Archivierung im MADUK-Datenarchiv sowie der Alarmauslösung gemäss den festgelegten Schwellwerten benutzt. Im Jahr 2007 ergaben die durchgeföhrten Funktionskontrollen, dass alle Messsonden die technischen Spezifikationen und Vorgaben des Sondenherstellers erfüllen. Die Archivierung und Alarmierung funktionierten ebenfalls einwandfrei.

Als weitere qualitätssichernde Massnahme werden in-situ-Messungen mittels Gammaspektrometrie im Feld durchgeführt. Mit Hilfe eines Germanium-Detektors wird die emittierte Gammastrahlung von natürlichen und künstlichen Nukliden gemessen, welche in einem gewissen Radius um den Detektor auf und im Boden abgelagert wurden oder im Boden natürlicherweise vorkommen. Der Abstand Detektor – Boden beträgt 1 m. Gemäss Planung wird pro Jahr abwechselungsweise in der Umgebung zweier Kernkraftwerke gemessen. Im September 2007 wurde eine Messkampagne mit 27 in-situ-Messungen an den MADUK Stationen bei Gösgen und Leibstadt durchgeführt. Dabei gab es 10 Messergebnisse, die ausserhalb des entsprechenden Toleranzbereiches lagen und vertieft analysiert wurden. Bei 6 Standorten lag das Verhältnis des aktuellen Messwerts für ¹³⁷Cs zum aktuellen Bezugswert von 1993 unterhalb der festgelegten Bandbreiten. Die Cäsium-Aktivität hat an diesen Standorten stärker abgenommen als erwartet. Weil sich ¹³⁷Cs in immer tiefere Erdschichten verlagert, nimmt entsprechend die gemessene Aktivität ab. Aus diesem Grund wird ab der nächsten Messkampagne auf den Wert von 2005 Bezug genommen. Bei zwei Standorten lag das Verhältnis Messwert/Bezugswert für ²³⁸U oberhalb der festgelegten Bandbreite. Da die hohen Werte am selben Tag gemessen wurden, wird ein meteorologischer Effekt vermutet, der das Gleichgewicht der Zerfallsreihe störte (die Berechnung der ²³⁸Uran-Reihe erfolgt anhand des Nuklids ²¹⁴Bi). Bei zwei Standorten lag das Verhältnis Messwert zu Bezugswert oberhalb der Bandbreite für ⁷Be. Dafür wurde kein triftiger Grund gefunden.

Messergebnisse

Erhöhte Ortsdosisleistungswerte, die auf Abgaben der Kernkraftwerke zurückzuföhren waren, wurden keine festgestellt.

Für die langjährige Nachvollziehbarkeit der Messungen ist es hier zu erwähnen, dass die Stationen 3 und 4 des Messrings Mühleberg, sowie die Station 7 des Messrings Gösgen im Laufe des Jahres 2007 (im Januar, Juni bzw. November) versetzt wurden.

In Rahmen der jährlichen Überprüfungskampagne bei den NADAM Sonden wurden bei den Meteotürmen und beim

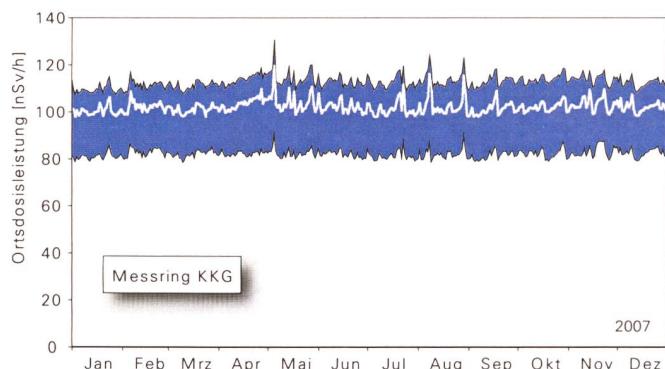
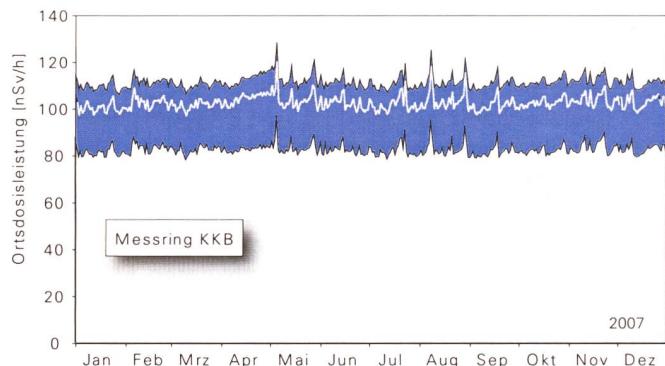
Personalrestaurant des PSI durch die dort positionierten MADUK-Stationen jeweils für eine halbe Stunde erhöhte Werte registriert:

- bei der IMM-Station 11 des Messrings Beznau betrug der Maximalwert 3530 nSv/h,
- bei der IMM-Station 7 des Messrings Gösgen 1250 nSv/h,
- bei der IMM-Station 6 des Messrings Leibstadt 450 nSv/h,
- bei der IMM-Station 3 des Messrings Mühleberg 127 nSv/h.

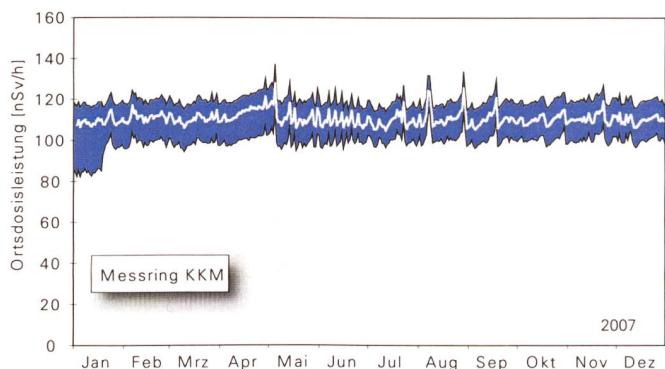
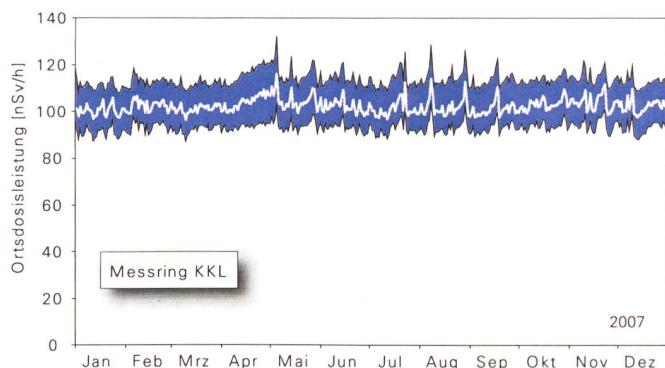
Beim gemessenen Wert der IMM-Station M-03 (Mühleberg, Meteomast KKM) ist zu beachten, dass die Distanz zur Prüfquelle infolge der Versetzung der MADUK-Sonde grösser geworden ist.

Am 05. Januar um 21:40 Uhr wurde bei der IMM-Station L-06 (Leibstadt, Meteomast KKL) ein einziger erhöhter Wert von 3.24 μ Sv/h gemessen. Der 1 μ Sv/h Grenzwert für Ortdosisleistungen wurde damit verletzt. Die Sonde befand sich zu diesem Zeitpunkt weder im Ausbreitungsfeld von Leibstadt noch von Beznau. Da die benachbarte NADAM-Sonde zur gleichen Zeit normale Werte (0.093 μ Sv/h) anzeigte, ist von einer technischen Störung an der Sonde auszugehen. Die Sonde wurde in der Folge speziell beobachtet, aber es wurden keine weiteren abnormalen Werte gemessen. Am 27. August um 16:30 Uhr überschritt ein einzelner Minutenwert den auf 50 nSv/h gesetzten Schwellwert für die Nettodosisleistung bei der Messstation M-04 (Wohlen, Gemeindehaus). Es wurde eine Nettodosisleistung von 83 nSv/h registriert. Zu diesem Zeitpunkt befand sich die Sonde nicht im Ausbreitungsfeld des KKM. Das Werk meldete ebenfalls keine Abgaben. Die Minutenwerte bestätigten eine für mehrere Minuten dauernde Erhöhung. Eine Spike-Störung der Sonde kann damit ausgeschlossen werden. Die Ursache der Erhöhung konnte jedoch nicht mit Sicherheit erörtert werden. Der erwähnte Nettodosisleistungsmesswert ist radiologisch unbedeutend.

Die Darstellungen 3 und 4 zeigen die Maxima, die Minima und die Mediane der Tagesmittelwerte im Berichtsjahr in den Umgebungen der Kernkraftwerke. Die Werte liegen im normalen Schwankungsbereich. Im Fall Mühleberg sind die tiefsten Werte nach oben gerutscht, da die entsprechende Sonde von einem Dach auf Naturboden umgelegt wurde, wo der Abschirmungseffekt viel niedriger ist.



Figur 3:
Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKB, KKG.



Figur 4:
Wertebereiche aus Tagesmittelwerten für die Messringe KKL, KKM.

Chapitre 8.4.

Les installations nucléaires et l'environnement

S. Estier, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, M. Jungck, M. Müller, H. Völkle

Section radioactivité de l'environnement (URA), BAG, 3003 BERN

Résumé

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2007. Les méthodes de mesure, d'une grande sensibilité, mises en œuvre dans leur voisinage ont permis de mettre en évidence les traces des rejets atmosphériques (^{14}C dans les feuilages, ^{60}Co dans les filtres aérosols du voisinage de Mühleberg) et des rejets liquides (en particulier isotopes du cobalt et ^{54}Mn dans les eaux et les trappes à sédiment). Du ^{60}Co et du ^{54}Mn ont été mesurés dans un échantillon d'herbe prélevé au mois d'août au voisinage de la centrale de Mühleberg. Cet événement inhabituel a été causé par les inondations qui se sont produites en août 2007, à savoir pendant la période de révision de la centrale où les rejets liquides sont les plus importants. La contribution du rayonnement direct a également été détectée en certains points de la clôture des centrales de Leibstadt et de Mühleberg. Les doses qui en résultent pour la population avoisinante sont toutefois restées nettement en-dessous des limites réglementaires et donc, sans conséquences pour la santé. Notons encore que l'incident qui s'est produit à l'installation SINQ du PSI en août 2007 n'a pas eu de conséquences notables sur l'environnement.

Hormis ces quelques exemples, les résultats des mesures environnementales ne se sont pas distingués de ceux relevés dans les endroits situés hors de l'influence des installations nucléaires. Ils montrent que la radioactivité d'origine naturelle prédomine et que les contaminations détectables proviennent principalement des essais nucléaires des années 60 (^{137}Cs , ^{90}Sr $^{239,240}\text{Pu}$ et ^{241}Am) et de l'accident de Tchernobyl (^{137}Cs).

Introduction

Dans le but de préserver la santé de l'homme et l'environnement au voisinage des centrales nucléaires, l'OFSP poursuit depuis de longues années un programme spécifique de prélèvements et de mesures. Celui-ci commence au terme source, par des analyses effectuées en parallèle par l'exploitant, la DSN et l'OFSP sur divers échantillons en phase de rejet (filtres à aérosols, à iodé, gaz, eaux de rejet). Les exploitants sont par ailleurs tenus de mesurer le bilan de leurs émissions et de le communiquer chaque mois aux autorités.

La surveillance se poursuit par la mesure des immissions des centrales nucléaires (concentrations radioactives effectivement mesurées dans l'environnement). Tous les compartiments environnementaux sont examinés, de l'air jusqu'aux denrées alimentaires, en passant par les précipitations, le sol, l'herbe, les eaux superficielles et les sédiments. Des mesures sur site (spectrométrie gamma in situ) complètent ces analyses en permettant d'évaluer directement la radioactivité déposée au sol. Ce programme de surveillance, coordonné par l'OFSP, englobe non seulement les propres mesures de l'Office mais aussi celles des laboratoires cantonaux (denrées alimentaires), de l'Institut universitaire de radiophysique appliquée (mesures alpha et bêta), du laboratoire de Spiez (^{90}Sr dans les eaux de rejet), du PSI (dosimètres thermoluminescents, aérora-diométrie etc.), de l'EAWAG (Aar et Rhin), de l'université de Berne (^{14}C , ^{3}H et ^{85}Kr) et du LfU (Baden-Württemberg), conformément au programme germano-suisse autour de la centrale nucléaire de Leibstadt. La DSN met également à disposition de l'OFSP un accès direct à son réseau MADUK, mesurant en continu le débit de dose ambiante au voisinage des centrales nucléaires. L'OFSP se doit ensuite de procéder à l'examen critique de l'ensemble de ces données pour évaluer de manière pertinente l'influence des centrales nucléaires sur la population avoisinante et l'environnement.

Un impact mesurable des centrales nucléaires étant difficile à mettre en évidence, l'estimation de la dose au public repose avant tout sur le calcul à partir des émissions des installations. En effet, les niveaux de radioactivité à la source permettent une détection aisée et plus exhaustive des radionucléides rejetés. Leur impact sur l'environnement et l'homme résulte ensuite de la modélisation de leur transfert, basée sur des hypothèses conservatrices. En complément, les mesures dans l'environnement servent à vérifier ces modèles et à établir un bilan local réaliste de la radioactivité naturelle et artificielle.

Méthodologie

Dans le cas d'un suivi de l'environnement, deux aspects peuvent être pris en compte: l'un radio-écologique qui consiste à rechercher les meilleurs indicateurs de la contamination du milieu et l'autre dosimétrique, qui met l'accent sur ce qui peut contribuer aux doses de la population. La surveillance des installations nucléaires s'oriente sur ces deux aspects. Les méthodes de prélèvement et de traitement sont prescrites de manière à assurer une reproductibilité et à viser à concentrer un maximum de radioactivité dans un minimum de volume afin de pouvoir détecter la présence de radionucléides à très bas niveaux.

Mesures à la source

Les mesures parallèles de l'exploitant, de la DSN et de l'OFSP sur des échantillons liquides et gazeux prélevés en phase de rejet ainsi que le contrôle des rejets déclarés mensuellement aux autorités ont confirmé que toutes les centrales nucléaires suisses, à savoir Beznau (CNB 1 et 2), Gösgen (CNG), Leibstadt (CNL) et Mühlberg (CNM) ainsi que l'institut Paul Scherrer (PSI) et l'entrepôt de stockage intermédiaire de déchets radioactifs (ZWILAG), situés sur

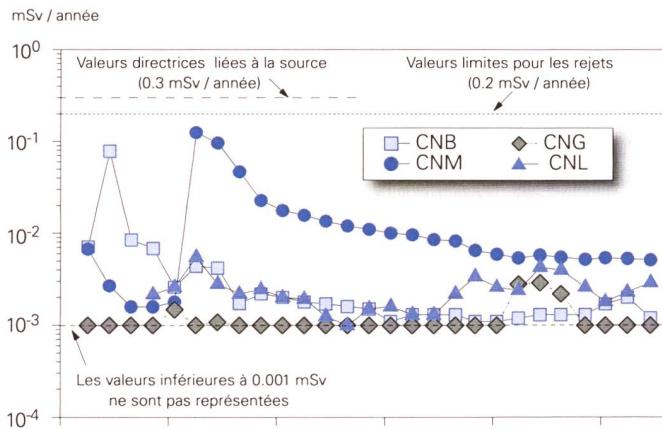


Figure 1

Dose (calculée) due aux émissions des centrales nucléaires accumulée par la personne (adulte) la plus exposée dans le voisinage de chacune des centrales pour chaque année de 1981 à 2007 (Données DSN) et comparaison avec la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an.

le même site, ont respecté les limites réglementaires fixées pour les émissions en 2007 (voir aussi Chap. 8.1).

En synthèse, la figure 1 traduit ce constat du point de vue de l'impact des rejets sur la population avoisinante en termes de doses par rapport à la valeur directrice liée à la source, fixée à 0.3 mSv par an pour les centrales nucléaires (y compris rayonnement direct).

Mesures de l'exposition ambiante

L'exposition ambiante à la clôture et au voisinage des installations nucléaires est surveillée en permanence par le réseau MADUK ainsi qu'à l'aide de dosimètres thermoluminescents (TLD) et par des mesures périodiques effectuées par la DSN à la clôture des installations (voir Chap. 8.2 et 8.3). Les résultats de cette surveillance ont montré que la contribution du rayonnement direct était clairement mesurable en certains points de la clôture des centrales de Leibstadt et de Mühlberg ainsi qu'au PSI mais que toutes les installations avaient respecté les valeurs limites en 2007. Rappelons que la valeur limite d'immission pour le rayonnement direct, en dehors de l'enceinte des entreprises, est fixée à l'Art. 102, alinéa 3 de l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP), à 1 mSv par an (après soustraction de la contribution naturelle) dans les locaux d'habitation, de séjour et de travail et à 5 mSv par an dans tout autre endroit.

L'OFSP effectue également des mesures du débit d'équivalent de dose ambiante $H^*(10)$ à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m au-dessus du sol dans un voisinage plus étendu. La figure 2, illustrant les résultats de ces

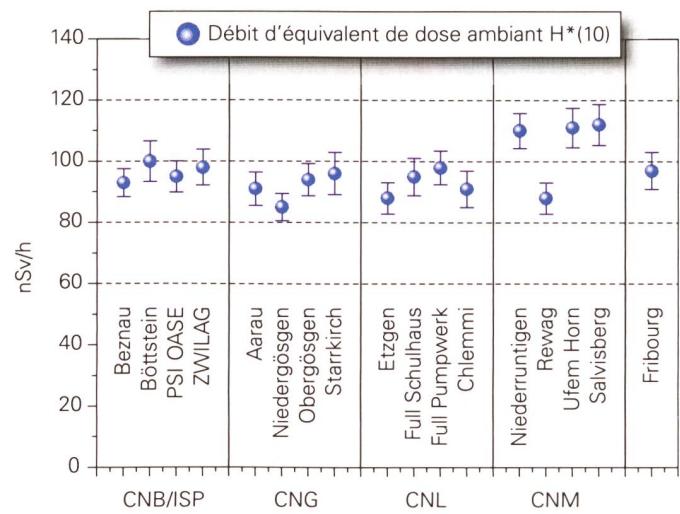


Figure 2

Contrôles du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectués en 2007 par l'OFSP au voisinage des installations nucléaires à l'aide d'une chambre d'ionisation placée à 1m du sol. La valeur mesurée à Fribourg est représentée à titre de comparaison.

mesures, montre que l'exposition ambiante au voisinage des installations nucléaires ne se distingue pas de manière significative de celle enregistrée à Fribourg, située hors de leur influence. Il est intéressant de remarquer que les valeurs de débit de dose légèrement plus élevées mesurées sur trois sites des environs de la centrale de Mühleberg sont dues à une concentration plus élevée en ^{40}K (naturel) dans les sols en ces endroits (cf. Figure 4).

Mesures dans le milieu atmosphérique

La surveillance du milieu atmosphérique comprend l'analyse des précipitations et des aérosols par l'autorité de contrôle ainsi que des dépôts sur plaques de vaseline par l'exploitant.

Comme pour les années précédentes, les résultats des mesures des filtres aérosols des environs des centrales nucléaires suisses ainsi que du PSI ont montré la prédominance des radionucléides naturels ^7Be et ^{210}Pb , avec des valeurs comprises respectivement entre 1.1 et 4.5 et entre 0.1 et 0.9 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (mesures OFSP et PSI).

Les filtres aérosols du voisinage de la centrale de Beznau et du PSI, analysés par le PSI, n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle mesurable (limite de détection pour le ^{137}Cs : 10 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

Les mesures effectuées par l'OFSP en 2007 sur les filtres aérosols des environs des centrales nucléaires de Gösgen et Leibstadt n'ont pas révélé la présence d'émetteur gamma d'origine artificielle à l'exception du ^{137}Cs (0.5 à 7 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), attribuable à la remise en suspension d'anciennes contaminations provenant des essais nucléaires atmosphériques des années 50 et 60 ainsi que de l'accident de Tchernobyl.

Des traces de ^{60}Co ont, en revanche, régulièrement été mises en évidence dans les filtres aérosols du voisinage de la centrale de Mühleberg (valeurs comprises entre 0.5 et 1.2 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, avec une valeur plus élevée atteignant $6.4 \pm 1.0 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). En septembre 2007, mois où la concentration maximale de ^{60}Co ($6.4 \pm 1.0 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) a été mesurée, d'infimes traces de ^{54}Mn ($0.4 \pm 0.3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) ont également été décelées.

Pour mieux comprendre ces résultats, notons tout d'abord que depuis 2006, les filtres aérosols des environs des centrales nucléaires sont mesurés à l'aide d'un nouveau détecteur, d'une plus grande sensibilité. La limite de détection pour le ^{60}Co a ainsi diminué d'un facteur 2 environ par rapport aux valeurs obtenues jusqu'en 2005; elle est aujourd'hui inférieure ou égale à 1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Ce changement dans l'instrumentation permet sans doute d'expliquer pourquoi des traces de ^{60}Co , inférieures à 2 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$,

sont régulièrement mises en évidence dans les filtres des environs de la centrale de Mühleberg depuis 2006, alors que les valeurs mesurées précédemment étaient systématiquement inférieures à la limite de détection.

Un autre aspect des résultats mérite un commentaire: pour la troisième année consécutive, une concentration de ^{60}Co supérieure à 5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ est enregistrée au cours du mois de septembre dans les filtres aérosols du voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg (9 ± 1.6 , 5.5 ± 1.0 , $6.4 \pm 1.0 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour les mois de septembre 2005, 2006 et 2007 respectivement), alors que les valeurs mesurées le restant de l'année sont inférieures à 2 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. L'amélioration de la sensibilité de l'appareillage, mentionnée plus haut, ne permet en aucun cas d'expliquer ce phénomène qui est apparu pour la première fois en 2005, avant la mise en service du nouveau détecteur.

Même si ces concentrations sont nettement inférieures aux limites légales (voir plus bas), elles ne sont pas habituelles, c'est pourquoi la valeur plus élevée, enregistrée en septembre 2005, avait déjà été annoncée à la DSN. Par ailleurs, en 2007 comme en 2005, la concentration de ^{60}Co enregistrée dans les filtres aérosols du voisinage de la centrale de Mühleberg en septembre ne peut être expliquée par les calculs de dispersion, basés sur le bilan des émissions effectué par l'exploitant. En effet, d'après les modèles de dispersion utilisés, les activités totales rejetées dans l'air (aérosols) par l'installation durant l'ensemble de la période de collection de l'échantillon (30 jours environ) devraient être nettement supérieures pour être à l'origine des concentrations enregistrées dans l'environnement au voisinage de la centrale.

Les recherches effectuées en 2005 avaient conclu à une contamination en ^{60}Co du filtre aérosol dans les laboratoires de la centrale avant son envoi pour mesure au laboratoire de l'OFSP. Toutefois à la lumière des résultats obtenus en 2006 et 2007, cette explication semble remise en cause. Un examen approfondi du problème est actuellement mené par la DSN et l'OFSP, en collaboration avec l'exploitant. Des mesures vont par ailleurs être prises pour pouvoir, à l'avenir, exclure toute contamination involontaire des filtres à l'intérieur de la centrale (avant ou après la période de collection).

Rappelons finalement que la valeur limite d'immission pour le ^{60}Co dans l'air est fixée par l'ORaP à 1.66 Bq/m^3 ; les concentrations les plus élevées de ^{60}Co mesurées dans les filtres des environs de la centrale de Mühleberg en 2007 n'ont donc atteint que 0.0004% de la valeur limite et sont sans conséquence radiologique majeure pour la santé de la population avoisinante. La surveillance mise en place aux environs des centrales nucléaires ne vise pas uniquement à remplir des objectifs d'ordre réglementaire, elle doit aussi permettre d'informer la population de manière claire et transparente. C'est pourquoi l'OFSP met

en œuvre des techniques de mesure d'une très grande sensibilité qui permettent de déceler des activités nettement inférieures aux limites légales et ainsi d'évaluer les niveaux réels de radioactivité dans l'environnement.

Aucun émetteur gamma d'origine artificielle n'a été détecté dans les échantillons de pluie collectés aux environs des centrales nucléaires de Leibstadt, Gösgen-Däniken et Beznau ni dans ceux du voisinage du ZWILAG au cours de l'année 2007. Du ^{137}Cs , attribuable à la remise en suspension d'anciennes contaminations, a été mesuré dans un échantillon mensuel prélevé au PSI. Des traces de ^{60}Co ont été enregistrées à deux reprises dans les échantillons de précipitations des environs de la centrale de Mühlberg (valeurs de 2 ± 1 et 14 ± 3 mBq/l respectivement en mars et novembre; la concentration maximale mesurée correspond ainsi à 0.07% de la valeur limite d'immission fixée dans l'ORaP pour les eaux accessibles au public). Cet isotope n'avait pas été détecté dans les précipitations ces dernières années. Par ailleurs, le détecteur utilisé pour la mesure de ces échantillons étant toujours le même, ce phénomène ne peut s'expliquer par un changement de sensibilité de l'instrumentation. Ces résultats semblent ainsi confirmer la tendance déjà observée lors de l'analyse des filtres aérosols: du ^{60}Co , certes en d'infimes quantités, est de plus en plus fréquemment observé dans les échantillons prélevés dans l'environnement au voisinage de la centrale de Mühlberg.

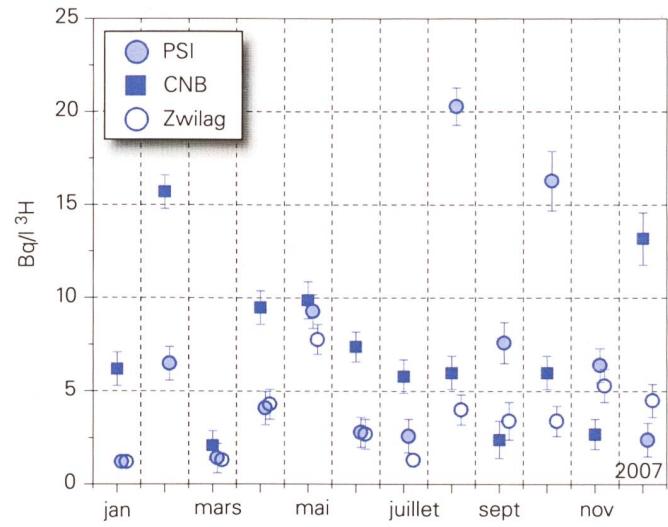
Comme mentionné précédemment, la DSN, l'OFSP et l'exploitant examinent actuellement la situation avec attention afin de déterminer l'origine de ces augmentations et de trouver ensuite des solutions pour y remédier.

Les résultats des mesures du tritium (^3H), radionucléide directeur dans les précipitations, obtenus dans les échantillons mensuels des environs des installations nucléaires sont résumés dans le tableau 1. Les concentrations enregistrées en 2007 aux environs des centrales nucléaires de Gösgen et Leibstadt ne se distinguent pas notablement de celles observées dans des localités situées hors influence telle que Fribourg. A l'exception d'une valeur plus élevée (7.0 ± 1.4 Bq/l) enregistrée en novembre, les activités du ^3H mesurées dans les pluies du voisinage de la centrale de Mühlberg sont également restées très faibles (valeur médiane de 2.4 Bq/l). Des valeurs légèrement plus élevées ont été mesurées dans les précipitations des environs du PSI et de la centrale nucléaire de Beznau. La figure 3 illustre le suivi mensuel des concentrations du ^3H pour les stations de Beznau (PWR CNB), du PSI et du ZWILAG. Cette figure montre que les valeurs plus élevées mesurées à Beznau et au PSI ne présentent que peu de corrélation. Les concentrations de ^3H mesurées dans les échantillons du ZWILAG, situé à quelques centaines de mètres seulement du PSI, sont généralement restées faibles. Notons finalement que toutes les valeurs mesurées sont nettement inférieures aux limites autorisées.

Tableau 1:

Tritium dans les précipitations au voisinage des installations nucléaires en 2007.

Lieu	Valeur min/max	Médiane
	(Bq/l)	(Bq/l)
Niederruttingen (environs CNM) Mesures OFSP	< 1 – 7	2.4
Niedergösgen (environs CNG) Mesures OFSP	1.2 – 2.7	2.1
Full (environs CNL) Mesures OFSP	1.3 – 3.0	2.1
Beznau (environs CNB) Mesures PSI	2.1 – 15.7	6.1
PSI Mesures PSI	< 1.2 – 20.3	5.3
ZWILAG Mesures PSI	< 1.2 – 7.8	3.4

**Figure 3:**

Suivi du tritium dans les précipitations au voisinage de la centrale nucléaire de Beznau, du PSI et du Zwilag en 2007 (mesures mensuelles du PSI).

Pour le reste, un impact des rejets atmosphériques des centrales nucléaires est avant tout perceptible pour le ^{14}C , dont les résultats sont présentés au chapitre 7.1. Les doses qui en résultent par ingestion de denrées alimentaires locales ne représentent cependant que quelques micro-Sv. L'intérêt des mesures de ^{14}C se situe aussi dans l'utilisation de ce traceur atmosphérique pour affiner la modélisation de la dispersion atmosphérique.

Mesures dans le milieu terrestre

L'impact des rejets atmosphériques sur le milieu terrestre est avant tout examiné dans l'herbe et le sol, qui constitue un excellent intégrateur de pollution et permet de tenir compte des phénomènes d'accumulation à long terme. Les résultats de ces analyses se sont avérés conformes à ceux enregistrés dans les sites hors de l'influence des installations nucléaires: ils montrent que, dans les échantillons de sol et d'herbe, la radioactivité d'origine naturelle prédomine nettement et que les émetteurs gamma d'origine artificielle se résument essentiellement au seul ^{137}Cs issu des essais nucléaires des années 60 et de l'accident de Tchernobyl. La figure 4 présente à titre d'exemple les concentrations de la contamination rémanente en ^{137}Cs dans les sols prélevés par l'OFSP en 2007.

Un des 13 échantillons d'herbe du voisinage de la centrale de Mühleberg analysés en 2007 a toutefois présenté des valeurs nettement mesurables de ^{60}Co et de ^{54}Mn (respectivement 1.1 ± 0.3 et 1.2 ± 0.35 Bq/kg de matière fraîche; correspondant à une déposition de 1.3 et 1.4 Bq/m² resp.). Un examen détaillé de la situation a été mené par la DSN et l'OFSP en collaboration avec l'exploitant pour comprendre l'origine de ces contaminations, qui ne pouvaient être mises en relation avec les valeurs observées dans les filtres aérosols (voir plus haut). L'échantillon d'herbe en question a été prélevé fin août 2007 sur un site proche du confluent de l'Aar et de la Sarine. Hors il s'est avéré que lors de la montée importante des eaux du 9 août 2007, causée par les intempéries, ces rivières sont sorties de leur lit et le site a été inondé. Les inondations se sont par ailleurs produites peu après le début de la période de révision de la centrale (révision: 5.08 – 3.09.2007) pendant laquelle les rejets liquides sont les plus importants (voir Chapitre 4.4). L'inventaire des rejets liquides effectués à cette période (essentiellement du ^{60}Co et du ^{54}Mn , ainsi que, en quantité environ 3 fois plus faible, du ^{58}Co) correspond en outre à celui mesuré dans l'herbe (la limite de détection pour le ^{58}Co dans l'herbe était de 0.4 Bq/kg de matière fraîche). Il a donc été possible de conclure que le ^{60}Co et le ^{54}Mn détectés dans l'échantillon d'herbe proviennent des rejets liquides ainsi que des radionucléides présents dans les sédiments qui ont été charriés par les eaux de l'Aar durant les inondations. Remarquons finalement que la contamination a été relativement localisée dans l'espace et dans le temps. Le prélèvement a en effet été répété au même endroit 3 mois plus tard et aucune trace de radionucléide d'origine artificielle n'a pu être mise en évidence.

Afin de caractériser les sites du point de vue des contributions individuelles à l'exposition externe du public, l'OFSP procède depuis les années 80 à des mesures par spectrométrie gamma in situ. Les résultats correspondants (Figure 1 du Chap. 3.1) montrent que les valeurs dans le voisinage des installations nucléaires n'ont rien d'anormal par rapport aux autres sites. Notons qu'aucun émetteur

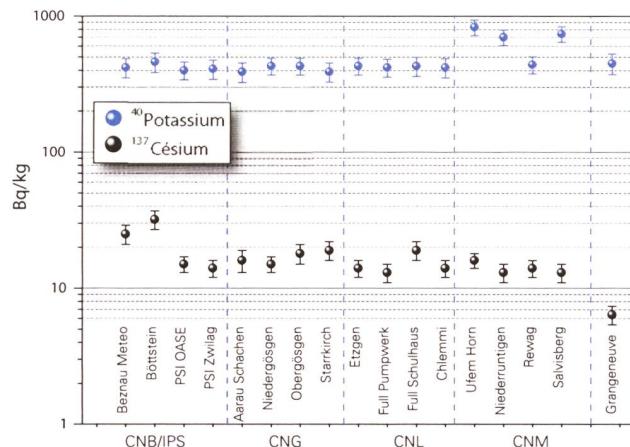


Figure 4:

^{137}Cs et ^{40}K (naturel) dans les sols secs et tamisés (2mm) examinés par l'OFSP en 2007 (couche 0-5 cm).

gamma d'origine artificielle n'a pu être mis en évidence en dehors du ^{137}Cs . Aucune trace de ^{60}Co n'a ainsi été décelée au cours des mesures effectuées en automne 2007 au voisinage de la centrale de Mühleberg (limite de détection pour le ^{60}Co : 25-30 Bq/m² pour une déposition en surface, i.e pour un paramètre ρ/α de l'ordre de 0.3 à 1 g/cm²).

Les résultats des mesures complémentaires effectués dans les sols et les herbes, en particulier pour les teneurs en ^{90}Sr , Pu et Am, sont commentés aux chapitres 4.5 et 7.2.

Les denrées alimentaires constituent le prochain maillon susceptible de transférer les radionucléides jusqu'à l'homme. Les résultats des mesures de la radioactivité dans les aliments, coordonnées par l'OFSP en étroite collaboration avec les laboratoires cantonaux (Chap. 5), n'ont pas révélé de marquage attribuable à l'exploitation des centrales nucléaires. Les mesures additionnelles de l'OFSP, en particulier celles du programme germano-suisse au voisinage de Leibstadt dans les produits agricoles et les poissons confirment ce constat. En effet, en ce qui concerne les émetteurs gamma d'origine artificielle, seul le ^{137}Cs a pu être détecté, notamment dans les salades prélevées à Leibstadt et Dogern/D (valeur maximale relevée pour le ^{137}Cs : 0.7 ± 0.2 Bq par kg de matière fraîche dans une salade des environs de Dogern/D). Ces valeurs n'ont rien d'anormal: même si elles n'ont pas atteint les valeurs enregistrées au Tessin, les retombées de ^{137}Cs résultant de l'accident de Tchernobyl ont été plus importantes dans le nord-est de la suisse que sur le reste du plateau, c'est pourquoi des traces de ^{137}Cs sont aujourd'hui encore plus fréquemment décelées dans le sol, l'herbe ou les produits agricoles de cette région.

Les résultats des mesures de ^{90}Sr effectuées par l'Institut de Radiophysique Appliquée dans des échantillons de lait et de céréales prélevés au voisinage des centrales nucléaires ne se distinguent généralement pas de ceux enregistrés ailleurs sur le plateau suisse. Relevons toutefois qu'une valeur plus élevée de ^{90}Sr (0.24 Bq/g Ca) a été enregistrée dans un échantillon de lait prélevé aux environs de Leibstadt en juillet 2007. La concentration moyenne en ^{90}Sr mesurée dans le lait des environs de Leibstadt au cours des dix dernières années s'élève à 0.061 Bq/g Ca ($n=35$). La valeur mesurée en juillet 2007 sort donc du domaine habituel pour le site de Leibstadt, et correspond plutôt à celle enregistrée en Suisse dans les sites d'altitude (Davos/GR, Mürren/BE, Val Piora/TI). Les échantillons similaires prélevés en février et à la mi-août ont, quant à eux, présenté des valeurs tout à fait normales (0.031 Bq/g Ca et 0.022 Bq/g Ca respectivement). Notons également que les résultats des mesures de ^{90}Sr enregistrés dans le sol (1.45 Bq/kg) et l'herbe (2.35 Bq/kg) du voisinage de Leibstadt sont semblables à ceux obtenus les années précédentes.

Mesures dans le milieu aquatique

Les résultats détaillés de l'examen des systèmes aquatiques sont présentés dans le chapitre 4.4. En résumé, les analyses des échantillons mensuels des eaux de l'Aar et du Rhin, effectuées par l'EAWAG, ont permis de mettre en évidence les traces des rejets liquides des centrales nucléaires, principalement le ^{60}Co et le ^{54}Mn provenant de Mühleberg ainsi que le ^{58}Co issu de Beznau et de Mühleberg. Les rejets les plus importants ont eu lieu au mois d'août, pendant la période de révision. C'est aussi durant ce mois que les concentrations maximales ont été enregistrées dans l'Aar. Le ^{137}Cs , également présent dans les échantillons d'eau de l'Aar et du Rhin, est essentiellement dû à la remobilisation des dépôts de Tchernobyl; il n'existe ainsi pas de corrélation, pour cet isotope, entre les activités rejetées par les centrales et les valeurs mesurées dans les eaux.

Les mêmes isotopes ainsi que des traces sporadiques de ^{65}Zn (aval de CNM uniquement) se retrouvent dans les trappes à sédiments. Du ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn et du ^{137}Cs ont également été mis en évidence dans les plantes aquatiques prélevées en aval de Mühleberg, notamment dans les échantillons récoltés en septembre, après la période de révision.

Les analyses des poissons prélevés dans l'Aar en 2007, en aval de CNG et en aval de CNB, n'ont en revanche pas révélé la présence de radionucléide d'origine artificielle. Le constat est le même pour l'examen des eaux des nappes phréatiques.

Notons que la centrale nucléaire de Beznau a nettement réduit ses rejets liquides (essentiellement ^{58}Co) grâce à la mise en service définitive d'un système de nano-filtration en 2007. Ceci s'est traduit par une diminution significative des concentrations de ^{58}Co enregistrées dans les échantillons d'eaux par rapport aux années précédentes.

La centrale nucléaire de Mühleberg a également reçu l'obligation par la DSN de réduire ses émissions de substances radioactives sous forme liquide d'ici à 2010; le marquage des systèmes aquatiques par les isotopes tels que ^{60}Co ou le ^{54}Mn devrait alors nettement diminuer.

Les résultats des mesures mensuelles du ^3H effectuées par l'OFSP dans des échantillons d'eau du Rhin, prélevés à Weil/D en aval de Leibstadt (dernière centrale nucléaire sur son cours en Suisse), sont représentés sur la figure 5. Comme les années précédentes, les concentrations de ^3H sont généralement faibles (médiane de 2.2 Bq/l), avec des valeurs légèrement plus élevées (6.6 ± 0.7 Bq/l) enregistrées en avril en raison de rejets plus importants d'eau contenant du tritium par la centrale nucléaire de Gösgen.

Un incident survenu à l'installation SINQ du PSI en été 2007 a conduit à une contamination en tritium de l'eau de refroidissement d'un circuit secondaire. Cette contamination est restée confinée, mais le PSI a dû procéder en août et septembre à des rejets contrôlés de ^3H dans l'Aar (Activité totale de ^3H rejetée: env. 4 TBq). Durant cette phase de rejet, qui a duré plusieurs semaines, un programme de surveillance supplémentaire a été instauré par l'OFSP pour mesurer la concentration journalière du ^3H dans l'eau de l'Aar à Klingnau, situé à quelques kilomètres en aval du PSI. Les résultats de ces mesures sont représentés sur la

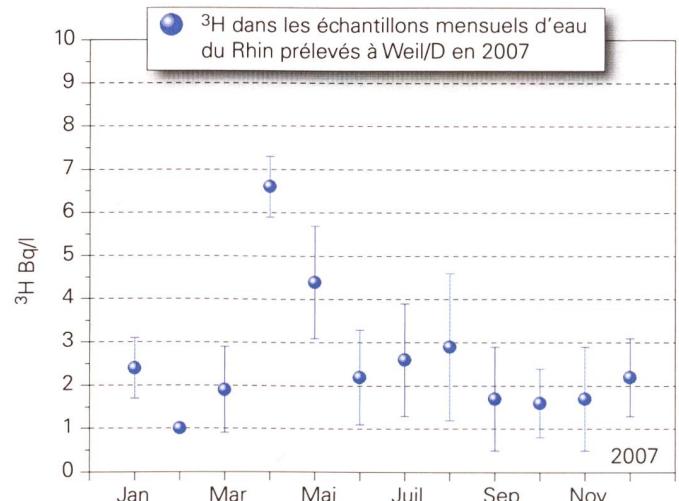


Figure 5:

Surveillance du tritium dans les échantillons mensuels d'eau du Rhin prélevés à Weil/D en 2007 (mesures OFSP).

figure 6. Cette dernière montre que les activités du tritium dans l'Aar durant la phase de rejet n'ont que peu dévié de la valeur de référence de 2 à 3 Bq/l. En effet, les valeurs sont généralement restées inférieures à 5 Bq/l en août et septembre, avec une valeur journalière maximale de 8 ± 0.7 Bq/l. Comme le montre la figure 5, ces rejets n'ont par ailleurs pas conduit à une augmentation mesurable de la concentration en ^{3}H de l'eau du Rhin.

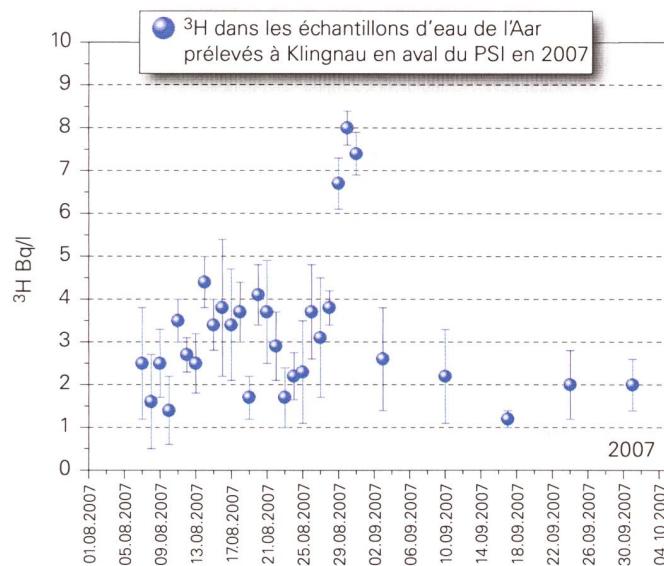


Figure 6:

Suivi du tritium dans les échantillons d'eau de l'Aar prélevés à Klingnau, en aval du PSI, en été 2007 pendant la phase de rejets contrôlés de ^{3}H supplémentaire par le PSI à la suite de l'incident survenu à l'installation SINQ (mesures OFSP).

Situation radiologique du site démantelé de l'ancienne centrale expérimentale de Lucens (site soustrait à la législation sur les installations nucléaires)

Deux prélèvements d'eau sont effectués au début et à la fin de chaque mois dans le bassin de contrôle (intérieur de la centrale) et dans la chambre de contrôle (regard de conduite, à proximité de la Broye) et envoyés à l'IRA. Les prélèvements de début et de fin de mois sont mélangés puis mesurés par spectrométrie γ . Aucun émetteur gamma artificiel n'a été détecté en 2007. Les résultats montrent en effet que les activités du ^{60}Co , ^{131}I , ^{134}Cs et ^{137}Cs sont restées inférieures aux limites de détection de 0.2 à 1 Bq/l.

Les prélèvements mensuels de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle sont distillés puis le ^{3}H est mesuré par scintillation liquide. Les valeurs moyennes de l'activité du tritium mesurées en 2007 dans les échantillons de la chambre de contrôle et du bassin de contrôle s'élèvent à 12 ± 2 Bq/l et 13 ± 3 Bq/l respectivement. Notons encore que l'activité de l'eau de référence (eau robinet IRA) ne dépasse pas la limite de détection de 3 Bq/l.

Pour la mesure du ^{90}Sr , deux échantillons mensuels sont mélangés, aussi bien pour la chambre de contrôle que pour le bassin de contrôle. Les activités de tous les échantillons étaient inférieures à la limite de détection de 5-7 mBq/l.

Conclusions

L'impact des installations nucléaires suisses sur l'environnement a été faible en 2007. La détection du rayonnement direct, du ^{14}C issu des rejets atmosphériques et des produits d'activation présents dans les rejets liquides témoigne d'un fonctionnement normal de ces installations dans l'année sous revue. L'origine des traces de ^{60}Co décelées dans les filtres aérosols des environs de Mühleberg n'a pu être déterminée avec certitude, mais quelle qu'elle soit, les concentrations enregistrées n'ont pas dépassé 0.0004% de la limite d'immission fixée par l'ORaP. La présence de ^{60}Co et de ^{54}Mn dans un échantillon d'herbe du voisinage de KKM prélevé fin août n'est pas due aux émissions atmosphériques de la centrale, mais aux rejets liquides qui ont été charrié par l'Aar lorsque la rivière est sortie de son lit début août 2007, quelques jours après le début de la période de révision (période de l'année où les rejets liquides sont les plus importants). Le site de prélèvement concerné étant situé au confluent de l'Aar et de la Sarine, il avait été inondé. Les différentes mesures ont par ailleurs montré que les contaminations ont été relativement localisées dans l'espace et le temps.

Les doses résultant du fonctionnement des centrales nucléaires pour la population avoisinante sont restées nettement inférieures aux limites réglementaires et le risque lié à l'exploitation de ces installations du point de vue de la santé s'est avéré insignifiant. Comme le montre le suivi de la figure 1, les calculs effectués à partir des rejets effectifs et des modèles de transfert jusqu'à l'homme des radionucléides rejetés confirment que l'impact dosimétrique des centrales nucléaires n'a pas dépassé la valeur directrice liée à la source de 0.3 mSv par an et s'est situé en 2007, en tenant compte des rejets des années précédentes, entre 0.001 et 0.005 mSv. La contribution majeure à la dose d'irradiation provient des rejets atmosphériques: essentiellement du ^{14}C , avec à Mühleberg une contribution rémanente des résines rejetées en 1986, dont l'impact très localisé a constamment diminué depuis.

Les calculs de dose effectués de manière indépendante par le PSI et les autorités ont montré que les doses pour la population avoisinante étaient également restées nettement inférieures à la valeur directrice liée à la source fixée à 0.15 mSv/an pour le centre de recherche.

Même si les expositions du public, du fait des rejets des installations nucléaires, conduisent à des doses très faibles par rapport à celles d'origine naturelle ou médicale, le principe de précaution implique de poursuivre les contrôles et les études avec le plus de précision possible pour répondre aux différents objectifs à la fois d'ordre scientifique, réglementaire et d'information du public. La surveillance de l'environnement au voisinage des installations nucléaires s'appuie également sur des méthodes de mesure très sensibles, permettant de détecter la radioactivité à des niveaux infimes, l'objectif étant de vérifier que la modélisation des transferts n'engendre pas d'erreur sur les estimations dosimétriques réalisées à partir des rejets réels. La surveillance mise en jeu permet le suivi temporel des concentrations dans l'environnement, en particulier les processus possibles d'accumulation locale dans certains écosystèmes (sols, sédiments, feuillages). Enfin elle peut orienter des études nécessaires à la compréhension des processus de transfert, utiles en premier lieu à la maîtrise de situations accidentelles.

Chapitre 8.5

Rejets et environnement du CERN (Mesures CERN)

P. Vojtyla et D. Wittekind

CERN - Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
Commission de Sécurité, 1211 Genève 23

Synthèse

La radioactivité de l'environnement autour de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) et les doses de rayonnements qui en résultent pour la population avoisinante sont contrôlées par la Commission de Sécurité du CERN et de manière indépendante par les autorités compétentes des deux États Hôtes, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) côté France et l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP) côté Suisse (voire Chapitre 8.6). Dans ce rapport, les résultats de mesures concernent en particulier le territoire suisse.

L'ensemble des mesures effectuées en 2007 prouve que le fonctionnement des installations du CERN a été sans conséquence radiologique sur l'environnement et la population. Le contrôle des émissions a montré que les rejets effectifs se sont situés en 2007, comme pour les années précédentes, nettement en dessous des limites réglementaires. Ce constat est confirmé par le contrôle des immissions dans l'environnement. L'impact radiologique réel du CERN ne représente en fait que 2.9% de la valeur directrice de dose liée à la source fixée à 0.3 mSv/an [1], comme l'indique l'estimation pour le groupe de référence, qui est de l'ordre de 0.01 mSv/an.



Objets de la surveillance

Pendant l'année 2007, tous les accélérateurs du CERN ont été en opération. L'installation CNGS (CERN neutrinos to Gran Sasso) a reçu le faisceau de protons de haute intensité pendant deux semaines.

Les contrôles réalisés en 2007 par le CERN sont :

- Mesures de la radioactivité émise dans l'air à partir des différentes installations du CERN et des sites dans leur ensemble (émissions).
- Mesures de la radioactivité émise dans l'eau à partir des différentes installations du CERN et des sites dans leur ensemble (émissions).
- Mesures des rayonnements diffusés produits par l'exploitation des accélérateurs du CERN et mesure de la radioactivité contenue dans différents échantillons, prélevés dans l'environnement, et susceptibles d'être influencés par le rayonnement ou la radioactivité produit par le CERN (immissions).

Contrôle des émissions

Les rejets de la radioactivité dans l'environnement par la ventilation des différentes installations des accélérateurs du CERN sont contrôlés par des moniteurs de l'air installés aux points de rejet de l'air (PMVxx, voir figure 1). Les rejets de tritium sont estimés à partir des concentrations maximales mesurées aux points de ventilation. Ils sont de ce fait très surestimés. D'une façon similaire, les rejets radioactifs par la voie d'eau sont contrôlés par des moniteurs installés aux points de rejet d'eau du CERN (PMWxx, voir figure 1).

Les résultats des mesures concernant les émissions de radioactivité dans l'air pour les points de rejet sur le Site de Meyrin sont présentés dans le tableau 1. Il faut ajouter 2.36 MBq de l'activité alpha (surtout du ^{222}Rn) et 2.73 MBq des radio-isotopes d'iode (^{124}I , ^{126}I , ^{131}I) rejetés par l'installation ISOLDE. Les émissions à partir du CNGS ont été très faibles et elles concernent plutôt le territoire français (PMV43, 44, 400). Comme on le verra dans la figure 4, l'impact radiologique en terme d'immission n'est notable

Tableau 1:

Les rejets de la radioactivité du CERN dans l'air par la ventilation en 2007.

Origine du rejet	Station	Air rejeté	^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , ^{41}Ar	^{7}Be aérosol	Bêta aérosol	Tritium
		10^6 m^3	TBq	MBq	MBq	GBq
Anneau principal PS	PMV174	264	2.2	106	3.9	2.3
TT10 injection PS-SPS	PMV11	179	5.8	142	5.6	7.0
TT60 extr. SPS-Ouest ¹	PMV172	64	0.0	0	0	0
TT70 transfert, PS-SPS	PMV173	57	0.77	4.8	0.13	50
ISOLDE	PMV170	85	11.1	136	4.3	10
Site de Meyrin		649	19.9	388	13.9	70

¹⁾ Les expériences ont été supprimées, pas de faisceau dans le tunnel

Tableau 2:

Les rejets de la radioactivité du CERN dans l'eau vers la Suisse en 2007.

Origine du rejet	Station	Quantité d'eau	Tritium	Bêta/gamma (^{22}Na)	Rejeté dans :
		10^6 m^3	GBq	MBq	
Refroidissement du SPS	PMW62	0.15	0.11	0.005	Nant d'Avril
Site de Meyrin Sud-est	PMW101	1.55	1.59	0.025	Nant d'Avril
Site de Meyrin Nord-est	PMW102	0.20	0.11	0.002	Nant d'Avril
AD infiltration	PMW104	0.05	0.55	0.020	STEP Peney ²
Total vers la Suisse		1.95	2.36	0.052	

²⁾ Station d'épuration d'eau à Peney/GE.

que pour les activités bêta/gamma dans l'air d'une période radioactive $T < 1$ jour (^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O , ^{41}Ar). Les rejets de la radioactivité du CERN dans l'eau vers la Suisse sont présentés dans le tableau 2. Leur contribution à l'impact radiologique du CERN sur l'environnement est, comme pour toutes les années précédentes, tout à fait négligeable.

Contrôle des immissions

La situation géographique des sites du CERN est présentée dans la figure 1. Les accélérateurs du CERN sont des sources de rayonnements diffusés. Pour leur contrôle en continu, des stations de surveillance (PMSxx) sont installées sur les sites du CERN et dans l'environnement. Elles se composent d'une chambre à ionisation pour détecter les photons et les particules chargées (muons) et d'un rem-compteur pour mesurer les neutrons diffusés.

Pour contrôler que l'influence radiologique des rejets du CERN reste négligeable dans son voisinage, la Commissio-

n de Sécurité du CERN procède à des mesures de radioactivité sur des échantillons de toutes sortes pris à l'extérieur des sites de l'Organisation. Les aérosols dans l'air ambiant sont piégés sur des filtres en fibre de verre (PSAxx). Les eaux pluviales sont collectées sur le Site de Meyrin, en Suisse (PSP-M), et sur le Site de Prévessin, en France (PSP-P). Des échantillons des eaux de rivières, des sédiments et des bryophytes dans l'eau des rivières (R-xx) ainsi que des échantillons des eaux potables (TW-x) et souterraines (GW-xx) sont annuellement prélevés sur les sites du CERN et dans les villages autour du CERN. Enfin, le programme d'échantillonnage dans l'environnement est complété par des herbes et des produits agricoles y compris un échantillon de vin. Tous les échantillons sont ensuite analysés en laboratoire pour leur teneur en substances radioactives.

La figure 2 montre les doses nettes intégrées totales en mSv, ainsi que les contributions des rayonnements gamma et neutron à ces doses, telles qu'elles ont été mesurées par les moniteurs de rayonnements (PMS) tout autour des sites. Ces résultats sont cohérents avec ceux des contrôles effectués en 2007 par l'OFSP (voir Chapitre 8.6).

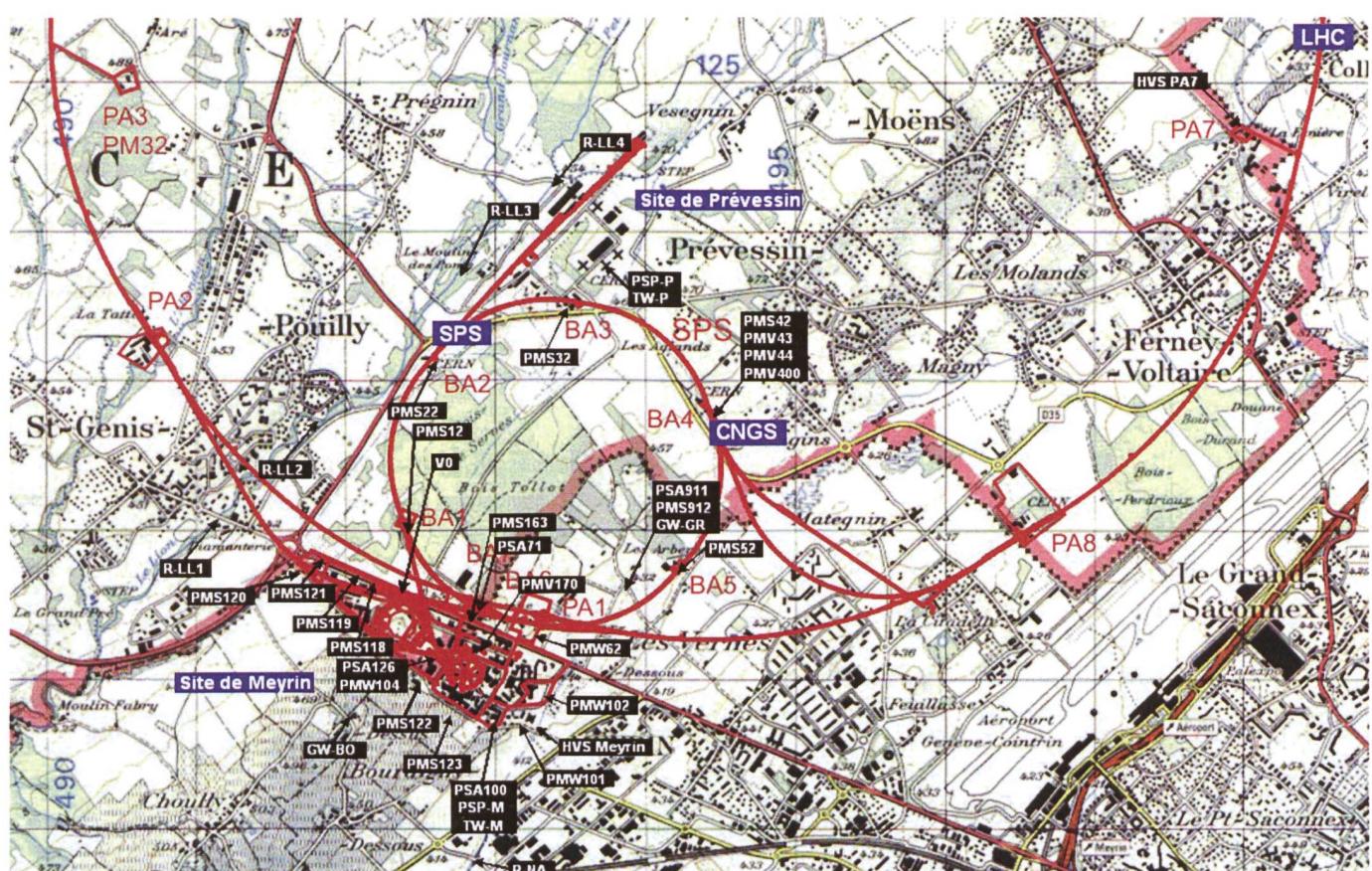


Figure 1:

Les sites de Meyrin et de Prévessin du CERN, l'implantation de l'anneau du Super synchrotron à proton (SPS), de l'installation CERN neutrinos to Gran Sasso (CNGS) et du futur Grand collisionneur à hadrons (LHC) dans la région frontalière entre la France et la Suisse (en construction) ainsi que les emplacements des stations de monitoring et des endroits d'échantillonnage.

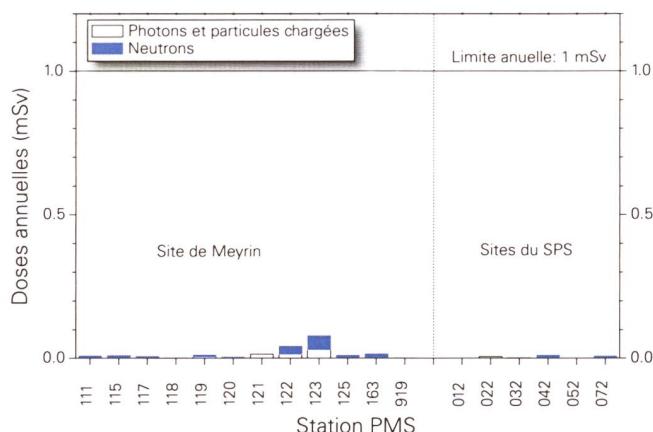


Figure 2 :
Doses nettes ambiantes annuelles des moniteurs de rayonnements diffusés en 2007.

L'influence des accélérateurs du CERN n'est visible, au niveau de certaines stations de mesure situées le long de la clôture du site de Meyrin, que pendant leur fonctionnement. Les mesures des moniteurs PMS122 et PMS123 sont influencées par la proximité des accélérateurs du complexe PS. Le moniteur PMS163 est positionné le long de la clôture du nord du site à côté de la douane franco-suisse. Les doses nettes mesurées ne dépassent pas 8% de la limite pour les rayonnements diffusés fixée à 1 mSv/an [2]. En fait, il est difficile de les distinguer des variations du bruit de fond naturel.

Le seul radioélément de période longue identifié dans l'air dans le cadre du programme de surveillance de routine, qui peut provenir du CERN est le ^{7}Be . Le ^{7}Be est un radioélément d'une très faible toxicité radiologique qui est produit en grande quantité dans l'air des tunnels des accélérateurs à haute énergie lors de leur fonctionnement (voir tableau 1). Donc il peut servir comme un indicateur des rejets atmosphériques.

Le ^{7}Be est aussi produit naturellement dans l'atmosphère par les interactions des rayonnements cosmiques avec l'azote et l'oxygène de l'air. Les variations de concentration en ^{7}Be dans l'air au voisinage du CERN et aux trois endroits éloignés (PSA951 à Cessy en France, LHC PA7 à Ferney en France, près de Collex-Bossy/GE, et Oberschrot/FR) sont présentées dans la figure 3. Les endroits éloignés sont loin de toutes sources artificielles de ^{7}Be et peuvent de ce fait être considérés comme des stations représentatives du bruit de fond naturel. La concentration naturelle du ^{7}Be dans l'air subit des variations saisonnières avec un maximum pendant l'été (dynamique de l'échange d'air entre la stratosphère, où la majorité du ^{7}Be naturel est produite, et la troposphère) et spatiales (remise en suspension par le vent ou par le trafic routier des aérosols déjà déposés au niveau du sol). Ces variations sont bien observables dans la figure 3.

A cause de la remise en suspension du ^{7}Be dans les endroits près des sites du CERN, qui sont caractérisés par une circulation forte, la petite augmentation observée ne peut pas être clairement attribuée aux rejets des installations du CERN. Par ailleurs, la contribution éventuelle du CERN aux valeurs mesurées à PSA126 ne dépasserait pas 2 mBq/m³, soit environ 0.0006% de la limite d'immission suisse [4].

Pour les autres échantillons environnementaux et les produits agricoles analysés dans le programme de routine du CERN, les concentrations du ^{7}Be sont restées autour des valeurs naturelles normales et aucun autre radioélément provenant du CERN n'a été identifié.

Comme le montre la figure 4, les contributions des activités du CERN à la dose efficace pour le groupe de référence qui vit aux abords de l'Organisation correspondent à environ 1% de la dose externe due aux sources naturelles (rayonnements cosmiques et terrestres) mesurée dans des communes proches du CERN. En effet, la valeur annuelle de 0.0086 mSv, dont 95% sont dus aux rayonnements ionisants directs ou aux rejets des gaz de périodes courtes, qui sont surveillés en ligne, peut être comparée aux variations des doses naturelles qui sont de l'ordre de 0.2 mSv dans le bassin lémanique.

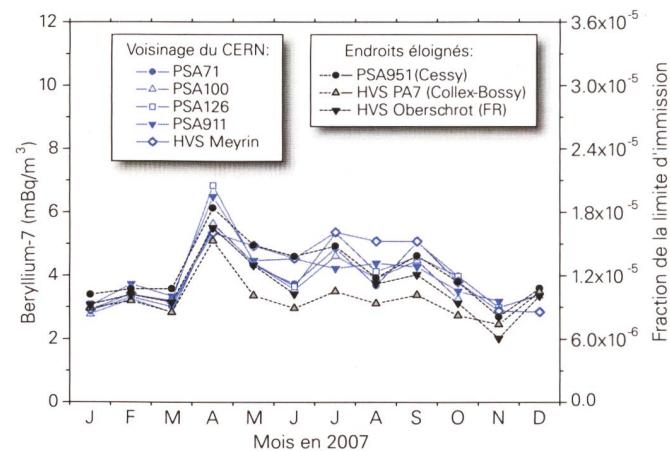
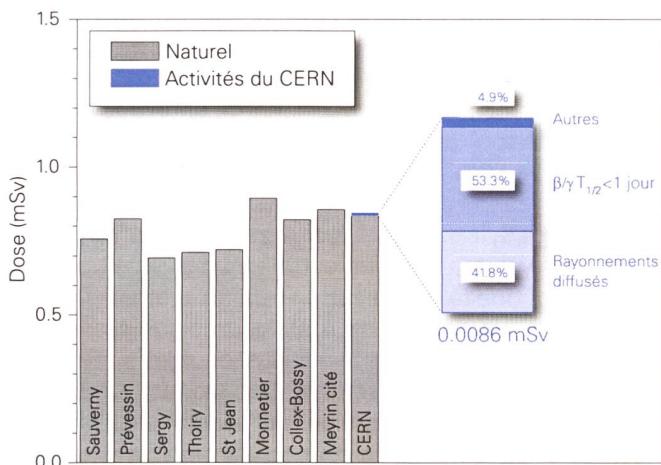


Figure 3:
Activité du ^{7}Be dans les aérosols de 8 stations de mesure dont 5 au voisinage des points de rejet du CERN en 2007. Station de mesure PSA71: Site du SPS BA-7. PSA100: Site CERN de Meyrin. PSA126: Proche du complexe PS. PSA911: Près d'une ferme de Meyrin. HVS Meyrin, HVS Oberschrot/FR: Échantilleurs OFSP à haut débit sur le Site de Meyrin et à Oberschrot/FR [3]. PSA951: Cessy, France. HVS PA7: Échantilleur CERN à haut débit près de Collex-Bossy/GE.

**Figure 4:**

Contribution à la dose annuelle due aux activités du CERN sur le Site de Meyrin comparée aux variations des doses externes naturelles dans des communes françaises et suisses à proximité. La contribution du CERN de 0.0086 mSv doit être comparée à la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv [1].

Conclusions

- L'ensemble des résultats des mesures du CERN atteste que, en 2007, comme lors des années précédentes le CERN est resté bien en dessous de la valeur directrice de dose liée à la source de 0.3 mSv/an [1].
- Les dispositifs de surveillance (prélèvements et mesures) mis en œuvre par le CERN permettent de détecter des niveaux de radioactivité très faibles liés au fonctionnement des accélérateurs du CERN. Les résultats doivent cependant être regardés dans le contexte de leur impact radiologique sur la population avoisinante. Les activités des radioéléments attribuables aux activités du CERN n'ont pas dépassé des petites fractions de pour cent des limites suisses.
- Pour une estimation des doses efficaces annuelles, le groupe de référence de la population vivant à proximité du Site de Meyrin a été identifié. Ensuite à partir des rayonnements ionisants et des rejets des radioéléments du Site de Meyrin, les doses efficaces ont été calculées à l'aide de la Directive HSK-R-41/d [5]. Le résultat de cet exercice, présenté dans la figure 4, montre que l'impact radiologique sur le groupe de référence représente 0.0086 mSv en 2007. La valeur correspondante en 2006 était de 0.0075 mSv. Ces doses correspondent à environ 1% de la dose externe due aux sources naturelles.

La radioactivité de l'environnement et les doses de rayonnements dans le voisinage du CERN ne se distinguent pas notablement de celles enregistrées dans les stations de référence non influencées par des accélérateurs. L'impact des activités du CERN est extrêmement faible. Sa mise en évidence passe par l'exploitation de techniques de prélèvements et de mesures très sensibles, qui sont des outils de radioécologie dépassant les performances du contrôle habituel (voir Chapitre 8.6). Les contributions d'origine naturelle prédominent. Les activités du CERN sont donc restées en 2007 sans conséquence radiologique pour l'environnement et la population avoisinante.

Référence

- [1] Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Ziele für den Schutz der Personen vor ionisierender Strahlung im Bereich von Kernkraftwerken, HSK-R-11/d (Mai 1980).
- [2] Code F Rev., Radioprotection - Manuel de radioprotection, CERN (2006).
- [3] S. Estier et al, Surveillance de la radioactivité dans l'environnement : Résultats des mesures 2007 de la section URA, Office fédéral de la santé publique, Unité de direction Protection des consommateurs, Division radioprotection, Berne (2008).
- [4] Ordonnance sur la radioprotection (ORaP), 814.501, Berne (2007), Annexe 3.
- [5] Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen, HSK-R-41/d (1997).

Glossaire

AD	Décélérateur d'antiprotons
CNGS	CERN neutrinos to Gran Sasso – une source de neutrinos pour les expériences souterraines à Gran Sasso en Italie
ISOLDE	Isotope Separator On-Line Device
LHC	Grand collisionneur à hadrons (en construction)
PS	Synchrotron à protons
SPS	Super synchrotron à protons

Chapitre 8.6

Environnement du CERN (mesures OFSP)

S. Estier, P. Beuret, G. Ferreri, A. Gurtner, M. Jungck, M. Müller, H. Völkle

Section radioactivité de l'environnement (URA), BAG, 3003 BERN

J.-L. Loizeau, V. Lopez, Ph. Arpagaus

Institut F.-A. Forel, Université de Genève
10 route de Suisse, 1290 VERSOIX

Résumé

Parallèlement aux mesures de contrôle effectuées par la Commission de Sécurité du CERN (voir Chap. 8.5), l'Office Fédéral de la Santé Publique met en œuvre, de manière indépendante, un programme de surveillance de la radioactivité et des doses de rayonnement qui en résulte au voisinage du centre de recherche (territoire suisse uniquement). L'ensemble des mesures effectuées par l'OFSP en 2007 n'a pas révélé d'impact notable des installations du CERN sur l'environnement et la population avoisinante. Même si des traces de radio-isotopes, produits dans les installations du centre de recherche, ont pu être détectées, les activités maximales enregistrées sont restées nettement inférieures aux limites suisses et leur impact radiologique peut être considéré comme très faible.

Programme de surveillance de l'OFSP

L'OFSP surveille l'environnement du CERN (territoire suisse uniquement) de manière indépendante par les mesures suivantes:

Exposition ambiante (13 dosimètres à thermoluminescence évalués par l'IRA et parcours de mesures instantanées en 9 sites limitrophes du CERN et 9 sites de référence distants).

- Aérosols (mesure continue alpha/bêta de la station RADAIR avec compensation du rayonnement naturel et spectrométrie gamma hebdomadaire des filtres d'un collecteur à haut débit).
- Eaux du Rhône à Chancy (mesures gamma et tritium) et du Nant d'Avril (mesures spectrométriques de l'eau et des sédiments effectuées par l'Institut Forel).
- Sols (spectrométrie gamma in situ et en laboratoire) ainsi que végétaux et certains produits locaux (comme le ${}^3\text{H}$ dans le vin).

Programme «Point zéro LHC»

Les résultats des mesures effectuées dans le cadre du programme "Point zéro LHC" sont détaillés dans le chapitre 8.7. Ce programme spécifique, mis en œuvre dès 2005 par les autorités des pays hôtes, l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) côté France et l'OFSP côté suisse, a pris fin en 2007. Il sera remplacé dès 2008 et la mise en route du LHC (Large Hadron Collider) par des mesures de surveillance supplémentaires focalisées aux points d'impact maximum présumés des rejets.

Mesures de l'exposition ambiante

Les emplacements des TLD, destinés au contrôle de l'exposition ambiante au voisinage du CERN, ont été en partie modifiés dans le cadre du programme "point zéro LHC". Treize sites ont ainsi été surveillés en 2007 au lieu de 11, mais 5 d'entre eux étaient situés dans l'enceinte du centre de recherche (côtés suisse et français). Par ailleurs, en plus de l'équivalent de dose ambiant résultant du rayonnement gamma déterminé jusqu'à présent, la dose des neutrons a également été évaluée. Les résultats de ces mesures, effectuées par l'Institut de Radiophysique Appliquée sur mandat de l'OFSP, n'ont pas signalé de valeur indicative d'un impact notable des installations du CERN pour les emplacements situés à l'extérieur de la clôture.

Les relevés instantanés réalisés par l'OFSP à l'aide d'une chambre d'ionisation (Figure 1) en août 2007 ont confirmé ce constat. Les valeurs du débit d'équivalent de dose ambiant ($H^*(10)$) se sont échelonnées entre 86 et 110 nSv/h (moyenne des sites limitrophes: 99.5 ± 7 nSv/h; moyenne des sites distants 100 ± 7 nSv/h).

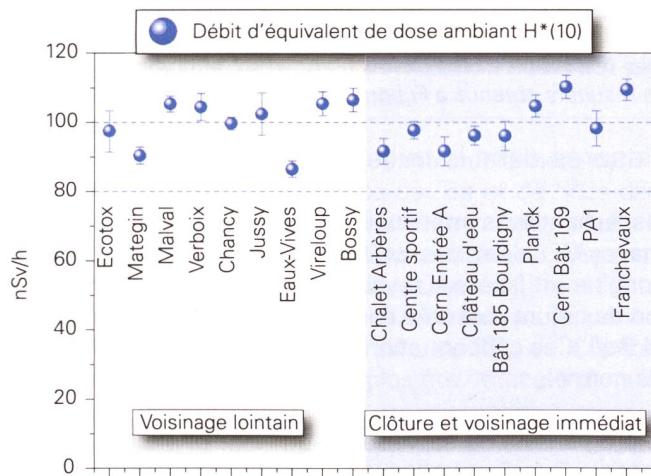


Figure 1:

Mesures du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ effectuées par l'OFSP en 2007 à l'aide d'une chambre d'ionisation placée 1 m au-dessus du sol.

Mesures dans le milieu atmosphérique

La station de mesure du réseau RADAIR (collecteur aérosols) située au CERN et assurant la surveillance de l'air en continu n'a pas signalé d'anomalie en 2007. Un moniteur d'iode a par ailleurs été mis en service en 2007 sur le site du CERN, à côté du collecteur d'aérosols. Cet emplacement a été choisi par l'OFSP car il complète de manière optimale le réseau de surveillance couvert par les 3 autres moniteurs d'iode déjà en fonction (Fribourg, PSI, Bellinzona). Etant situé à l'ouest de la Suisse et proche de la frontière française, il permettra ainsi la détection rapide

d'iode-131 gazeux éventuellement présent dans un nuage radioactif provenant de l'ouest, à son entrée sur le territoire suisse.

Les résultats des mesures hebdomadaires des filtres aérosols HVS du CERN ont confirmé, comme les années précédentes, la prédominance des radioéléments d'origine naturelle, tels que ^{7}Be et ^{210}Pb (cf figure 2). Le cas du ^{7}Be est toutefois particulier de par sa double origine: naturelle et anthropogénique (production dans les tunnels du CERN). Le tableau 1 indique toutefois que les concentrations de ^{7}Be mesurées en 2007 dans les filtres aérosols de la station du CERN ne se sont pas notablement distinguées des valeurs obtenues dans les stations situées hors de son influence. Des traces de ^{22}Na , également d'origine naturelle, ont été détectées à plusieurs reprises (valeurs comprises entre 0.2 et 0.9 microBq/m³). Ces valeurs sont comparables à celles mesurées dans les autres stations de Suisse.

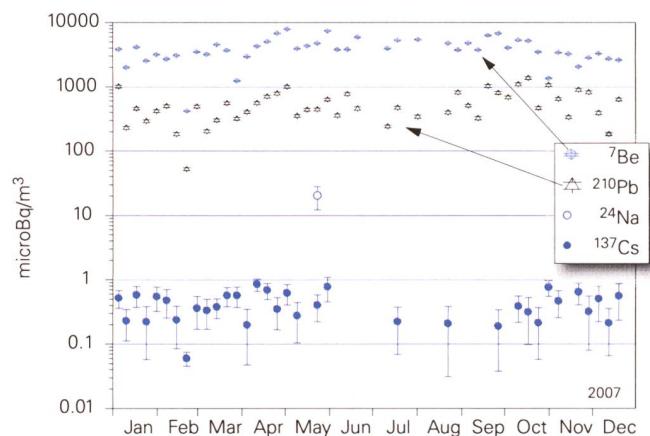


Figure 2:

Concentrations de divers radio-isotopes (naturels et artificiels) mesurées dans les aérosols collectés chaque semaine à la station à haut débit située au CERN en 2007.

Tableau 1:

Concentrations du ^{7}Be mesurées en 2007 dans les filtres aérosols de la station à haut débit au CERN et comparaison avec les sites situés hors influence.

Station de collection à haut débit	Valeur min/max (mBq/m ³)	Moyenne (mBq/m ³)
CERN (Meyrin/GE)	1.2 - 7.9	4.0
Oberschrot/FR	1.0 - 7.8	3.6
Klingnau/AG	1.0 - 7.1	3.4
Göttingen/TG	1.5 - 7.2	3.4
Monte Ceneri/TI	1.6 - 6.7	4.2

Parmi les radioéléments d'origine artificielle, des traces de ^{137}Cs (valeur maximale de 0.8 microBq/m³) dues à la remise en suspension d'anciennes contaminations (fallout de Tchernobyl et des essais nucléaires des années 50 et 60) ont été détectées à plusieurs reprises.

Le seul radio-isotope attribuable aux activités du CERN ayant pu être mis en évidence dans les filtres aérosols est le ^{24}Na . Ce dernier, dont la période est de 15 h, est en effet produit dans les accélérateurs de particules du centre de recherche. Il n'a par ailleurs été décelé qu'à une seule reprise en 2007, avec une valeur s'élevant à 20 ± 8 microBq/m³. Il est à signaler que, comme en 2006, aucune trace de ^{131}I n'a été décelée dans l'air au cours de l'année sous revue.

Notons encore que l'impact radiologique de ces traces de ^{24}Na est tout à fait négligeable, puisque la valeur la plus élevée enregistrée en 2007 ne représente qu'environ 0.00002% de la limite d'immission fixée dans l'ORAP (100 Bq/m³ pour le ^{24}Na). L'identification d'un aussi faible niveau de radioactivité nécessite une méthode extrêmement sensible, comme celle mise en œuvre par l'OFSP.

Mesures dans le milieu terrestre

Les mesures par spectrométrie gamma in situ permettent de distinguer les contributions d'origine naturelle et artificielle à l'exposition externe. Les mesures 2007 n'ont pas indiqué d'apport artificiel attribuable aux activités du CERN: la figure 3 montre que les valeurs mesurées au voisinage du CERN sont tout à fait comparables à celles relevées dans des sites hors de son influence, tel que Fribourg (pour plus de détails sur les mesures in situ, se référer au Chap. 3.1).

Les analyses en laboratoire sur des échantillons de sol, d'herbes et autres produits locaux n'ont pas révélé d'impact notable des installations du CERN. Les résultats sont typiques de ceux obtenus dans des échantillons comparables du Plateau suisse. Outre la détection permanente des radioéléments d'origine naturelle, dont les concentrations prédominent, on y détecte encore les traces des injections artificielles des essais nucléaires des années 50 et 60 et dans une moindre mesure de l'accident de Tchernobyl.

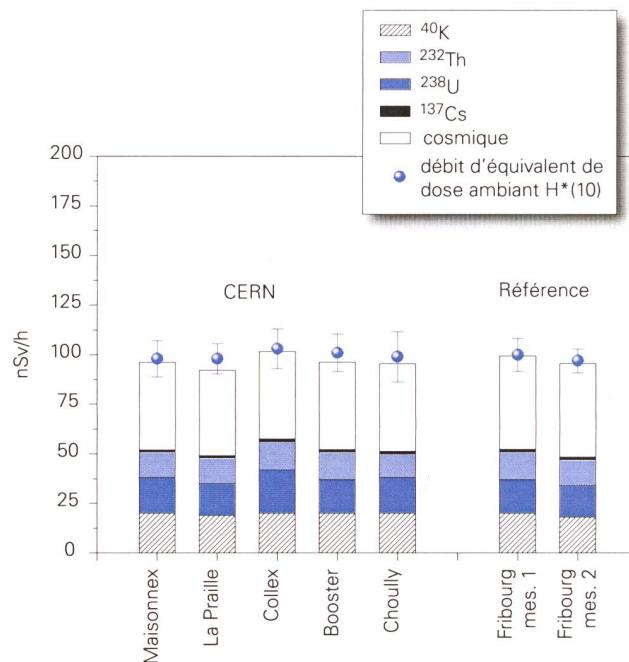


Figure 3:

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant H*(10) déterminées par spectrométrie gamma in situ pour les sites voisins du CERN examinés en 2007, et comparaison avec les résultats obtenus à Fribourg.

Mesures dans le milieu aquatique

Les échantillons mensuels d'eau du Rhône prélevés à Chancy/GE n'ont pas présenté de radioactivité gamma d'origine artificielle. La valeur maximale de la concentration du tritium mesurée dans ces échantillons est de 2.0 ± 1.4 Bq/l. Ces concentrations sont parfaitement conformes à la normale.

Le programme de surveillance du Nant d'Avril conduit par l'Institut F-A. Forel à l'initiative de l'OFSP depuis 1999 a été poursuivi. Les résultats des mesures effectuées dans le cadre de ce programme pour la période novembre 2006 à novembre 2007 a fait l'objet d'un rapport spécifique [1].

En dehors du ^{40}K et des isotopes des séries primordiales (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th), 3 radio-isotopes ont été détectés dans les échantillons d'eau prélevés dans le Nant d'Avril: le ^7Be , d'origine naturelle, le ^{137}Cs qui résulte de l'érosion des sols, contaminés par les retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 et par l'accident de Tchernobyl et enfin le ^{65}Zn qui provient des activités du CERN. Remarquons que pour ce dernier isotope, les activités étaient trop faibles pour être quantifiées avec précision, c'est pourquoi le flux de ^{65}Zn n'est pas déterminé dans le tableau 2. Contrairement aux années précédentes, aucune trace de ^{22}Na n'a été décelée dans les eaux du Nant d'Avril. Les activités maximales relevées pour le ^7Be et le ^{137}Cs dans les eaux étaient de 1.18 ± 0.02 Bq/l et $3.3 \cdot 10^{-2}$ Bq/l respectivement.

Tableau 2:

Estimation des flux annuels pour la période 2006-2007 des radio-isotopes dans le Nant d'Avril et comparaison avec les estimations des années antérieures. (Données provenant de l'Institut Forel).

Isotope	⁷ Be	⁶⁵ Zn
	Flux min.-max. [MBq/an]	Flux min.-max. [MBq/an]
1999 - 2000	810 - 1410	69 - 182
2000 - 2001	2076 - 2822	89 - 153
2001 - 2002	470 - 859	46 - 102
2002 - 2003	960 - 1330	14 - 37
2003 - 2004	1460 - 2210	ND
2004 - 2005	1400 - 2060	ND
2005 - 2006	1200 - 1470	31 - 67
2006 - 2007	2630 - 3280	ND

Comme dans le cas des mesures dans le milieu atmosphérique, il ne peut être exclu qu'une partie du ⁷Be mesuré dans les échantillons d'eau provienne des activités du CERN, cependant cette éventuelle fraction est difficilement quantifiable. Le tableau 2 montre que le flux estimé de ⁷Be pour la période sous revue (2006 - 2007) est plus élevé que les années précédentes.

L'analyse des sédiments prélevés mensuellement dans le Nant d'Avril a révélé la présence de ⁷Be et de ¹³⁷Cs dans tous les échantillons. Les activités mesurées pour ces deux isotopes sont résumées dans le tableau 3. Elles sont comparables à celles observées les années précédentes (y compris pour le ⁷Be). Notons que depuis la période 2004 - 2005, aucune trace de ⁵⁴Mn, de ⁶⁵Zn ou d'isotope de Cobalt (⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co) n'a plus été détectée dans les sédiments du Nant d'Avril.

Les sédiments superficiels près de l'embouchure du Nant d'Avril, de l'Allondon et de la Versoix dans respectivement le Rhône pour les deux premiers et le Léman pour la dernière ont par ailleurs été prélevés une fois au cours de l'année et analysés par l'Institut Forel. Parmi les radio-isotopes recherchés, seuls le ⁷Be et le ¹³⁷Cs ont été détectés. Les activités enregistrées sont du même ordre de grandeur dans les différentes rivières et les valeurs de ⁷Be sont restées dans la gamme mesurée depuis 2003, soit entre 82 et 563 Bq/kg.

Tableau 3:

Résumé des résultats des mesures effectuées par l'Institut F-A. Forel dans les sédiments du Nant d'Avril durant la période novembre 2006 à novembre 2007 (13 échantillons analysés).

Isotope	Min- Max [Bq/kg]	Moyenne [Bq/kg]	Médiane [Bq/kg]
⁷ Be	218 - 1657	820	701
¹³⁷ Cs	2.8 – 18.9	12.3	11.4

En résumé, si l'on exclut le ⁷Be dont la fraction produite par les installations du CERN est incertaine, aucun marquage du système aquatique attribuable aux activités du centre de recherche n'a pu être mis en évidence au cours de la période sous revue. Ainsi, aucun des radioéléments provenant du CERN le plus souvent détectés au cours des années précédentes (²²Na, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn) n'a pu être décelé dans les eaux ou dans les sédiments.

Conclusions

Le programme de surveillance mené de manière indépendante par l'OFSP, en collaboration avec l'institut F-A. Forel, a confirmé que l'impact radiologique des activités du CERN sur l'environnement et la population avoisinante est resté très faible en 2007.

A l'image des examens in situ de la figure 3, l'ensemble des résultats ont montré la prédominance des radioéléments d'origine naturelle. La détection de traces de radio-nucléides attribuables aux activités du CERN (²⁴Na dans l'air, ⁶⁵Zn dans l'eau), n'a été possible que grâce à la mise en œuvre de techniques de prélèvement et de mesures d'une très grande sensibilité, dépassant le cadre des contrôles réglementaires. Les activités maximales des radio-isotopes artificiels provenant des activités du CERN sont en effet restées très nettement inférieures aux limites suisses et donc sans conséquence d'un point de vue radiologique.

Référence

- [1] Rapport No. 8 sur les mesures de la radioactivité dans le Nant d'Avril (Genève), Novembre 2006 - Novembre 2007; J.-L. Loizeau, V. Lopez et Ph. Arpagaus, Institut F-A. Forel, Université de Genève

Chapitre 8.7

"Point zéro du CERN"

Rapport de l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) en collaboration avec l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) concernant le "point zéro du CERN"
15.10.2007

Introduction

La surveillance de la radioactivité de l'environnement effectuée au voisinage du CERN dans le cadre du point zéro avant la mise en exploitation du grand collisionneur à hadrons LHC vise à établir un état initial de la situation radiologique dans les compartiments atmosphérique, terrestre et aquatique afin de répondre aux objectifs suivants :

- Assurer une connaissance précise des niveaux actuels de la radioactivité de l'environnement, aussi bien d'origine naturelle qu'artificielle, afin d'être à même de déceler très tôt un impact du fonctionnement des installations du LHC, le cas échéant, un processus de contamination.
- Vérifier que l'impact des rejets de substances radioactives et de l'irradiation externe ajoutée respecte la valeur directrice de dose liée à la source, soit 0.3 mSv/an (0.2 mSv/an pour les émissions et 0.1 mSv/an pour l'irradiation externe) et ne dépasse en aucun cas la limite de dose de 1 mSv/an applicable au public.
- Assurer une méthodologie et la mise en service de moyens de surveillance raisonnables permettant une maîtrise efficace des problèmes métrologiques en cas d'augmentation de la radioactivité.

Pour atteindre ces objectifs, 3 niveaux de démarche sont distingués:

- la mesure des concentrations et des niveaux d'irradiation
- l'interprétation des résultats de mesure l'information du public sur la situation.

Ce rapport présente les résultats de la surveillance initiale „point zéro“ effectuée dans les années 2005 et 2006. L'interprétation de ces résultats du point de vue de la radioprotection a été effectuée par un groupe de travail «point zéro du LHC» dans le souci d'une information accessible au public. Les données détaillées ainsi qu'une synthèse sur les notions de base pour l'aide à leur appréciation font l'objet du chapitre 7 en annexes de ce rapport. Pour les mesures de surveillance antérieures à celles du « point zéro », les rapports de l'OFSP [1] sont accessibles au public. « point zéro du CERN »

La mesure des concentrations et des niveaux d'irradiation

L'élaboration du programme de mesures tient compte des spécificités des installations et des expériences liées au LHC. Leur connaissance approfondie a motivé d'une part le choix des radioéléments susceptibles d'amener une contamination et d'autre part le choix d'indicateurs sensibles et significatifs, ainsi que des méthodes de mesure appropriées des nuclides directeurs. Cette démarche a pour but de replacer les informations recueillies lors des mesures dans un contexte global et d'en tirer ainsi toutes les conclusions utiles. Elle est essentielle, car elle seule permet:

- de mettre en relation des sources d'émissions, à travers le transfert dans la biosphère, à l'impact sur l'individu
 - d'effectuer des projections dans l'avenir
 - de choisir les indicateurs sensibles

La qualité de la surveillance est assurée par des programmes de contrôle de qualité qui sont appliqués au niveau des méthodes d'analyse. Il s'agit essentiellement des méthodes de mesure de la dose équivalente ambiante due aux rayonnements gamma, aux particules chargées pénétrantes comme les muons et aux neutrons et des concentrations dans les compartiments atmosphérique, aquatique et terrestre où la présence de radionucléides pourrait aussi conduire à une irradiation interne par inhalation ou, suite à leur transfert dans des produits de consommation, à une irradiation interne par ingestion.

Dose équivalente ambiante

Conformément à l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP), la dose équivalente ambiante H*(10), qui caractérise l'exposition externe du public, est exprimée en sievert ou dans un de ces multiples, le plus couramment en millisievert (1 mSv = 10^3 Sv). Le tableau 1 résume le domaine des contributions des composantes gamma et neutroniques à l'exposition externe mesurées sur le site même du CERN et dans son voisinage accessible au public. L'ensemble des mesures correspondantes est reporté dans l'annexe 71.

Tableau 1:
Exposition externe

Domaine des contributions à l'exposition externe	Sur le site CERN	Dans le voisinage
Composante gamma (mSv/an)	0.90 – 2.04	0.72 – 1.07
Composante neutronique (mSv/an)	0.05 – 0.42	0.05 – 0.08

On observe des valeurs plus élevées sur le site même du CERN où les 10 points de mesure ont été sélectionnés de

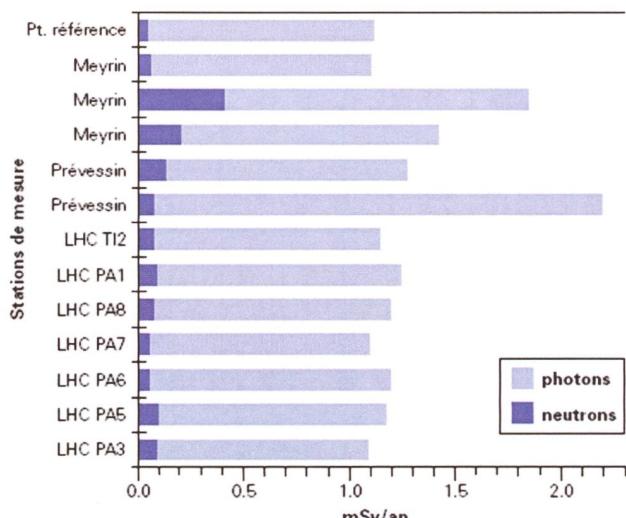


Figure 1:
Doses ambiantes mesurées pour les neutrons et les gammas à l'aide des dosimètres passifs installés par l'IRA Lausanne.

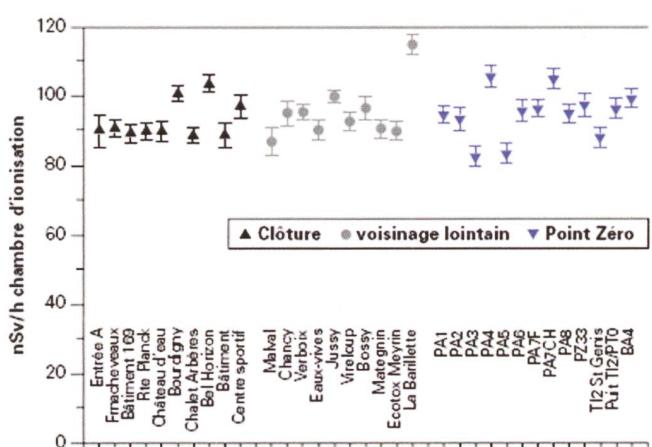
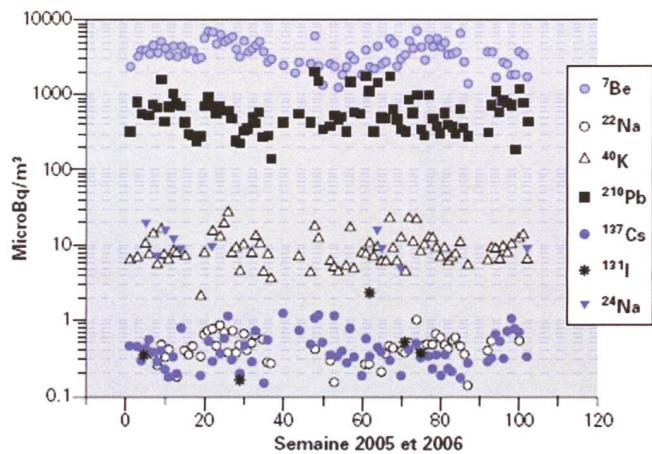


Figure 2:
Débits de dose ambiante instantanés mesurés à l'aide d'une chambre d'ionisation dans le voisinage immédiat (clôture) du CERN, dans le voisinage lointain et dans les emplacements additionnels spécifiques au programme Point zéro du LHC.

manière à rendre compte des impacts maximum des installations du Centre sur l'exposition externe. Les valeurs maximales de l'exposition ambiante annuelle enregistrées (2.04 mSv/an pour la composante gamma et 0.42 mSv/an pour la composante neutronique) témoignent en particulier de la remise en route de l'expérience COMPASS au 3^{ème} trimestre 2006 sur le site de Prévessin et de l'exploitation du synchrotron à protons (PS) sur le site de Meyrin respectivement. L'exposition individuelle est en réalité nettement inférieure à cette valeur si l'on tient compte du temps de séjour limité de personnes en ces endroits. La figure 1 expose les résultats des mesures de l'autorité

**Figure 3:**

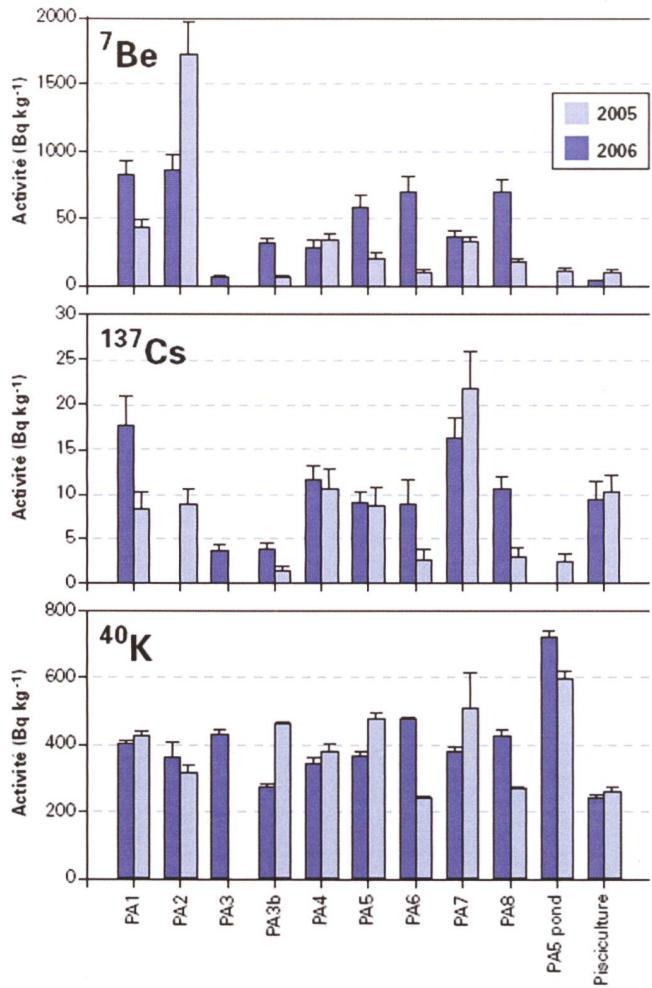
Concentrations radioactives mesurées dans l'air à l'aide du collecteur haut débit ($700 \text{ m}^3/\text{h}$) installé par l'OFSP sur le site de Meyrin.

de surveillance, effectuées par l'Institut de Radiophysique Appliquée (IRA) de l'Université de Lausanne, en comparaison de la station de référence. Il s'agit des doses ambiantes intégrées sur l'année couverte par le « point zéro ». Pour les mesures instantanées dans les 33 sites répartis dans le voisinage du CERN et donc accessibles au public, les valeurs sont conformes à celles attribuables au bruit de fond d'origine naturelle et à ses fluctuations comme le montre la figure 2.

Les valeurs du débit d'exposition ambiante sont comprises entre 80 et 110 nSv/h soit 0.7 à 1.0 mSv/an pour un séjour permanent. La valeur plus élevée pour le site de la Barilette s'explique par la contribution du rayonnement cosmique plus importante dans ce point de mesure situé à 1450 mètres d'altitude. Comme il n'y a pas eu de faisceaux de particules dans le LHC durant ces mesures, les fluctuations observées dans les sites du LHC sont d'origine naturelle et représentent pour les neutrons les incertitudes de mesure.

Milieu atmosphérique

Les mesures dans l'atmosphère sont réalisées en continu par l'intermédiaire d'une station du réseau RADAIR moniteur alpha-bêta avec compensation de l'activité naturelle qui constitue une veille compte tenu des limites de détection trop élevées (Bq/m^3) pour détecter des radionucléides présents en traces. Ce domaine des traces ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) est couvert par un collecteur à grand débit (HVS; high volume sampler) dont le filtre est évalué chaque semaine par spectrométrie gamma. Les résultats de cette surveillance concernant la période du point zéro sont représentés dans la figure 3. Les données exhaustives font l'objet de l'annexe 7.2.

**Figure 4 :**

Activités spécifiques mesurées dans les sédiments des futurs sites de rejets liquides du LHC à l'aide de trappes à sédiments installées par l'Institut Forel (^7Be et ^{40}K naturels et ^{137}Cs de Tchernobyl).

On distingue trois niveaux de concentrations :

- De l'ordre du mBq/m^3 pour le ^{210}Pb et le ^7Be , dont les concentrations traduisent les variations naturelles.
- De l'ordre d'une dizaine de $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour le ^{40}K d'origine naturelle et sporadiquement pour le ^{24}Na produit dans les accélérateurs de particules du CERN
- De 0.1 à environ 1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ pour le ^{22}Na dont les concentrations sont conformes au niveau naturel, pour le ^{137}Cs dont les concentrations témoignent de la remise en suspension des dépôts de Tchernobyl et pour les traces proches du seuil de détection de ^{131}I , détectées en 3 circonstances sur les 100 semaines examinées, provenant des installations du CERN.

Milieu aquatique

La surveillance du milieu aquatique se base sur des mesures par spectrométrie gamma d'échantillons de sédiments (trappes à sédiments) et de bryophytes provenant de 8 sites correspondant à des points de rejet de la future installation. Le rapport détaillé concernant ces mesures fait l'objet de l'annexe 7.3. La figure 4 en expose les résultats dans les sédiments. La valeur de ^{7}Be plus élevée au PA2 peut s'expliquer en raison d'un prélèvement différé de 2 mois par rapport aux autres stations. Il en résulte un apport par les précipitations plus important du ^{7}Be trophosphérique. Cette valeur est cependant dans l'ordre de la variabilité naturelle dont les concentrations observées dépendent fortement de la période de mesure, en particulier des pluies et de l'érosion précédant la collecte des sédiments. Cette interprétation est partiellement confirmée par les mesures du ^{137}Cs provenant de Tchernobyl dans ce site.

Milieu terrestre

Mesures directes sur site

La surveillance du milieu terrestre repose essentiellement sur des mesures de spectrométrie gamma in situ. Cette méthode offre l'avantage d'accéder directement sur le site aux concentrations moyennes des radionucléides présents dans le sol ou à sa superficie, suite au dépôt éventuel de radionucléides rejetés par voie atmosphérique. Ainsi la problématique de la représentativité de

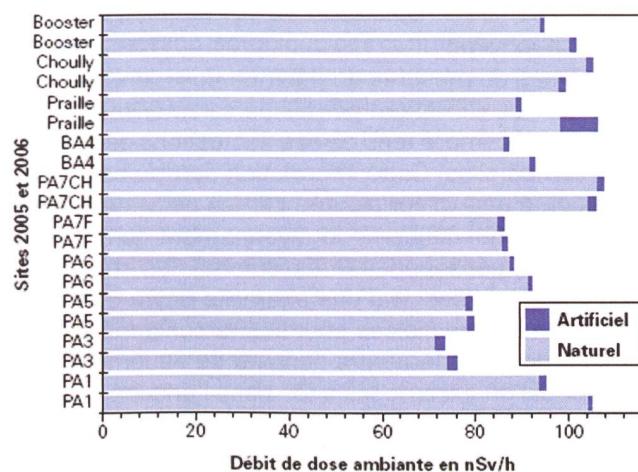


Figure 5 :

Contributions naturelles et artificielles au débit d'exposition ambiante déterminées par spectrométrie gamma in situ dans les sites terrestres du voisinage du CERN en 2005 et 2006

l'échantillonnage terrestre ne se pose pas et le site peut être protégé des modifications entraînées par des prélèvements réguliers, modifications qui constituent un biais additionnel dans l'interprétation des résultats. En outre la spectrométrie gamma in situ permet de distinguer la contribution individuelle à l'exposition externe du public pour les différents radionucléides identifiés. Le tableau 2 et la figure 5 rendent compte des principaux résultats de

spectrométrie gamma in situ du point de vue de l'exposition externe d'origine naturelle et artificielle.

Tableau 2 :

Exposition externe naturelle et artificielle calculée à partir des spectres in situ et mesurée globalement à l'aide d'une chambre d'ionisation.

Exposition externe	Contribution naturelle	Contribution artificielle	Exposition totale
10 sites	Spectrométrie in situ	Spectrométrie in situ	Chambre d'ionisation
Domaine (mSv/an)	0.65 – 0.91	0.01 – 0.02	0.72 – 0.92

La contribution artificielle provient exclusivement du ^{137}Cs rémanent des essais des armes nucléaires (Etats-Unis et URSS) passés et de l'accident de Tchernobyl, à l'exception d'un site limitrophe de l'enceinte du CERN où de l' ^{41}Ar a été mis en évidence lors de la campagne de mesures 2005. En admettant que la concentration mesurée dans l'air soit constante sur une année, l'exposition qui en résulterait pour un séjour permanent atteindrait 0.06 mSv. L'examen du taux de comptage du pic d'annihilation (511 keV, ^{11}C et ^{13}N) a indiqué pour ce site une valeur supérieure d'un facteur 6 à celle enregistrée en moyenne pour les autres. Cette information pourrait être exploitée comme indicateur d'impact des installations du CERN non identifiable par spectrométrie γ in situ. Une mesure effectuée dans l'enceinte du CERN avec un taux de comptage supérieur d'un facteur 3.5 semble confirmer la pertinence d'étudier cette information pour encore augmenter la capacité analytique de la méthode, même si en terme de débit de dose l'impact n'est guère perceptible.

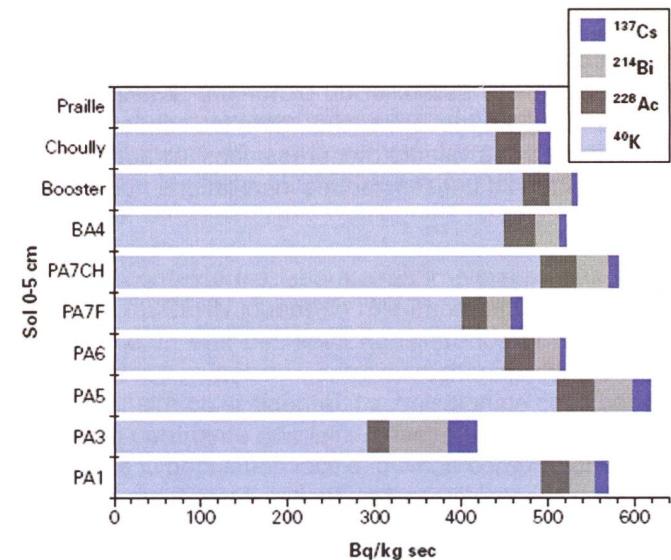


Figure 6 :

Concentrations des radionucléides émetteurs gamma présents dans la couche superficielle de sol 0-5cm

Les données détaillées des laboratoires impliqués sont présentées dans l'annexe 7.4. La qualité des résultats est attestée par la comparaison entre les débits d'exposition ambiante calculés à partir des spectres in situ et ceux mesurés simultanément à l'aide d'une chambre d'ionisation qui indique une bonne cohérence (écart < +/- 20 %).

Mesures différencées en laboratoire

Les analyses en laboratoire effectuées dans le cadre du point zéro essentiellement sur des échantillons d'herbe et de sol figurent en détail dans l'annexe 7.5. Dans les échantillons d'herbe, les concentrations de ^{7}Be (100 à 910 Bq/kg) et de ^{40}K (220 à 1080 Bq/kg) rendent compte de la variabilité naturelle alors que les concentrations de ^{14}C (240 +/- 3 Bq/kg C) et de ^{3}H lié (3.4 +/- 1.8 Bq/kg de matière organique et 2.8 +/- 1.4 Bq/kg de matière sèche) témoignent à la fois de la composante naturelle cosmogénique et de la part rémanente des essais nucléaires atmosphériques russes et américains des années 60. Des traces de ^{137}Cs et de ^{90}Sr (8.8 +/- 0.3 Bq/kg de matière sèche), provenant de la même source et en partie de Tchernobyl, sont également détectables.

Dans les échantillons de sol, les profils 0-5 cm et 5-10 cm montrent une distribution homogène des radionucléides dans ces couches de sol. La figure 6 en résume les concentrations dans la couche supérieure.

Le ^{40}K présente les concentrations les plus élevées (quelques centaines de Bq/kg), suivi de l' ^{228}Ac de la série du thorium-232 et du bismuth-214 de la série de l'uranium-238 (quelques dizaines de Bq/kg). Outre ces radionucléides primordiaux d'origine naturelle, le césium-137 (quelques Bq à quelques dizaines de Bq/kg) témoigne des contaminations rémanentes de Tchernobyl et des essais nucléaires atmosphériques russes et américains des années 60. La rémanence des retombées des essais nucléaires passés est confirmée au niveau du strontium-90 (4.0 +/- 0.3 Bq/kg de matière sèche) et du plutonium- 239/240 (0.44 +/- 0.02 Bq/kg de matière sèche), dont les concentrations sont typiques des valeurs mesurées dans les autres sites de plaine, non influencés par des installations nucléaires.

Interprétation des résultats

La grandeur fondamentale permettant d'apprécier le risque que représente la radioactivité pour la population est la dose individuelle accumulée. Pour les personnes vivant dans le voisinage d'une installation nucléaire, il s'agit en outre de distinguer la dose artificiellement ajoutée par l'exploitation de l'installation en question par rapport à la dose due au bruit de fond d'origine naturelle et dû à des contaminations passées (essais des armes nucléaires, Tchernobyl). Les mesures directes de la dose ne permettent pas en général de faire cette distinction spécifique, car l'impact des immissions dans l'environnement sur la dose est trop faible par rapport à ce bruit de fond et à ses fluctuations et que souvent seule la modélisation permet de caractériser les voies d'exposition. C'est pourquoi il convient de suivre des éléments directeurs témoignant de l'impact de l'installation dans les compartiments environnementaux. Comme on ne peut raisonnablement pas tout contrôler il convient de sélectionner des bioindicateurs radioécologiques qui ont la capacité de fixer préférentiellement les substances radioactives rejetées. La mise en évidence de ces traces s'exprime par une concentration qui n'est pas directement liée à une dose mesurable. Outre le contrôle du respect de la réglementation quant à l'impact des rejets, le suivi de l'évolution de ces traces permet d'éviter qu'un processus de contamination ou qu'un phénomène d'accumulation à long terme ne passe inaperçu dans la biosphère.

Exposition externe

Les systèmes de mesures du débit de dose ambiante répartis autour du CERN ont permis de caractériser le bruit de fond actuel compte tenu de ses fluctuations géographiques et temporelles. Cette information sert de base pour la détection d'une valeur ajoutée par les activités futures du LHC en ce qui concerne le rayonnement gamma, les particules chargées pénétrantes comme les muons et les neutrons. Le constat d'une anomalie devra être clarifié par des mesures ciblées pour le site concerné afin de déterminer le rayonnement à l'origine de l'augmentation observée. Si l'on excepte les sites dans l'enceinte même du CERN, les valeurs enregistrées dans le cadre du point zéro sont représentatives de la radioactivité naturelle et sont parfaitement cohérentes avec celles observées dans des sites hors de l'influence du CERN.

Milieu atmosphérique

Les mesures hebdomadaires des filtres du collecteur à grand débit (HVS) ont confirmé la prédominance des radionucléides d'origine naturelle, le beryllium-7 (^{7}Be), le plomb-210 (^{210}Pb) et le sodium-22 (^{22}Na). Grâce à l'excelente sensibilité du système, de faibles traces d'origine artificielle ont été mises en évidence sporadiquement. Il s'agit d'une part du césium-137 (^{137}Cs) de Tchernobyl suite à sa remise en suspension dans l'air et d'autre part du iode-131 (^{131}I) et du sodium-24 (^{24}Na) produits par tous les accélérateurs.

Milieu aquatique

L'analyse des sédiments recueillis dans les trappes à sédiments placées dans des cours d'eau susceptibles de véhiculer des radionucléides issus des rejets liquides des installations du CERN ainsi que dans les bryophytes ont indiqué la présence des radionucléides d'origine naturelle, le potassium-40 (^{40}K) et le beryllium-7 (^7Be). Un apport de ^7Be par les rejets du CERN est d'autant plus difficile à mettre en évidence que les concentrations naturelles de ce nucléide montrent une grande variabilité. Du point de vue des radionucléides artificiels, des traces de césum-137 provenant de la retombée des essais nucléaires passés des Etats Unis et l'Union Soviétique et de l'accident de Tchernobyl ont été détectées uniquement dans certains sédiments qui constituent un excellent intégrateur de pollution. Aucun impact des activités du CERN n'a été mis en évidence dans le cadre du point zéro, si l'on excepte des traces de ^{65}Zn et de ^{22}Na détectées dans le Nant d'Avril dans le cadre d'une étude radioécologique de l'OFSP [2].

Milieu terrestre

Les résultats dans le milieu terrestre mènent aux constats suivants:

- sur la base des mesures de débit de dose ambiante effectuées à l'aide d'une chambre d'ionisation, aucune contribution des activités du CERN n'a pu être mise en évidence. L'impact éventuel du CERN se situe par conséquent dans le domaine des fluctuations naturelles du point de vue de l'exposition externe.
- l'identification isotopique des contributions individuelles à l'exposition externe par spectrométrie gamma in situ [3] montre que les radionucléides naturels primordiaux de la croûte terrestre constituent l'essentiel du rayonnement. Des traces de beryllium-7 d'origine cosmique ainsi que de césum-137 rémanent des essais des armes nucléaires russes et américains et de Tchernobyl sont détectables dans tous les sites.
- seul l'argon-41 mis en évidence au sud-est de l'enceinte du CERN témoigne de l'activité de l'ISOLDE. Ce nucléide fait partie des isotopes de période radioactive $T_{1/2} < 2$ heures (^{11}C , ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O) rejetés dans l'air conformément au bilan des émissions du CERN.
- une réflexion a été engagée pour tirer profit de l'information donnée par l'aire du pic d'annihilation (511 keV) qui pourrait être un bon indicateur pour d'autres radionucléides de période courte : $^{1\text{C}}$, ^{13}N , ^{14}O , ^{15}O .

Concernant la voie d'exposition interne par consommation d'aliments et de boissons, les mesures disponibles ne signalent pas d'impact du CERN. Il s'agit d'analyses gamma, de tritium lié et de carbone-14 dans les végétaux et autres produits agricoles. On dispose également des teneurs en strontium-90 et en plutonium-239/240 dans les sols qui témoigne de la retombée des essais nucléaires atmosphériques russes et américains effectués dans les années 60.

Les concentrations observées pour les radionucléides provenant du CERN sont nettement en-dessous des limites réglementaires dans tous les compartiments environnementaux examinés.

Information du public

Parmi les craintes de la population vis-à-vis des facteurs environnementaux, celles qu'engendrent les radiations ionisantes font partie des plus fortes. Les références comme Hiroshima- Nagasaki et Tchernobyl font à juste titre que les événements liés à la radioactivité sont porteurs d'inquiétudes auprès du public, en particulier concernant le risque de cancer et de malformations génétiques radio-induites. Afin de limiter ce risque la Commission internationale de Protection radiologique (CIPR) propose un système de radioprotection basé sur les 3 principes de justification, d'optimisation et de limitation des expositions, qui sert de support aux autorités réglementaires pour assurer une protection radiologique pertinente dans les différents domaines d'application des radiations ionisantes. Comme les effets sur la santé sont liés à la dose, il importe de pouvoir s'appuyer sur la possibilité de mesurer les doses d'irradiation grâce à divers appareils de détection très sensibles (chambre d'ionisation, dosimètre thermoluminescent, détecteur semi-conducteur, détecteur à scintillation...). Contrairement aux personnes exposées aux radiations ionisantes dans le cadre de leur profession, ainsi qu'aux patients qui font l'objet d'une surveillance dosimétrique suivie pour des pratiques bien précises, l'individu de la population ne peut bénéficier directement de la même information concernant les expositions environnementales très variables auxquelles il est en permanence soumis tout au long de sa vie. C'est pourquoi il importe de disposer d'outils qui permettent une caractérisation rapide et fiable de l'environnement du point de vue de sa radioactivité et des doses qui en résultent pour le public. Cet outil doit également permettre une distinction entre les contributions de la radioactivité permanente d'origine naturelle et la valeur ajoutée des composantes d'origine artificielle.

Dans ce contexte les laboratoires impliqués dans la surveillance du CERN jouent un rôle important pour la détermination d'un état des lieux de référence et du suivi de l'impact des activités du Centre de recherche dans le cadre réglementaire ou accidentel. L'acquisition de ces données pour être pertinente doit faire l'objet d'une information régulière de la population locale, qui soit compréhensible et transparente. C'est l'objectif visé par le présent rapport.

Conclusions

Les moyens mis en oeuvre par les autorités de surveillance françaises et suisses pour établir « le point zéro du LHC » ont permis de dresser un bilan de la radioactivité dans le voisinage du CERN avant la mise en route du nouvel accélérateur. Ce bilan concerne les niveaux d'exposition ambiante (gammas, particules chargées pénétrantes et neutrons) et les concentrations des radionucléides présents dans les milieux atmosphérique, aquatique et terrestre au cours des années 2005 et 2006. Les méthodes utilisées ont montré leur capacité à recenser de manière fiable le bruit de fond d'origine naturelle (radionucléides primordiaux et cosmiques), les contributions rémanentes d'origine artificielle (essais des armes nucléaires russes et américains des années 60 et retombée de Tchernobyl), ainsi que des traces attribuables à l'exploitation de certaines installations du CERN pendant leur fonctionnement. Ces traces ont pu être mises en évidence grâce à des méthodes de prélèvements et de mesures extrêmement sensibles. Il s'agit en particulier des dosimètres passifs permettant de détecter les rayonnements gamma et les neutrons, du collecteur d'aérosols de haut débit, des trappes à sédiments et des systèmes de spectrométrie gamma *in situ*. Les résultats montrent que l'impact de ces traces se situe nettement en dessous des limites d'missions réglementaires. La poursuite de ces mesures est recommandée pour vérifier que l'impact radiologique en termes de dose sur la population et l'environnement ne s'écarte pas de manière significative de ces niveaux de référence en phase d'exploitation du LHC.

La campagne de mesures « Point zéro » a également confirmé une absence, après 53 années de fonctionnement des installations du CERN, d'une accumulation des radionucléides de période longue dans les différents compartiments de l'environnement.

Bibliographie

[1] Rapports annuels de l'OFSP en ligne depuis l'an 2000 „Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse” <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00043/00065/02239/index.html?lang=fr>

Chapitre 8: Surveillance des installations nucléaires
 8.5 « Rejets et environnement du CERN » (mesures de l'exploitant)
 8.6 « Environnement du CERN » (mesures de l'autorité de surveillance)

[2] RAPPORT No 7 SUR LES MESURES DE LA RADIOACTIVITE DANS LE NANT D'AVRIL (GENEVE), Institut F.-A. Forel, Université de Genève Novembre 2005 – Octobre 2006

[3] M. Lemercier*, R. Gurriaran, P. Bouisset, X. Cagnat, IRSN « Specific activity to H*(10) conversion factors for *in situ* gamma spectrometry », Radiation Protection Dosimetry (2004)

[4] L. Pourcelot, P. Steinmann, P. Froidevaux, „Lower variability of radionuclide activities in upland dairy products compared to soils and vegetation: implication for environmental survey”, Chemosphere

Autres liens utiles indexés dans le texte:

CERN: www.cern.ch

LHC:

<http://public.web.cern.ch/public/Content/Chapters/About-CERN/CERNFuture/WhatLHC/WhatLHC-fr.html>

ORAP :

<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/02883/02884/index.html?lang=fr>

RADAIR:

<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00045/02372/02374/index.html?lang=fr>

HVS :

<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00045/02372/02378/index.html?lang=fr>

CIPR: <http://www.icrp.org/>

Annexes

- 7.1. Résultats des mesures de doses
 - 7.2. Résultats des mesures dans le milieu atmosphérique
 - 7.3. Résultats des mesures dans le milieu aquatique
 - 7.4. Résultats des mesures directes dans le milieu terrestre
 - 7.5. Résultats des mesures différées dans le milieu terrestre
 - 7.6. Synthèse des notions de base
- Les annexes sont publiées séparément sur les sites web de l'OFSP et de l'IRSN.