

Tchernobyl, 17 ans après

avril 2003

DOSSIER D'INFORMATION

SOMMAIRE

RESUME

Le devenir du site de Tchernobyl après l'arrêt de la centrale page 1

Les conséquences de l'accident dans les pays les plus exposés..... page 3

Les conséquences sanitaires page 3
La contamination des sols page 7

Les conséquences des retombées de l'accident de Tchernobyl en France..... page 7

La caractérisation radioécologique des retombées de l'accident page 7

Les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France page 11

CHAPITRE 1 – LA CENTRALE DE TCHERNOBYL page 13

1 - Contexte et enjeux de l'arrêt de la centrale de Tchernobyl page 13

Rappels sur l'histoire de la centrale page 13

2 -Travaux accompagnant la mise à l'arrêt de la centrale page 14

2.1 Nouvelle installation d'entreposage de combustibles irradiés page 14
2.2 Installation de traitement des effluents liquides page 15
2.3 Installation de traitement des déchets solides page 16

3 - Le devenir du « sarcophage » page 17

3.1 Le bâtiment « sarcophage » page 17
3.2 Les conséquences de l'effondrement du sarcophage page 19
3.3 Le renforcement du sarcophage central page 20
3.4 Le nouveau sarcophage page 21

4 - Le rôle de l'IRSN et les aspects financiers page 22

4.1 Support de Riskaudit, filiale de l'IRSN et de GRS page 22
4.2 Les aspects financiers page 23

CHAPITRE 2- LES CONSEQUENCES SANITAIRES DE L'ACCIDENT DANS LES PAYS LES PLUS EXPOSES page 25

1. La mortalité après l'accident de Tchernobyl page 27

1.1 La prédiction des risques de décès par cancer page 27

2 - Evaluation des doses reçues à la suite de l'accident de Tchernobyl page 28

2.1 Les travailleurs du site et les liquidateurs page 29
2.2 Les populations des régions contaminées page 29

3 - Effets sanitaires observés sur les populations des territoires les plus contaminés..... page 32

3.1 Cancers solides de la thyroïde page 32
3.2 Leucémies page 35
3.3 Les affections thyroïdiennes autres que les cancers page 37

3.4 Les malformations congénitales	page 37
3.5 Autres problèmes de santé	page 38
4. Conséquences sur la population des « liquidateurs »	page 38
4.1 « Liquidateurs » estoniens	page 38
4.2 « liquidateurs » russes et ukrainiens	page 39
5. Conséquences sur les populations du reste de l'Europe	page 40
5.1 Leucémies et cancers chez l'enfant	page 40
5.2 Anomalies congénitales	page 42
6. Actions de l'IRSN autour de Tchernobyl	page 43
Les cancers de la thyroïde	page 44
Intérêt de l'épidémiologie post-Tchernobyl	page 45
Le programme CORE	page 46
Le programme « ENVIRHOM » : Effets sur les populations des expositions chroniques aux rayonnements ionisants	page 47
CHAPITRE 3 – L'ENVIRONNEMENT DE TCHERNOBYL ET LA GESTION DES TERRITOIRES CONTAMINÉS	page 48
1. Contamination de l'environnement et gestion des populations	page 49
1.1 Inventaire de la radioactivité présente	page 49
1.2 Travaux de décontamination et sites de stockage dans la zone d'exclusion	page 51
1.3 Organisation administrative des zones contaminées	page 52
1.4 Contamination des produits agricoles en Ukraine	page 53
1.5 Les populations	page 55
2. Actions de l'IRSN en radioécologie : le « Site Pilote de Tchernobyl »	page 56
CHAPITRE 4 – L'IMPACT EN FRANCE DES RETOMBÉES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL	page 58
1. Passage des masses d'air contaminées et dépôts	page 59
1.1. La contamination de l'air en mai 1986	page 59
1.2 Les dépôts de ¹³⁷ Cs	page 60
1.3 Evolution de la cartographie des dépôts depuis 1986	page 62
1.4 Radioactivité des sols de montagne	page 64
2. Atteinte de la chaîne alimentaire	page 64
2.1 Niveaux moyens d'activités dans l'ensemble du pays	page 64
2.2 Cas des zones les plus marquées par les retombées : l'exemple de la Corse	page 66
2.3 Cas des bassins versants de montagne	page 66
3. Conséquences dosimétriques	page 67
3.1 Doses moyennes dues à l'ingestion de denrées contaminées	page 67
3.2 Doses à la thyroïde	page 68
3.3 Les doses d'aujourd'hui	page 69

4. Estimation du risque	page 70
4.1 L'augmentation des cancers de la thyroïde en France	page 70
4.2 Les facteurs de risque du cancer de la thyroïde	page 70
4.3 L'évaluation du risque causé par les retombées de l'accident de Tchernobyl en France	page 71
Les retombées radioactives en France des essais d'armes nucléaires	page 73
Evaluation du risque de cancer de la thyroïde en France	page 74
Présentation de l'étude sur l'incidence des cancers de la thyroïde en Franche Comté	page 75
Le groupe de réflexion de l'IRSN	page 76
Le groupe du Professeur Aurengo	page 77
ANNEXE 1 - Tchernobyl en quelques chiffres	page 87
ANNEXE 2 – Coopération internationale pour Tchernobyl : l'initiative Franco-Allemande	page 90
ANNEXE 3 – Les Réacteurs RBMK	page 97
LEXIQUE	page 100

Résumé

Ce rapport fait état des connaissances acquises sur les conséquences de l'accident de Tchernobyl, 17 ans après. Ce rapport est construit autour de quatre thèmes liés aux conséquences de l'accident en Biélorussie, en Ukraine et en Russie, ainsi qu'aux résultats des études de l'IRSN visant à mieux cerner les conséquences de cet accident en France. Ces quatre thèmes répondent aux questions suivantes :

- Quel est le devenir du site de Tchernobyl, en particulier du réacteur accidenté et du « sarcophage » qui assure son confinement ?
- Que sait-on des conséquences sanitaires de l'accident sur les personnes qui sont intervenues à proximité du réacteur accidenté (les « liquidateurs ») ainsi que sur la population dans les pays qui ont été les plus exposés aux retombées radioactives de l'accident ?
- Quel est l'état des territoires contaminés autour de la centrale et comment ceux-ci sont-ils gérés aujourd'hui ?
- S'agissant particulièrement de la France, que sait-on aujourd'hui de la contamination des sols et des conséquences de l'accident ?

LE DEVENIR DU SITE DE TCHERNOBYL APRES L'ARRET DE LA CENTRALE

Bien qu'il n'y ait plus de réacteur en activité, il subsiste d'importantes quantités de matières radioactives sur le site de Tchernobyl, constituées par le combustible nucléaire des réacteurs arrêtés, le combustible fondu du réacteur accidenté (réacteur n°4) et de divers déchets radioactifs. Le traitement et le stockage de ces matières nécessitent une gestion rigoureuse selon un scénario complexe qui s'étalera sur de très nombreuses années. Deux programmes distincts ont été définis : le premier a pour objectif **le démantèlement de la centrale** et en particulier l'évacuation des combustibles et l'assainissement des installations ; le second a pour objectif **la construction d'un nouveau sarcophage** visant à assurer la sûreté même en cas de dégradation importante du sarcophage actuel.

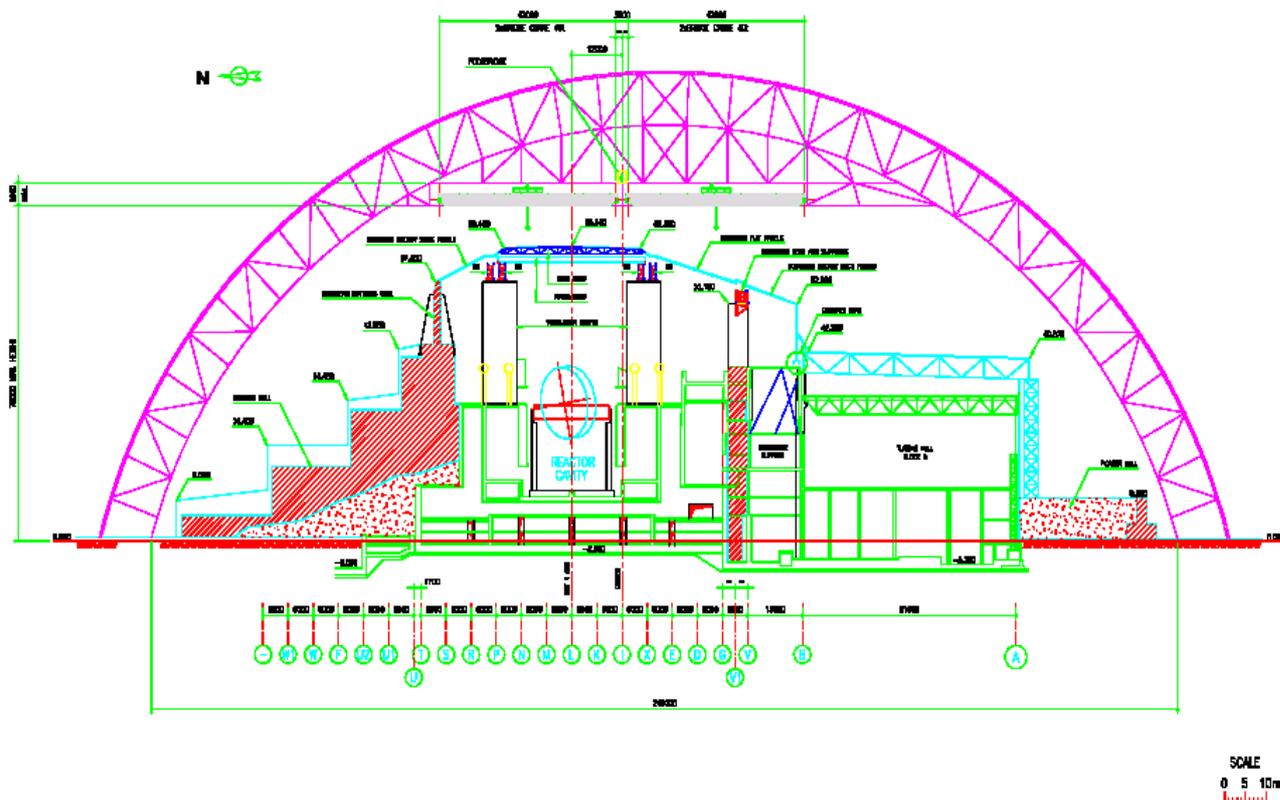
Le programme de démantèlement a été défini et sera mis en œuvre grâce notamment au soutien financier de la communauté internationale, à travers la Banque Européenne pour la Reconstruction et le Développement (BERD) et le programme TACIS financé par la Commission Européenne. Dans une première phase, la réalisation de plusieurs installations est prévue dans le cadre du programme de démantèlement :

- une installation d'entreposage de combustibles irradiés provenant des trois réacteurs arrêtés est en cours de construction. Il s'agit d'un entreposage « à sec » qui sera composé de deux bâtiments pouvant accueillir 2500 assemblages combustibles par an sur une période de dix ans. La construction de cette installation, financée par la BERD, a débuté et son autorisation d'exploitation devrait être délivrée début 2004. Le coût total du projet est estimé à environ 80 millions d'euros ;
- une installation de traitement des effluents liquides de faible et moyenne activité est également en cours de construction. Actuellement, 26 000 m³ d'effluents radioactifs liquides sont stockés sur le site, pour une capacité totale de 34 000 m³. Un atelier de traitement de ces effluents est en construction à proximité du réacteur accidenté et l'autorisation d'exploitation correspondante devrait être accordée à la fin de 2003. Le financement de cette installation, de l'ordre de 25 millions d'euros, est assuré par la BERD ;
- une installation de traitement des déchets solides de faible et moyenne activité est en projet. Actuellement, les déchets provenant du fonctionnement des quatre réacteurs (métal, béton, plastique, bois, papier...) sont entreposés dans un bâtiment vétuste. Ces déchets seront récupérés et traités dans une nouvelle installation dont la construction reste à entreprendre. Ce traitement consistera à séparer les déchets selon leur activité, à conditionner les déchets les plus actifs dans des conteneurs étanches pour un entreposage temporaire sur le site, et à mettre en colis les déchets moins actifs en vue d'un stockage définitif en surface à proximité du site.

Le « **sarcophage** » construit en 1986 dans des conditions difficiles pour abriter les restes du réacteur accidenté présente un risque d'effondrement certes faible mais qui aurait pour conséquence une émission de poussières radioactives dans l'environnement proche, entraînant une exposition du personnel présent sur le site. Afin de renforcer durablement la tenue du sarcophage, le projet SIP (*Shelter Implementation Plan*) a été lancé en 1998 pour une durée de 8 ans par un groupe de travail d'experts en sûreté nucléaire du G7 et par le gouvernement ukrainien. Ce projet, d'un montant d'environ 760 millions de dollars, financé par la BERD (de l'ordre de 710 millions) et par le gouvernement ukrainien (50 millions) prévoit la construction d'un nouveau sarcophage (*New Safe Confinement* – NSC) dont le concept a été choisi en 2001. Le nouveau sarcophage sera constitué d'une double enveloppe métallique formée de quatre segments en forme d'arche de 37,5 m de long, de 245 m de portée intérieure et de 100 m de hauteur extérieure. Sa durée de vie est estimée à 100 ans. Ce projet prévoit également, à l'intérieur de ce nouveau sarcophage, le démantèlement des structures instables du sarcophage actuel comme des éléments de toiture et certaines poutres de portage ainsi que le conditionnement de déchets radioactifs. Il est prévu que les travaux se terminent en 2007.

A ce jour, 1,4 milliard de dollars a été investi par les pays occidentaux et les organismes internationaux dans les projets relevant du protocole d'accord signé le 20 décembre 1995 entre les pays du G7, la Commission européenne et l'Ukraine, les trois quarts correspondant à des dons, issus pour près de 60 % des pays de l'Union Européenne et de la Commission Européenne. La majeure partie de ces dons, plus de 910 millions de dollars, a été consacrée au financement de modifications

techniques du réacteur numéro 3 arrêté le 15 décembre 2000, des installations entrant dans le cadre du démantèlement de la centrale et du projet d'amélioration de la sûreté du « sarcophage ».



Coupe du projet de nouveau sarcophage

L'IRSN, en liaison étroite avec son homologue allemand la GRS (Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit), participe activement à l'aide fournie par les pays occidentaux, d'une part en apportant un appui technique à l'autorité de sûreté ukrainienne pour les opérations menées sur le « sarcophage » et dans le cadre du démantèlement, d'autre part en soutenant une coopération scientifique avec l'Ukraine, la Biélorussie et la Russie, dans le cadre de l'Initiative Franco-Allemande (IFA).

LES CONSEQUENCES DE L'ACCIDENT DANS LES PAYS LES PLUS EXPOSES

Les conséquences sanitaires

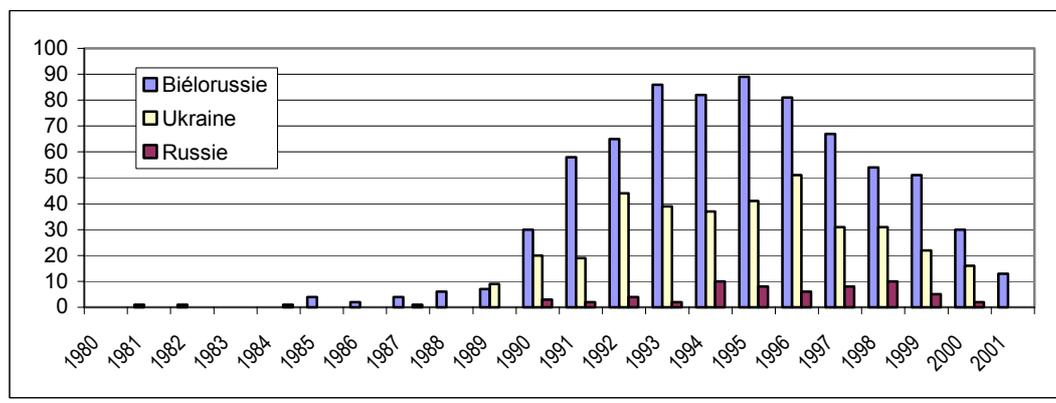
En dehors des brûlures et irradiations aiguës provoquées par l'accident sur les personnes présentes sur le site au moment de l'accident, les conséquences sur la santé des populations susceptibles de résulter de l'accident sont principalement des cancers pouvant survenir plusieurs années après l'exposition et non spécifiques d'une exposition à des substances radioactives. D'autres pathologies sont évoquées qui, jusqu'à présent, n'étaient pas considérées comme associées aux expositions aux

rayonnements ionisants. Leur observation sur des bases scientifiques est actuellement l'objet de débat. La mise en évidence de telles conséquences par des études épidémiologiques nécessite de mettre en place un dispositif performant de surveillance des différentes pathologies pendant de nombreuses années, au sein des populations exposées, ainsi qu'un contrôle de la migration de ces populations et des conditions de dépistage des maladies. Ce qui a conduit l'IRSN à s'engager dans des programmes expérimentaux sur les expositions chroniques et de s'associer à des programmes de suivi clinique de l'état sanitaire des populations concernées (CORE). La comparaison de l'incidence des pathologies entre les régions fortement exposées et les autres doit toujours être interprétée avec prudence.

De façon générale, il est impossible de déterminer, par des observations directes, le **nombre de décès par cancer** provoqués par l'accident au sein de la population, cancers en excès par rapport au nombre de cancers spontanés dans la population. Des prédictions ont été réalisées dans le cadre de plusieurs études, et donnent des résultats théoriques dispersés et empreints de fortes incertitudes : les valeurs se situent entre quelques milliers et quelques dizaines de milliers de décès sur l'ensemble des personnes prises en compte dans ces études. Un tel niveau de risque est pratiquement indétectable par des études épidémiologiques ou par des statistiques officielles, compte tenu des autres facteurs de risque de cancer et du nombre important de décès par cancer survenant dans la population générale indépendamment de l'exposition aux retombées de l'accident de Tchernobyl.

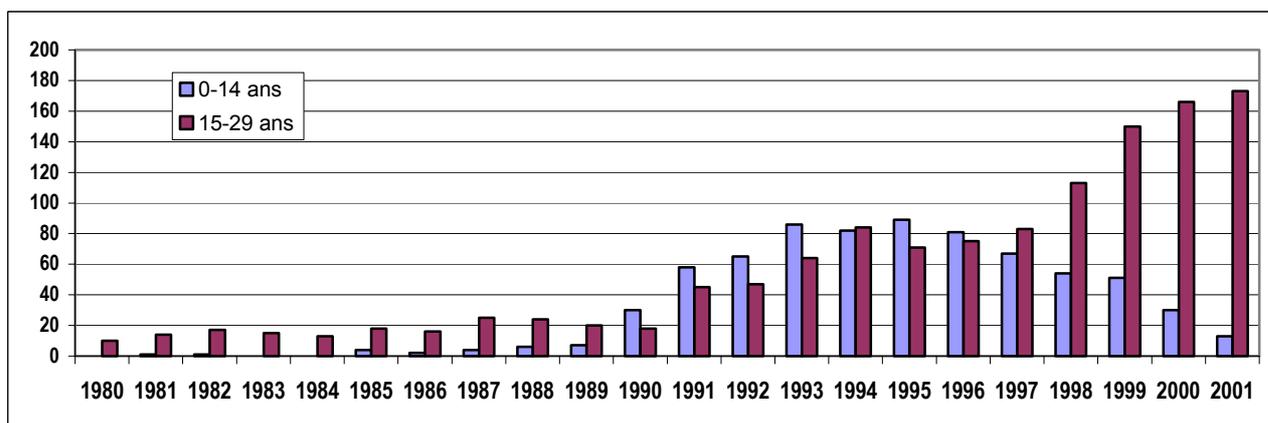
En revanche, des conséquences sanitaires attribuables à l'accident de Tchernobyl doivent être recherchées parmi les populations spécifiques ayant reçu des doses plus élevées que l'ensemble de la population générale : les **travailleurs du site et les personnels d'intervention** ont reçu des doses comprises entre quelques centaines de mGy (milligray) et plus de 10 Gy (gray) ; environ 600 000 « **liquidateurs** » ont reçu des doses par exposition externe importantes, pas toujours bien connues mais estimées en moyenne à 100 mGy. Des études épidémiologiques auxquelles l'IRSN participe sont conduites actuellement au niveau international par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et le National Cancer Institut (NCI) des Etats-Unis, pour déterminer le risque de leucémies ou de cancers de la thyroïde pour ces populations de liquidateurs.

Les populations qui vivaient dans les régions contaminées ont reçu des doses provoquées par l'irradiation externe à partir des dépôts radioactifs au sol (estimées en moyenne à 20 mGy et pouvant atteindre près de 400 mGy) et par la contamination interne résultant de l'ingestion d'aliments contaminés. En particulier, l'ingestion d'iode 131 dans les semaines ayant suivi l'accident a induit des doses élevées à la thyroïde ; ainsi, les enfants de Biélorussie qui vivaient dans les zones les plus contaminées ont reçu une dose moyenne à la thyroïde allant de 0,5 à 1,3 Gy. Une augmentation très importante de cancers de la thyroïde chez les enfants a été observée. Sur la période 1990-1998, en Biélorussie, en Russie et dans les régions les plus contaminées d'Ukraine, 1800 cas ont été dénombrés chez les personnes qui avaient moins de 18 ans en 1986. Les données de 1999 à 2001 obtenues par l'IRSN dans le cadre d'une collaboration avec la Biélorussie confirment la poursuite de l'augmentation du nombre de cancers de la thyroïde chez les enfants au moment de l'accident, notamment chez ceux exposés avant l'âge de 5 ans. L'histogramme suivant indique l'évolution de la survenue de cancers de la thyroïde chez les enfants de moins de 15 ans pendant la période 1986-2001 pour l'Ukraine et la Biélorussie. Les données russes concernent une population moins nombreuse et correspondent donc à un nombre de cancers plus faible.



**Nombre de cancers de la thyroïde sur la période 1980-2001
chez les personnes âgées de moins de 15 ans**

Il faut aussi s'intéresser aux jeunes adultes, car ceux qui sont nés avant 1986, ont tous atteint la tranche d'âge de 15 à 30 ans. L'histogramme suivant indique les évolutions comparées des survenues de cancers de la thyroïde dans les tranches d'âge 0 à 14 ans et 15 à 29 ans en Biélorussie.



*nombre de nouveaux cas de cancers de la thyroïde chez les enfants (0-14 ans)
et chez les adolescents et jeunes adultes (15-29 ans) en Biélorussie,
données du Registre National des Cancers de Biélorussie*

Les résultats des années 2000 et 2001 doivent être considérés comme préliminaires car il faut plusieurs années aux enquêteurs du registre pour s'assurer de la qualité des données transmises.

Les évolutions observées appellent les commentaires suivants :

- Dans les deux classes d'âge considérées, les observations effectuées de 1979 à 1989 font office de valeurs de référence pour le nombre de cancers spontanés de la thyroïde observés en Biélorussie, en admettant un temps de latence minimum de 3 ans pour l'apparition d'un cancer de la thyroïde dû à l'exposition aux rayonnements ionisants. Pendant cette période, les conditions de dépistage peuvent être considérées comme comparables.
- Dans la classe d'âge de 0 à 14 ans, une augmentation importante du nombre de cas est constatée à partir de 1990 et suivie d'une diminution lente à partir de 1995. Cette diminution peut s'expliquer par le fait que d'une année à l'autre, il existe dans cette classe d'âge de moins en moins d'enfants ayant été exposés en 1986. Tous les enfants âgés de moins de 14 ans en 2001 sont nés au plus tôt en 1987 et n'ont pas pu être exposés à l'iode 131 émis lors de l'accident de Tchernobyl.
- Dans la classe d'âge de 15 à 29 ans, on observe une augmentation du nombre de cas de cancers de la thyroïde à partir de 1991, ce qui correspond aux personnes qui avaient entre 10 et 24 ans en 1986. Cette augmentation se poursuit, voire s'accroît au cours des années les plus récentes. L'évolution observée tend à confirmer que l'épidémie de cancers de la thyroïde des enfants exposés se poursuit chez les adolescents et les jeunes adultes. L'influence d'un dépistage plus systématique durant ces dernières années est actuellement à l'étude. Il pourrait expliquer une partie plus ou moins grande de l'excès observé.

Depuis plusieurs années, les efforts de l'IRSN visent à soutenir les registres de cancer de la thyroïde en Biélorussie, en Ukraine et dans les oblasts les plus contaminés de Russie. Une publication commune avec des chercheurs russes décrit la fréquence des cancers de la thyroïde pour la population de la région de Briansk, la plus contaminée de Russie. Les résultats indiquent une faible augmentation, comparativement à la population nationale, de l'incidence des cancers de la thyroïde chez les populations exposées à l'âge adulte, mais cette augmentation n'est pas liée à une augmentation de la dose à la thyroïde. Les résultats des études sur les liquidateurs, actuellement en cours, devraient apporter des éléments supplémentaires sur l'estimation du risque après exposition à l'âge adulte.

Dans ces mêmes pays, les taux d'incidence des leucémies chez l'enfant ont été comparés entre régions fortement et faiblement contaminées. Ces études descriptives n'ont pas mis en évidence d'excès de leucémie dans les régions les plus contaminées. Cependant, en 2001 une étude a conclu à un excès d'incidence des leucémies chez l'enfant exposé in utero dans les régions les plus contaminées d'Ukraine. En outre, en 2002, une étude cas-témoins, également menée en Ukraine, dans deux oblasts fortement contaminés, suggère une association entre la survenue de leucémies et le niveau d'exposition chez les enfants de moins de 20 ans au moment de l'accident.

Parallèlement aux études, sur le risque de leucémies chez le jeune enfant, des études cas-témoins sont également menées sur les populations de liquidateurs afin de vérifier si les cas de leucémies observés sur ces populations peuvent être en relation avec l'irradiation reçue dans les jours et mois qui ont suivi l'accident. Les études sur les liquidateurs sont menées dans un cadre international et coordonnées par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) de l'Organisation Mondiale de la santé (OMS) et par le NCI.

La contamination des sols

La connaissance de la contamination des sols par le césium 137 est bien établie tant en Biélorussie, en Ukraine qu'en Russie. La clairance des sols (la clairance des sols pour le césium 137 varie de 10 à 25 ans en fonction de la caractéristique du sol, c'est le temps au bout duquel la contamination est divisée par 2) et les pratiques agricoles entraînent une diminution régulière de la contamination des produits alimentaires. Cependant, le changement des pratiques agricoles et de l'amendement des sols dus aux difficultés économiques peuvent induire ponctuellement une augmentation de la contamination des productions.

Dans certaines zones, la migration des dépôts de césium 137 et de strontium 90 amène à la création de points ou de zones d'accumulation de la contamination qui sans un contrôle rigoureux peuvent induire une augmentation ponctuelle de la contamination des produits.

LES CONSEQUENCES DES RETOMBÉES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL EN FRANCE

La caractérisation radio-écologique des retombées de l'accident

◆ La contamination de la chaîne alimentaire due aux retombées de l'accident de Tchernobyl et son évolution ont été étudiées par l'IPSN du mois de mai 1986 jusqu'à ce qu'une stabilisation de la contamination soit observée en 1989. Les études radio-écologiques ont été effectuées dans des régions où les pluies ont été les plus importantes pendant la période des dépôts : le bassin du Haut-Var, le bassin de la Moselle, la Corse. D'autres études ont été menées, à la même époque, concernant la contamination atmosphérique et la contamination du milieu marin.

◆ Le SCPRI a effectué aux mois de mai et juin 1986 plusieurs milliers de mesures sur des produits alimentaires. Ces mesures se sont ajoutées aux mesures mensuelles habituellement faites sur le territoire national et aux alentours des sites nucléaires. Elles ont porté sur la contamination de l'air (21 stations à l'écart des installations nucléaires et 23 stations proches des sites nucléaires), sur la contamination de l'eau de pluie (12 stations à l'écart des sites nucléaires et 23 stations proches des sites nucléaires), sur la contamination des eaux de surface et souterraines, sur les eaux potables, sur les eaux de mer, sur le lait (2 à 7 mesures par département, 5 à 8 mesures en 8 lieux particuliers et sur les laits produits à proximité de 18 sites nucléaires) ainsi que sur les repas de cantines scolaires.

◆ Par la suite, plusieurs campagnes de mesure spécifiques dans le milieu côtier méditerranéen et dans les Vosges ont été réalisées et sont venues compléter les observations de routine faites par l'IPSN dans le cadre de la surveillance des sites nucléaires, du suivi de la contamination atmosphérique et de la contamination du milieu marin.

◆ A partir de 1997, l'IPSN a rassemblé les résultats de mesure disponibles pour établir un inventaire de la contamination des sols et de la chaîne alimentaire.

◆ En 1999, l'IPSN a entrepris une campagne de caractérisation des dépôts de la région Bas-Rhône, où les sols présentent une bonne rétention du césium et où les pluies ont été importantes pendant le

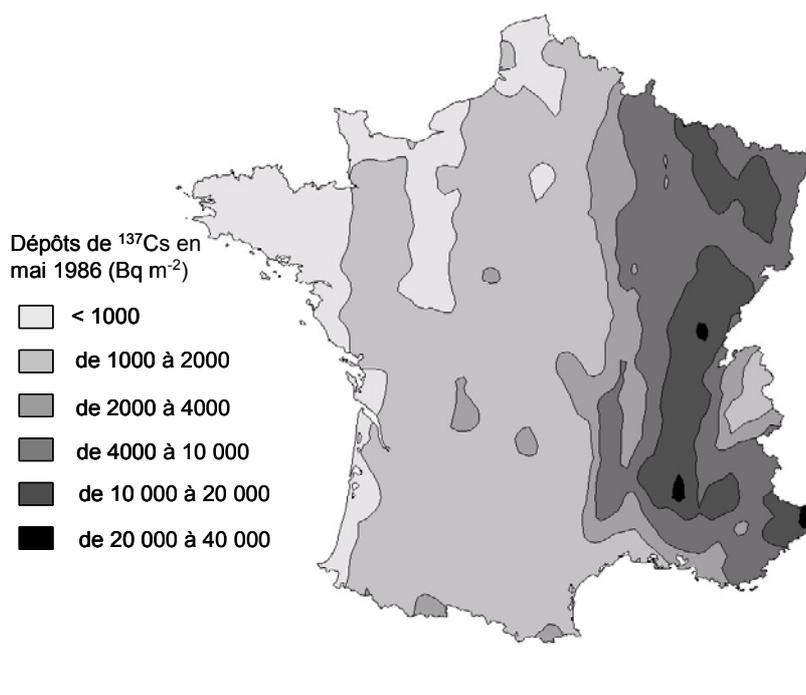
passage des masses d'air contaminées du 1^{er} au 5 mai 1986. A la suite de cette étude, une corrélation a été établie, pour cette zone, entre les dépôts de césium 137 et les pluies mesurées au cours de cette période considérée.

Cette corrélation a ainsi permis de reconstituer une carte de la contamination de l'Est de la France à partir des hauteurs de pluie mesurées entre le 1^{er} et le 5 mai 1986. Cette carte a été validée à partir des mesures de dépôts disponibles.

Autres études à caractère local effectuées entre 1998 et 2002

- En 1998-2000, la contamination de la région du Mercantour a été caractérisée, en particulier dans les zones où le césium 137 s'est accumulé à cause de l'hétérogénéité des dépôts neigeux et des processus de fonte des neiges.
- En 2001, une campagne de mesures a été effectuée à Sisteron dans les Alpes de Haute Provence.
- En 2001 et 2002, l'essentiel de l'effort de connaissance de la contamination a porté sur la Corse. L'évolution de la contamination en iode 131 et en césium 137 des produits agricoles y a été évaluée à partir des mesures effectuées dans les produits agricoles locaux dans les trois mois qui ont suivi les dépôts. C'est dans la plaine orientale de l'île que les précipitations, entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, ont été les plus fortes, plus de 100 mm, et que les dépôts de césium 137 ont pu dépasser 20 000 Bq.m⁻² dans la région de Solenzara et 50 000 Bq.m⁻² dans certaines zones d'altitude. Sur ces mêmes zones, les dépôts d'iode 131 ont pu dépasser 200 000 Bq.m⁻².
- En 2002 une étude sur les vins des Côtes du Rhône effectuée par l'IRSN à la demande des viticulteurs a montré que la production de vin de 1986 a été très faiblement marquée et que les activités de ¹³⁷Cs sont restées inférieures à 1 Bq.l⁻¹, les vignes n'ayant pas encore développé leur feuillage fin avril 1986. De nos jours, l'activité du vin est revenue à son niveau d'avant l'accident.

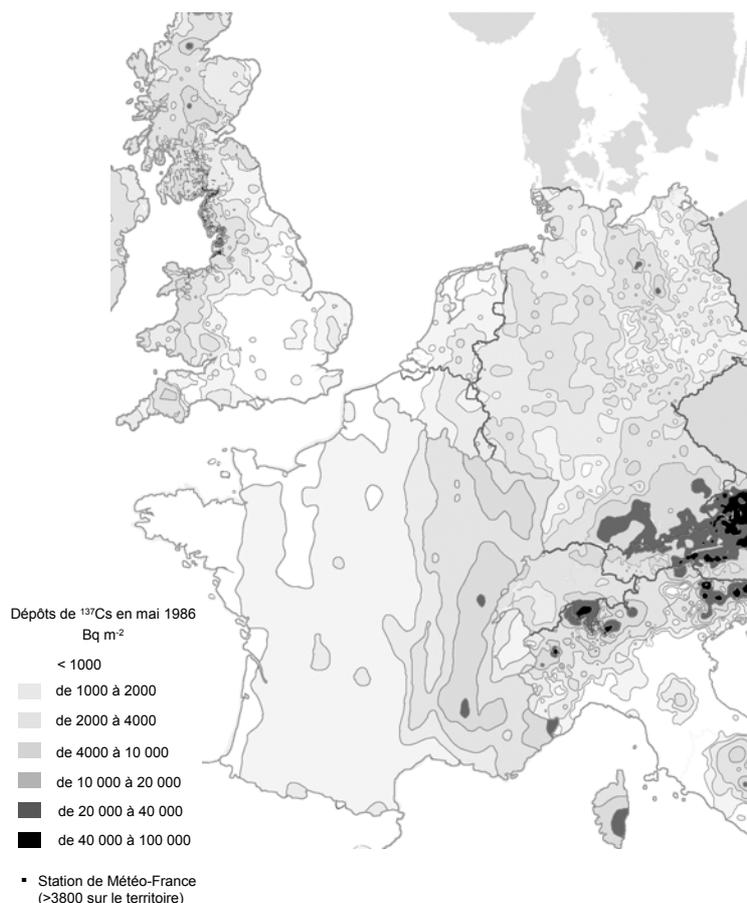
◆ Début 2003, une carte des dépôts de césium 137 au mois de mai 1986 dus à l'accident de Tchernobyl a été établie pour l'ensemble du territoire métropolitain français. Cette carte a été réalisée à partir des mesures de la contamination de l'air par le césium 137, des mesures des hauteurs de pluie effectuées entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 ainsi que de la relation établie entre dépôt au sol et hauteur des pluies. Cette carte a été validée avec les résultats de mesure de contamination des sols.



Reconstitution par modélisation des dépôts de césium 137 de mai 1986 en France dus à l'accident de Tchernobyl

On observe une diminution d'est en ouest des activités de césium 137 déposées, allant respectivement de moins de 1000 Bq.m⁻² à plus de 20 000 Bq.m⁻². Dans l'Est, les dépôts supérieurs à 10 000 Bq.m⁻² correspondent à des hauteurs de pluies cumulées supérieures à 20 mm entre le 1^{er} et le 5 mai 1986. Vers l'ouest, les contreforts du Massif Central, qui ont reçu des précipitations supérieures à 10 mm durant la première semaine de mai 1986, se distinguent avec des dépôts de 4000 à 10 000 Bq.m⁻². Encore plus à l'ouest, bien que des hauteurs de pluies supérieures à 20 mm aient été enregistrées, les dépôts n'ont pas dépassé 2000 Bq.m⁻² à cause de l'appauvrissement en césium 137 des masses d'air. Les principales incertitudes attachées à cette carte sont associées aux incertitudes résultant de la cartographie des précipitations car il est possible qu'entre deux stations de relevés pluviométriques, les hauteurs de pluies réelles aient été plus ou moins importantes que celles interpolées. Aussi, une pluie ou un autre phénomène d'accumulation des dépôts, ayant pu conduire localement à des dépôts supérieurs ou inférieurs à ceux estimés dans cette cartographie, peut ne pas avoir été représenté.

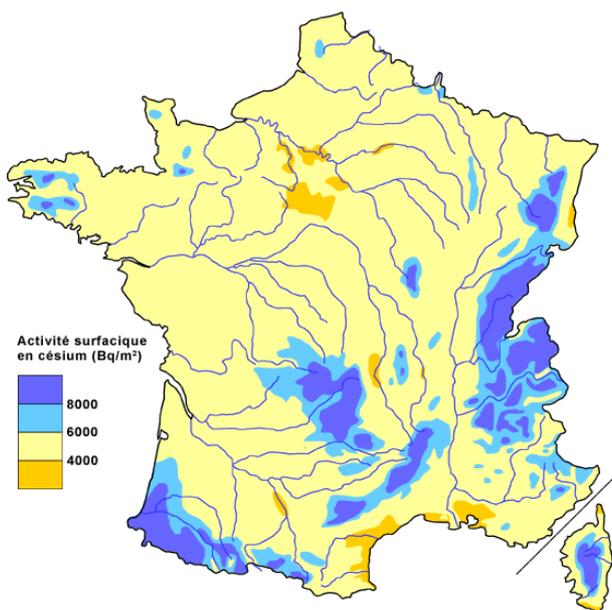
◆ Afin d'apprécier la cohérence entre les niveaux de contamination du territoire français et ceux des pays voisins apparaissant dans l'Atlas Européen (Atlas of caesium deposition on Europe after the Tchernobyl Accident – European Commission – 1998) de la contamination par le césium, la carte décrite plus haut a été juxtaposée à celles de ces pays.



Incrustation dans la carte de l'Atlas européen du césium, de la carte des dépôts de césium 137 en France dus à l'accident de Tchernobyl (mai 1986)

Sur la carte ci-dessus, on notera dans l'est du pays des dépôts équivalents à ceux apparaissant dans certaines zones du nord de l'Italie, de Suisse et du sud de l'Allemagne où les niveaux des précipitations ont été proches de ceux enregistrés sur les zones les plus touchées de France. La carte montre également qu'à l'ouest et au nord du pays, il y a continuité de la contamination avec l'est de la Grande-Bretagne et la Belgique.

◆ Une autre carte a été établie à partir des dépôts cumulés de césium 137 provenant des essais nucléaires atmosphériques. Elle représente le cumul des dépôts de 1945 à 1980 corrigés de la décroissance radioactive jusqu'en 2003, mais non corrigés des autres processus qui ont contribué à l'élimination du césium des sols, migration horizontale vers les rivières et migration verticale en profondeur. Ces processus peuvent conduire, selon les caractéristiques du sol, à une situation allant d'une élimination importante du césium dans les sols jusqu'à la conservation quasi complète du dépôt.



Carte des dépôts de césium 137 en France dus aux retombées des essais nucléaires atmosphériques corrigés de la décroissance radioactive jusqu'en 2003

Il est très important de noter que les cartes qui précèdent ne permettent pas d'établir par similitude les cartes des doses délivrées aux populations. Les connaissances en radioécologie montrent en effet que l'augmentation de la contamination de la chaîne alimentaire n'est pas proportionnelle à l'augmentation des dépôts radioactifs. Une herbe qui reçoit un dépôt pluvieux 10 fois supérieur à un dépôt sec ne présente une activité que de 2 à 3 fois plus élevée.

Les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France

En 2000, à la demande de la Direction Générale de la Santé (DGS), l'IPSN, en association avec l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) a mené une étude visant à apprécier la pertinence et la faisabilité des études épidémiologiques qui pourraient être conduites pour mettre en évidence d'éventuels cancers thyroïdiens dus aux retombées de Tchernobyl chez les enfants qui résidaient dans l'est de la France et avaient moins de 15 ans au moment de l'accident.

Les doses moyennes à la thyroïde ont été estimées à 1,9 mSv pour le nourrisson, 9,8 mSv pour l'enfant d'un an, 5,9 mSv pour l'enfant de cinq ans et 3,0 mSv pour l'enfant de dix ans. Mais, selon le mode de vie, en particulier le type de lait habituellement consommé (lait de vache, lait de chèvre ou de brebis), des personnes d'une même tranche d'âge ont pu recevoir des doses plus faibles ou plus élevées.

Les risques de cancer thyroïdien correspondant à ces doses ont été calculés par extrapolation à partir des connaissances sur les effets aux fortes doses, selon l'hypothèse d'une relation dose-effet linéaire sans seuil. Sur la période 1991-2000, le nombre de cancers de la thyroïde théoriquement induit par les retombées de l'accident de Tchernobyl est estimé entre 0,5 et 22 cas selon le modèle retenu (à

comparer au nombre spontané de cancers de la thyroïde dans la même population sur la même période, estimé à 97 ± 20) ; pour la période 1991-2015, ce nombre est estimé entre 6,8 et 54,9 cas selon le modèle retenu (à comparer au nombre spontané de cancers de la thyroïde dans la même population sur la même période, estimé à 899 ± 60).

A partir de ces résultats, les conclusions suivantes ont été tirées :

- Il serait difficile de mettre en évidence de tels excès de cancers par des études épidémiologiques par manque de puissance statistique et de données sur l'exposition individuelle des personnes aux retombées d'iode radioactif.
- Ces estimations d'excès de cancers ne permettent pas d'expliquer l'augmentation de la fréquence des cancers de la thyroïde dans la population générale, constatée en France depuis près de 30 ans, c'est-à-dire bien avant l'accident de Tchernobyl.
- Une réflexion plus globale est conduite au sein d'un groupe interdisciplinaire animé par l'InVS sur les différents facteurs de risque susceptibles d'expliquer le développement des cancers de la thyroïde. L'ensemble de ces réflexions aboutit à souligner la nécessité de mettre en place un registre national des cancers de la thyroïde qui viendrait compléter le registre national des cancers de l'enfant en cours de constitution.

Le cas de la Corse

Pour la majorité des enfants présents en Corse entre mai et juin 1986, les doses délivrées à la thyroïde n'ont pas dû dépasser la dose moyenne des enfants de l'est de la France, soit 10 mSv. En Balagne, où les dépôts ont été similaires à ceux de l'est de la France, la charge thyroïdienne en iode d'un jeune garçon âgé de 13 ans en 1986 a été mesurée début juillet 1986. Cette mesure d'activité thyroïdienne correspond à une consommation modérée mais régulière de produits locaux parmi lesquels du lait de chèvre ou de brebis (200 g/j) produit ayant également fait l'objet de mesures. La dose à la thyroïde de ce jeune garçon a été estimée à $18,5 \pm 8,5$ mSv. Cette dose est cohérente avec les résultats des mesures de la contamination de la chaîne alimentaire effectuées en mai 1986 et avec les dépôts radioactifs en Balagne estimés par l'IRSN.

Une reconstitution de la dose à la thyroïde reçue par un enfant résidant dans la partie orientale de la Corse, la plus marquée par les dépôts de radioactivité, ayant les mêmes habitudes alimentaires que celui de Balagne montre que les doses à la thyroïde aurait pu dépasser 50 mSv et atteindre 150 mSv avec la prise en compte d'une consommation quotidienne de produits laitiers (de chèvre et de brebis) plus importante. Il s'agit toutefois d'une valeur calculée avec des hypothèses pessimistes que l'absence de mesure de la contamination de la chaîne alimentaire dans cette région de Corse, l'absence de mesure *in vivo* ainsi que d'étude détaillée des habitudes alimentaires locales en 1986 ne permettent pas de conforter davantage.

Chapitre 1 :

La centrale de Tchernobyl

1. Contexte et enjeux de l'arrêt de la centrale de Tchernobyl

Les pays du G7, la Commission Européenne et l'Ukraine ont conclu le 20 décembre 1995 un protocole d'accord en faveur de la fermeture de la centrale de Tchernobyl. Ce protocole prévoyait, de la part de l'Ukraine, l'engagement d'arrêter définitivement la centrale de Tchernobyl en l'an 2000 et, de la part des pays occidentaux, l'octroi de financements suffisants pour satisfaire les besoins en électricité du pays une fois la centrale fermée, pour la mise en situation sûre du site de Tchernobyl et pour la prise en charge du volet social devant accompagner cette fermeture.

Le 15 décembre 2000, le dernier réacteur en service de la centrale de Tchernobyl a été définitivement arrêté conformément à l'engagement qu'avait pris le gouvernement ukrainien.

Rappels sur l'histoire de la centrale

La construction de la centrale de Tchernobyl a fait suite aux décisions prises par l'Union Soviétique en 1966 de développer largement la production d'énergie d'origine nucléaire. Les réacteurs de type « RBMK » ont été développés à partir de cette date (cf. annexe 3). Six réacteurs nucléaires RBMK de puissance 1000 mégawatts électriques (MWe) devaient être mis en service sur le site de Tchernobyl :

→ **Le réacteur numéro 1**, mis en service en septembre 1977, a été arrêté en novembre 1996. Son maintien en fonctionnement aurait nécessité de très importants travaux de remplacement des « tubes de force ». Depuis, un programme de cessation définitive d'exploitation a été établi. Le déchargement du cœur de l'unité 1 a démarré en 1998 pour entreposage en piscine du réacteur. L'évacuation du combustible de l'unité 1 aurait dû se terminer en 2003 si un nouvel atelier d'entreposage avait été mis en service, comme prévu, en 2001. Pour les phases suivantes du démantèlement, l'exploitant doit présenter les dossiers correspondants à l'Autorité de sûreté ukrainienne.

→ **Le réacteur numéro 2**, qui a démarré en décembre 1978, est hors service depuis 1991, à la suite d'un incendie. Les autorités ukrainiennes ont décidé de sa mise à l'arrêt définitif en mars 1999. Le programme de cessation définitive d'exploitation élaboré par l'exploitant a été approuvé par l'Autorité de sûreté ukrainienne.

→ **Le réacteur numéro 3** a été mis en service en 1981. Après 1995, il a subi de nombreux arrêts pour des opérations de maintenance, de contrôle et de réparation. En juin 2000, les autorités ukrainiennes ont pris la décision de l'arrêter définitivement le 15 décembre 2000.

→ **Le réacteur numéro 4**, mis en service en 1984, a explosé le 26 avril 1986.

→ **La construction des réacteurs 5 et 6** a démarré en 1981 et a été abandonnée à la suite de l'accident.

Au-delà de l'arrêt de production, des travaux de mise en sécurité et de démantèlement des quatre tranches de la centrale vont être engagés, selon un scénario complexe qui s'étalera sur de très nombreuses années.

Dans le cadre du programme de démantèlement des réacteurs de la centrale, la réalisation de différentes installations est prévue sur le site de Tchernobyl, pour assurer l'entreposage des combustibles irradiés, le traitement des effluents liquides et le traitement des déchets solides provenant d'opérations associées au démantèlement des réacteurs, ainsi que le stockage des déchets ultimes résultant de ces traitements.

Le programme de démantèlement des réacteurs de la centrale de Tchernobyl est soutenu par la communauté internationale, à travers la Banque Européenne pour la Reconstruction et le Développement (BERD) et le programme TACIS financé par la Commission Européenne (cf. paragraphe 4).

2. Travaux accompagnant la mise à l'arrêt de la centrale

2.1. Nouvelle installation d'entreposage de combustibles irradiés

Les combustibles¹ irradiés des trois réacteurs arrêtés de la centrale sont actuellement entreposés dans les cœurs des réacteurs, dans les piscines attenantes à ces réacteurs et dans une ancienne installation d'entreposage. La construction d'une nouvelle installation est en cours pour entreposer « à sec », selon le procédé Nuhoms², l'ensemble de ces combustibles pendant une durée de cent ans.

Cette installation d'entreposage des combustibles irradiés comprendra deux bâtiments principaux :

- le premier abritera un atelier destiné au découpage des assemblages de crayons combustibles, conformément au procédé Nuhoms. Chaque assemblage combustible est en fait constitué de deux « demi-assemblages de combustibles » reliés par une tige métallique. Le découpage consiste à séparer ces deux parties, qui seront insérées dans des cartouches étanches, elles-mêmes placées dans des conteneurs. Ce bâtiment servira également à l'entreposage des barres de contrôle³ des réacteurs.
- le second sera constitué d'un ensemble de cellules modulaires à refroidissement passif dans lesquelles les conteneurs seront entreposés (chaque cellule devrait accueillir un conteneur).

¹ Un crayon combustible RBMK est constitué de pastilles de combustible placées au sein d'une gaine en alliage à base de zirconium. Un assemblage combustible contient 18 crayons (réseau hexagonal).

² Nuhoms est un procédé d'entreposage à sec des assemblages combustibles irradiés. Ce procédé a été agréé par l'Autorité de sûreté américaine NRC (Nuclear Regulatory Commission) en avril 1989. Il s'agit d'un agrément générique qui a été donné pour des installations de type Nuhoms utilisées pour entreposer des combustibles issus des réacteurs à eau légère (PWR et BWR) et répondant à un cahier des charges précis.

³ Les barres de contrôle permettent de réguler la puissance d'un réacteur nucléaire, et d'arrêter le réacteur en cas d'évolution dangereuse de certains paramètres.

La capacité nominale de traitement de l'atelier sera de 2 500 assemblages par an sur une période de dix ans. Le nombre des cellules modulaires serait de 256, selon les hypothèses actuelles de dimensionnement.

La construction de cette installation est financée par la BERD. La maîtrise d'ouvrage est assurée par Westinghouse pour le compte de l'exploitant de la centrale, la maîtrise d'œuvre est assurée par Framatome dans le cadre d'un consortium constitué avec les entreprises Bouygues et Campenon Bernard.

Le projet a démarré en juin 1999. Les bâtiments sont en fin de construction et la mise en place des équipements a débuté. La demande d'autorisation d'exploitation de l'installation devrait être déposée auprès de l'autorité de sûreté ukrainienne (SNRCU) mi-2003. Selon le calendrier révisé, elle pourrait être délivrée fin 2004. Le transfert de l'ensemble des assemblages combustibles dans l'entreposage devrait s'étaler sur dix ans. Le coût estimé de ce projet est de l'ordre de 80 millions d'euros.

2.2. Installation de traitement des effluents liquides

Les effluents liquides (traitement des eaux des piscines, effluents des quatre réacteurs...) de faible et de moyenne activité (entre 10^{-6} et 10^{-3} Ci/l de cobalt 60, césium 137 et césium 134 notamment) sont entreposés sur le site de la centrale dans deux ensembles de cuves. Le premier comprend cinq cuves externes (non couvertes par un bâtiment) de 5 000 m³, le second neuf cuves de 1 000 m³ installées dans des cellules individuelles. Au total, 26 000 m³ d'effluents liquides y sont actuellement entreposés (pour un volume utile total de 34 000 m³). Certaines cuves contiennent également des matières solides, en particulier des résines.

Les principales opérations de traitement consisteront dans un premier temps à pomper les effluents dans leurs cuves pour les transférer dans une cuve de réception située dans l'atelier de traitement. Ces opérations sont délicates car elles n'ont pas été prévues lors de la construction des quatorze cuves : le pompage nécessite en effet l'installation de boîtes ventilées contenant les équipements de transfert et de rinçage au dessus des cuves et la mise en place de connexions avec le réseau de tuyauteries de transfert existant. En particulier, pour les cuves de 5 000 m³, il sera nécessaire de procéder à des travaux de terrassement sur le dôme des cuves et d'y réaliser des ouvertures.

Les effluents seront ensuite concentrés et malaxés avec un liant hydraulique (béton) afin d'y être immobilisés. Les colis ainsi fabriqués seront ultérieurement stockés sur un site de surface dont la réalisation est prévue à proximité du site de Tchernobyl.

Les distillats issus des étapes de concentration des effluents seront soit réutilisés pour effectuer la mise en suspension des particules solides déposées au fond des cuves afin de les pomper, soit purifiés pour répondre aux critères permettant leur retour vers la centrale et leur rejet.

Les effluents provenant du démantèlement de la centrale de Tchernobyl seront *a priori* traités dans cet atelier.

Comme pour l'atelier d'entreposage des combustibles irradiés, la construction de cet atelier est financée par la BERD et la maîtrise d'ouvrage est assurée par Westinghouse pour le compte de l'exploitant. La maîtrise d'œuvre est assurée par la société belge Belgatom dans le cadre d'un consortium constitué avec les entreprises française SGN et italienne Ansaldo.

Le génie civil est en voie d'achèvement et l'installation des équipements a débuté. Comme pour l'installation d'entreposage des combustibles irradiés, la demande d'autorisation d'exploitation devrait être déposée auprès de l'autorité de sûreté ukrainienne (SNRCU) mi-2003. Selon le calendrier révisé, l'autorisation pourrait être délivrée mi-2004. Le traitement des effluents liquides existants devrait s'étaler sur une période de dix ans. Le montant estimé de ce projet est de l'ordre de 25 millions d'euros.

2.3. Installation de traitement des déchets solides

La construction d'une nouvelle installation de traitement des déchets solides est prévue. Les déchets solides correspondants, de faible et de moyenne activité (de l'ordre de 0,1 à 10 curies par tonne), proviennent du fonctionnement des quatre réacteurs (métal, béton, plastique, bois, papier...). Ils sont actuellement entreposés dans un bâtiment vétuste divisé en trois compartiments. Les deux premiers (volume d'environ 1 000 m³ chacun) sont pratiquement remplis ; le troisième (1 800 m³), qui contient les déchets les plus actifs, n'est rempli qu'à 18%.

Tous ces déchets sont relativement mal connus ; en conséquence, des précautions particulières seront prises au cours des opérations de traitement. Une partie de ces déchets a été recouverte de béton. Leur récupération nécessitera la mise en œuvre de différents moyens de reprise : forage des trois compartiments, reprise à distance. La capacité journalière de récupération des déchets sera de l'ordre de 3 m³, pour une quantité totale estimée de déchets de l'ordre de 2 350 m³.

Le traitement des déchets provenant de la première phase du démantèlement de la centrale devrait également être effectué dans cette nouvelle installation.

Les déchets seront séparés en plusieurs catégories en fonction de leurs propriétés physiques et de leurs caractéristiques radiologiques. Les déchets non susceptibles d'être stockés en surface (les plus radioactifs) seront placés dans des conteneurs étanches pour un entreposage temporaire sur le site de Tchernobyl, dans l'attente d'un traitement ultérieur. Le conditionnement final des déchets les moins radioactifs consistera, après un traitement adapté, en un enrobage dans du béton et une mise en conteneurs. La capacité de conditionnement de l'atelier sera de l'ordre de 20 m³ de déchets par jour.

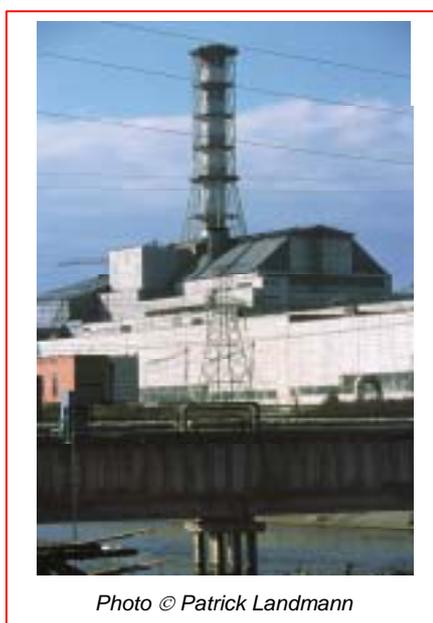
Le stockage final en surface des colis de déchets de faible et de moyenne activité devrait être effectué dans des tranchées bétonnées, selon un procédé voisin du procédé mis en œuvre en France (Centre de stockage de l'Aube) et en Espagne (Centre de stockage d'El Cabril). Le site de stockage sera situé dans la zone d'exclusion de la centrale. Des critères d'acceptation des colis de déchets sur ce site devront être établis, sur la base d'une étude d'impact et en cohérence avec les propriétés des colis produits par l'atelier de conditionnement des effluents liquides et par l'atelier de conditionnement des déchets solides.

Les installations de reprise et de traitement des déchets solides ainsi que le stockage définitif des colis de déchets sont financés dans le cadre du programme TACIS.

Le choix de la maîtrise d'ouvrage (Nukem) a été effectué en mars 2001. Les études sont en cours et les documents relatifs à l'autorisation de construction doivent être soumis à l'autorité de sûreté ukrainienne (SNRCU). Les autorisations d'exploitation devraient être délivrées fin 2004-début 2005 pour les différents ateliers constituant cette installation. La reprise et le traitement des déchets dureront au minimum cinq ans.

3. Le devenir du « sarcophage »

3.1. Le bâtiment « sarcophage »



Le sarcophage

En 1986, les autorités russes ont fait construire, en quelques mois, un bâtiment appelé « sarcophage » enveloppant le réacteur accidenté afin :

- d'éviter la dispersion dans l'environnement des matières radioactives présentes dans la lave formée par le combustible fondu et les structures subsistantes du réacteur ;
- d'empêcher l'eau de pluie de pénétrer à l'intérieur du sarcophage et ainsi d'accroître la contamination du sol ;
- de permettre d'exploiter l'unité 3, mitoyenne de l'unité accidentée, qui partage des installations communes avec l'unité 4, comme le hall des turbines et le bâtiment des auxiliaires.

Le sarcophage a été construit sur les deux murs est et ouest de l'unité 4 non complètement détruits, dont l'un est commun avec l'unité 3. Les deux autres murs ont été construits sur les débris du bâtiment du réacteur.

Le toit du sarcophage, composé de plaques de tôle, repose sur des tubes d'acier de 1,2 mètre de diamètre, posés sur quatre énormes poutres dénommées « B1 » et « B2 » ancrées sur les murs est et ouest du réacteur. Ces plaques et ces composants de structure ont été posés à distance à l'aide de grues, sans possibilité d'assurer leur jointure et leur fixation sur des supports dont la solidité n'est pas certaine. Dans ces conditions, l'étanchéité et la stabilité de la construction ne peuvent être garanties. Cette situation ne permet donc pas de garantir la pérennité à moyen et long terme du sarcophage.

En plus de ce sarcophage, un mur de séparation a été construit, dans le hall des turbines, pour isoler les turbines de l'unité 4 de celles de l'unité 3.

Dans le bâtiment des « auxiliaires » qui sépare ces deux unités, les compartiments dédiés à l'unité 4 ont été remplis de béton sur une épaisseur de plus de 6 mètres, créant ainsi une protection contre les rayonnements.

Sur le côté nord de l'unité numéro 4, un mur de protection de 50 mètres de hauteur, soutenu par quatre gigantesques marches, a été construit pour renforcer le sarcophage et faire fonction de protection contre les rayonnements. Ce mur, appelé mur des « cascades », a une épaisseur de 20 mètres dans sa partie la plus basse.

Côté sud du réacteur numéro 4, deux énormes piliers ont été construits sur les fondations du réacteur détruit pour soutenir un autre mur fait de poutres et de plaques.

Une très grande partie des 190 tonnes du combustible du réacteur est toujours dans le sarcophage. La surface de la lave constituée à partir de la fusion du combustible et des structures (100 à 130 tonnes, dont 50 à 80 tonnes de combustible) est aujourd'hui à température ambiante. En outre, les compartiments inférieurs du réacteur renferment de l'eau provenant du ruissellement de la pluie ou de la fonte des neiges. Ces eaux font l'objet d'une surveillance et de pompes périodiques.

Outre l'effondrement du sarcophage, il existe deux risques principaux :

- Le premier est un risque de criticité, c'est-à-dire de redémarrage, à cause de la présence d'eau, d'une réaction en chaîne dans le combustible fondu. Les experts français et internationaux s'accordent à considérer que le risque de criticité, sans être totalement exclu, est très faible.

- Le second risque est celui de la remise en suspension dans l'atmosphère de poussières radioactives dues à la décomposition de la lave en poussière. La masse totale des poussières radioactives présentes aujourd'hui dans le sarcophage est estimée par les Ukrainiens à une trentaine de tonnes et correspond à une activité de 10^{17} becquerels (Bq), principalement due au strontium 90 (47%) et au césium 137 (30%). Pour pallier cette situation, une solution de polyvinyle est périodiquement pulvérisée dans le sarcophage pour fixer les poussières. Les premières années après l'accident, les aspersion de polyvinyle étaient hebdomadaires. Elles sont maintenant mensuelles.

3.2. Les conséquences de l'effondrement du sarcophage

L'effondrement du sarcophage est une hypothèse qui ne peut pas être écartée compte tenu d'une part de la fatigue des matériaux et des conditions de construction, d'autre part des cataclysmes naturels qui peuvent survenir.

En effet, le site de Tchernobyl peut être l'objet d'orages violents entraînant de très fortes précipitations. Des précipitations de 190 mm en 24 heures et de 74 mm en 20 minutes ont été relevées. En hiver, des chutes de neige très importantes ont déjà été observées et pourraient exercer une pression atteignant 1,4 kPa sur le toit du sarcophage. Les services météorologiques ukrainiens estiment le risque de tornade à 10^{-4} par an et le risque de très forte tempête à $1,2 \cdot 10^{-2}$ par an. Enfin, l'institut de géophysique de l'Académie des sciences d'Ukraine estime le risque d'un séisme d'intensité 7 sur l'échelle MSK à 10^{-4} .

Le risque d'effondrement du sarcophage même s'il apparaît très faible, ne peut donc être totalement écarté et doit être pris en compte pour la sécurité des personnels présents sur le site et des populations vivant à l'extérieur de la zone d'exclusion des 30 kilomètres.

Plusieurs études (GRS, 1995 – IBRAE, 1996 – IREP, 1995) ont été entreprises pour estimer les conséquences radiologiques de l'effondrement du sarcophage qui pourrait causer de nombreuses victimes dues à la chute des structures et à l'effet de souffle causé par l'effondrement. Les études effectuées montrent que 5 à 10 tonnes de poussières contenant 1% de combustible nucléaire, soit 50 à 100 kg, seraient remises en suspension dans l'air. Ces mêmes études estiment l'activité du rejet sous forme d'aérosols de 50 à 100 TBq de césium 137, de 40 à 80 TBq de strontium 90, de 0,65 à 1,3 TBq de plutonium, isotopes 238, 239 et 240 confondus et de 0,5 à 1 TBq d'américium 241.

Un tel nuage de poussière s'élèverait jusqu'à une centaine de mètres au dessus du niveau du sol et causerait une nouvelle contamination atteignant près de $150\,000 \text{ Bq/m}^2$ ($\cong 4 \text{ Ci/km}^2$) en bordure de la zone des 30 kilomètres, et dépassant 3 millions de Bq/m^2 ($\cong 80 \text{ Ci/km}^2$) à moins de 2 kilomètres du sarcophage. C'est donc pour les personnes présentes dans une zone de 200 à 300 m autour du sarcophage et jusqu'à 2000 m sous le vent que l'effondrement pourrait avoir des conséquences radiologiques significatives.

Une étude menée par GRS mbH (Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit) estime de $2 \cdot 10^{-2}$ à $5 \cdot 10^{-2}$ Sv la dose efficace due à l'inhalation de particules radioactives dans une zone de 2000 mètres autour du sarcophage en cas d'effondrement et sans qu'aucune contre-mesure n'ait été prise (évacuation du personnel, protection respiratoire). Au delà, les doses diminueraient rapidement pour être inférieures à 1 mSv à l'extérieur de la zone des 30 km, là où vivent des populations.

Les différentes études effectuées (allemandes, russes, ukrainiennes et biélorusses) concluent de façon concordante sur la faible probabilité d'effondrement du sarcophage et sur les faibles conséquences radiologiques à l'extérieur de la zone d'exclusion. Par contre, ces études, même si elles présentent un caractère pénalisant, indiquent que des doses supérieures à 1 mSv pourraient être reçues par des personnes présentes à moins de 10 km du sarcophage en cas d'effondrement. Ce risque a été considéré comme suffisant d'une part pour maintenir la zone des 30 km, d'autre part pour entreprendre des travaux de consolidation du sarcophage à court et moyen termes et d'envisager la construction d'un second sarcophage à plus long terme.

3.3. Le renforcement du sarcophage actuel



Travaux sur le sarcophage

Les travaux réalisés pour le renforcement et la stabilisation du sarcophage ont pour objectif de limiter le plus possible les fuites de poussières radioactives hors du sarcophage et de réduire les risques d'effondrement du sarcophage à moyen et long terme.

Une liste d'une quinzaine de travaux de renforcement a été dressée et étudiée par l'exploitant de la centrale. Compte tenu des difficultés pour intervenir dans le sarcophage et des risques associés pour le personnel et l'environnement, seuls les travaux les plus prioritaires ont été réalisés, tels que la stabilisation de la cheminée de ventilation commune aux unités 3 et 4 et le renforcement des structures en béton des poutres supportant le toit du sarcophage. Ces travaux de renforcement des poutres ont été réalisés de mars à décembre 1999. Par ailleurs, au cours de l'année 2001, des travaux destinés à réduire les entrées d'eau de ruissellement dans le sarcophage et à améliorer la protection physique des matières nucléaires présentes ont été réalisés.

Le projet SIP (*Shelter Implementation Plan*) a été lancé en 1998 par un groupe de travail d'experts en sûreté nucléaire du G7 et par le gouvernement ukrainien. La durée de ce projet est estimée à 8 ans.

Deux objectifs principaux sont assignés à ce projet : la stabilisation du sarcophage et la mise en place de mesures de protection des travailleurs et de l'environnement. Dans ce cadre, cinq axes ont été retenus : la réduction de la probabilité de ruine du sarcophage, la réduction des conséquences d'une éventuelle ruine, l'amélioration de la sûreté de l'installation (contrôle de la criticité, gestion de l'eau contaminée, caractérisation des matériaux contenant du combustible), l'amélioration de la sécurité des travailleurs et de la protection de l'environnement, l'élaboration et la mise en œuvre d'une stratégie pour assurer la sûreté à long terme.

La conduite de ce projet est assurée par une entité dépendant de la centrale de Tchernobyl, assistée d'une structure de conduite de projet (« Project Management Unit »), rassemblant EDF et les sociétés américaines Bechtel et Battelle. Cette structure a pour mission principale de définir le programme des tâches élémentaires permettant d'atteindre les objectifs du projet SIP, et de solliciter les autorisations nécessaires auprès de l'autorité de sûreté ukrainienne compétente SCNRU (*State Committee of Nuclear Regulation of Ukraine*).

Pour instruire ces demandes d'autorisation, le SCNRU s'appuie sur des experts ukrainiens du SSTC (*State Scientific Technical Center for nuclear and radiation safety*) et étrangers de Scientech (société américaine d'ingénierie) et de Riskaudit (filiale de l'IRSN et la GRS).

3.4. Le nouveau sarcophage

Le nouveau sarcophage ("NSC" - New Safe Confinement), dont le concept a été choisi en 2001, sera constitué d'une double enveloppe métallique formée de quatre segments en forme d'arche de 37,50 m de long chacun (soit une longueur totale de 150 m), de 245 m de portée intérieure et de 100 m de hauteur extérieure (Figure 1).

Chacun des quatre segments sera construit sur une aire située à environ 200 m dans le prolongement du réacteur accidenté. Les quatre segments seront assemblés et équipés sur l'aire de fabrication.

L'ensemble de cet ouvrage métallique sera ensuite amené en place par glissement pour couvrir toutes les structures du réacteur accidenté de l'unité n°4, ainsi que le sarcophage édifié en 1986. Toutes les opérations de démantèlement des structures instables (éléments de toiture et certaines poutres maîtresses) et de gestion des déchets radioactifs, se feront à l'intérieur de ce volume dont l'étanchéité devra répondre à des critères de nature à assurer la protection des travailleurs du site, des populations et de l'environnement contre les risques radioactifs.

La bande de glissement ainsi que la fondation définitive de l'ouvrage seront constituées par une semelle en béton armé d'environ 2 m d'épaisseur, 17 m de large et 177 m de long; cette semelle sera supportée par un système de fondations profondes constitué par des pieux de 800 mm de diamètre ou par des parois moulées d'une vingtaine de mètres de long. La réalisation de ces fondations devra tenir compte de l'existence d'une couche de terrain de remblaiement, mise en place après l'accident, très hétérogène et probablement contaminée.

L'ouvrage métallique dont la durée de vie prévue est de l'ordre de 100 ans, devra résister à des sollicitations normales et accidentelles tels que le séisme, le vent, la neige et la température. La maintenance de cette structure devra être continue afin de répondre en permanence aux objectifs de sûreté visés.

Il est prévu que l'ensemble des études et des travaux (construction de l'ouvrage et démantèlement des éléments instables) soit terminé en 2007. L'opération de déplacement des arches métalliques devrait avoir lieu à mi 2006.

La phase d'avant projet détaillé destinée à établir le dossier technique qui servira à la consultation des entreprises pour la réalisation des travaux, est en cours. Elle s'achèvera en juillet 2003.

Un ensemble de règles de travail a été rédigé à ce sujet, prévoyant la possibilité de contacts directs entre les maîtrises d'ouvrage et Riskaudit au cours de l'instruction des dossiers. Leur mise en place a montré leur efficacité au cours de l'évaluation des documents techniques fournis en vue de la délivrance des autorisations de construction des installations d'entreposage de combustibles irradiés et de conditionnement des effluents liquides. Ce processus est également mis en œuvre pour l'instruction des dossiers relatifs aux installations de reprise, de traitement et de stockage des déchets solides.

4.2. Les aspects financiers

La coopération avec les pays d'Europe de l'Est en matière de sûreté des centrales nucléaires est récente : rendue possible après l'effondrement de l'Union Soviétique en 1990, cette coopération s'est véritablement développée à partir de 1992 avec l'adoption, par les pays du G7⁴, d'une politique dans laquelle s'inscrit, depuis, l'action de la communauté internationale.

Cette politique a été mise en œuvre pour :

- répondre aux besoins les plus urgents dans les centrales nucléaires d'Europe de l'Est, c'est-à-dire améliorer la sûreté d'exploitation et moderniser les installations et, en même temps, renforcer les compétences des autorités de sûreté et encourager la création d'autorités réellement indépendantes ;
- favoriser le remplacement des réacteurs les plus anciens par des sources d'énergie de substitution, en développant une utilisation plus efficace de l'énergie et en modernisant les centrales nucléaires les plus récentes.

L'accent particulier mis sur l'Ukraine par les occidentaux répond notamment à la décision prise par le Parlement ukrainien en octobre 1993 d'annuler une résolution de 1990 qui imposait l'interruption immédiate de la construction de cinq tranches nucléaires et la fermeture fin 1993 de la centrale de Tchernobyl.

Après de premiers engagements financiers pris par les occidentaux en 1994 pour réaliser des améliorations techniques d'urgence de la centrale de Tchernobyl, préparer une stratégie de déclassement de la centrale et définir de premiers projets d'investissement sur le site de Tchernobyl et dans le secteur énergétique ukrainien, les pays du G7, la Commission européenne et l'Ukraine ont conclu le 20 décembre 1995 un protocole d'accord en faveur de la fermeture de la centrale de Tchernobyl.

En contrepartie de l'arrêt définitif de la centrale, ce protocole prévoit l'octroi, par les pays occidentaux, d'une aide à l'Ukraine pour la définition et le financement des projets nécessaires pour satisfaire les besoins en électricité du pays une fois la centrale fermée, pour la mise en situation sûre du site de Tchernobyl et pour la prise en charge du volet social devant accompagner cette fermeture.

⁴ Le G7 regroupe les 7 pays du monde les plus industrialisés : Allemagne, Canada, Etats-Unis, France, Italie, Japon, Royaume-Uni.

Les projets identifiés en 1995 et repris dans le protocole d'accord s'inscrivent dans ces trois derniers domaines. Leur coût total a été estimé à l'époque à 2,3 milliards de dollars et leur financement réparti en 500 millions de dons et 1,8 milliard de prêts.

Depuis, un grand nombre de projets – allant au delà de la liste établie initialement - a été élaboré. Certains sont achevés ou en cours de réalisation, principalement sur le site de Tchernobyl. D'autres, comme le projet d'achèvement et de modernisation, à l'ouest de l'Ukraine, des réacteurs nucléaires de type VVER (1000 MWe) Rovno 4 et Khmel'nitsky 2, sont toujours en cours d'instruction auprès des institutions financières internationales.

Sur le 1,4 milliard de dollars investi à ce jour par les pays occidentaux et les organismes internationaux dans les projets relevant du protocole d'accord, les trois quarts correspondent à des dons, issus pour près de 60 % des pays de l'Union Européenne et de la Commission Européenne.

La majeure partie de ces dons, *plus de 910 millions de dollars*, a été consacrée au financement de modifications techniques du réacteur numéro 3, d'installations entrant dans le cadre du déclassement de la centrale⁵ et du projet d'amélioration de la sécurité du « sarcophage » recouvrant les ruines du réacteur numéro 4, qui a explosé en 1986.

Le coût du projet « sarcophage », lancé en 1998 pour une durée de 8 ans, est de l'ordre de 760 millions de dollars. A ce jour, 720 millions de dollars ont été rassemblés (dont 50 millions d'Ukraine) : il s'agit d'engagements financiers auprès du Fonds International pour le sarcophage (Chernobyl Shelter Fund) géré par la BERD.

D'autres projets pourront être lancés dès que les prêts correspondants auront été accordés : projets destinés à accroître l'efficacité de la gestion du marché de l'électricité, à moderniser le parc de centrales thermiques ou à achever la construction des deux réacteurs nucléaires de Rovno 4 et Khmel'nitsky 2, dont le coût est estimé à 1,5 milliard de dollars.

Des progrès importants ont ainsi été réalisés dans la préparation et le financement des projets depuis la signature du protocole d'accord de 1995 ; à cet égard, la fermeture de la centrale de Tchernobyl le 15 décembre 2000 a constitué une avancée essentielle. Toutefois, leur mise en œuvre doit faire face à de sérieuses difficultés techniques et réglementaires.

La persistance des difficultés que rencontrent les secteurs énergétiques et électriques ukrainiens⁶ et l'ampleur de la tâche qui reste à accomplir pour maîtriser les conséquences de l'accident de Tchernobyl, démontrent toute l'importance qui s'attache au maintien d'une coopération internationale forte avec l'Ukraine dans ces domaines.



⁵ Il s'agit notamment de la construction d'une installation de conditionnement et d'entreposage des combustibles usés, d'ateliers de traitement des déchets solides et liquides issus de l'exploitation de la centrale et d'une unité de production de chaleur pour les installations du site (cf. paragraphe 2).

⁶ Dans le contexte de forte dépendance énergétique de l'Ukraine vis-à-vis de l'extérieur (plus de 50 %) et principalement de la Russie, l'intensité énergétique (rapport entre la consommation d'énergie et le produit intérieur brut) atteint sept fois le taux moyen des pays de l'OCDE. Par ailleurs, si le parc nucléaire est encore jeune (moins de 15 ans de moyenne d'âge pour les 13 réacteurs VVER en exploitation), plus de la moitié des centrales thermiques ont dépassé leur durée de vie de conception

Chapitre 2 :

Les conséquences sanitaires de l'accident dans les pays les plus exposés

- *Une augmentation très importante de cancers de la thyroïde chez les enfants a été observée dans les trois républiques de l'ex-URSS touchées par l'accident de Tchernobyl. Sur la période 1990-1998, en Biélorussie, en Russie (région de Briansk) et dans les régions les plus contaminées d'Ukraine, 1 800 cas ont été dénombrés chez les personnes qui avaient moins de 18 ans en 1986. Les données de 1999 à 2001 obtenues par l'IRSN dans le cadre d'une collaboration avec la Biélorussie confirment la poursuite de l'augmentation du nombre de cancers de la thyroïde chez les enfants de moins de 15 ans au moment de l'accident, notamment chez ceux exposés avant l'âge de 5 ans . Pour suivre l'évolution des cancers de la thyroïde en fonction du temps, il est nécessaire d'analyser non seulement les données observées en service de pédiatrie, mais il faut s'intéresser aux jeunes adultes, car ceux qui avaient moins de 5 ans en 1986, ont tous atteint la tranche d'âge de 15 à 30 ans.*
- *Depuis plusieurs années, les efforts de l'IRSN visent à soutenir les registres de cancer de la thyroïde en Biélorussie, en Ukraine et dans les oblasts les plus contaminés de Russie. Dans ce contexte, une publication commune avec des chercheurs russes a permis de décrire la fréquence des cancers de la thyroïde sur la population de Briansk et de vérifier si la fréquence de ces cancers est plus élevée dans les régions fortement contaminées. Les résultats indiquent une faible augmentation, comparativement à la population nationale, de l'incidence des cancers de la thyroïde chez les populations exposées à l'âge adulte, mais cette augmentation n'est pas liée à une augmentation de la dose à la thyroïde. Les résultats des études sur les liquidateurs, actuellement en cours apporteront des éléments supplémentaires sur l'estimation du risque après exposition à l'âge adulte.*
- *Dans les trois pays les plus touchés par l'accident de Tchernobyl, les taux d'incidence des leucémies chez l'enfant ont été comparés entre régions fortement et faiblement contaminées. Ces études descriptives n'ont pas mis en évidence d'excès de leucémie dans les régions les plus contaminées. En 2001, une étude a signalé un excès d'incidence des leucémies chez l'enfant exposé in utero dans les régions les plus contaminées d'Ukraine. En 2002, une étude cas-témoins menée en Ukraine dans deux oblasts fortement contaminés, suggère une association entre la survenue de leucémie et le niveau d'exposition chez les enfants de moins de 20 ans au moment de l'accident.*
- *Parallèlement aux études, sur le risque de leucémies chez le jeune enfant, des études cas-témoins sont également menées sur les populations de liquidateurs afin de vérifier si les cas de leucémies observés sur ces populations peuvent être en relation avec l'irradiation reçue dans les jours et mois suivant l'accident. Pour ces études, l'estimation de la dose individuelle sera plus précise que pour les études ciblant la population générale. Ces études permettront*

donc de mieux étudier la relation entre l'exposition aux radiations et la survenue de la maladie. Les études sur les liquidateurs sont menées dans un cadre international et coordonnées par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) de l'OMS et par le National Cancer Institute (NCI) aux USA.

Le terme de liquidateur concerne aussi bien les personnes qui sont intervenues sur site les premiers jours après l'accident que les personnes qui ont mené des études dans la zone des 30 km fin 1987. La gamme des doses reçues est donc très variée. Leur dosimétrie individuelle est reconstituée rétrospectivement par un panel d'experts en dosimétrie et en épidémiologie venant de Russie, d'Ukraine, de Biélorussie, secondés par des experts européens et américains.

- **Dans le cadre d'une collaboration actuellement en cours entre l'IRSN et le registre national Biélorusse des malformations congénitales, aucun excès n'a été établi à ce jour sur l'ensemble des malformations congénitales dans les territoires les plus contaminés.**

Les études scientifiques menées après l'accident ont permis d'améliorer peu à peu les connaissances sur les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl. A la lecture de certains articles, il est toutefois difficile de faire la part de ce qui pourrait être attribué aux retombées radioactives et de ce qui serait lié à d'autres causes indépendantes de l'accident (évolution socio-économique des pays de l'ex-URSS, changement des comportements de vie).

La plupart des résultats publiés sur les effets sanitaires de l'accident de Tchernobyl proviennent d'études descriptives, comparant des régions fortement ou faiblement exposées au moment de l'accident : ces études mettent en évidence des différences d'incidence de certaines pathologies importantes, mais ne permettent pas de conclure à une relation de causalité. De manière générale, qu'il s'agisse des leucémies, des cancers solides ou des malformations congénitales, malgré les progrès accomplis ces dernières années, des efforts doivent être poursuivis. Il faut continuer à soutenir ces registres afin de pouvoir étudier l'évolution de ces maladies dans le temps, les décrire en fonction de l'âge à l'exposition. Par ailleurs, face à une observation isolée, résultant d'une étude menée dans un ou deux oblasts, il faut être prudent avant de généraliser l'effet observé sur l'ensemble des territoires contaminés. L'analyse de certaines études étiologiques, actuellement en cours, sera une étape ultérieure, permettant de mieux estimer quelle est la part de la maladie, attribuable aux radiations.

Une synthèse très complète des études effectuées sur les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl a été effectuée et publiée en 2000 par l'UNSCEAR¹. Elle rassemble, décrit et fournit une analyse critique des articles scientifiques publiés par les différentes équipes de chercheurs et de spécialistes dans les divers domaines de la santé. Elle met en évidence, sur la base de ces études, les principaux problèmes de santé publique qui apparaissent parmi les différents groupes de populations affectées par cette catastrophe. Les études se poursuivent pour continuer de mettre à jour les effets à long terme ; elles se déroulent majoritairement dans un cadre international, afin de réunir toutes les

¹ *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Comité Scientifique des Nations-Unies pour l'Etude des Effets des Radiations)*

compétences nécessaires et d'uniformiser les approches dosimétriques dans les trois pays concernés ; elles impliquent des organismes de recherche de ces pays et de différents pays occidentaux.

1. La mortalité après l'accident de Tchernobyl

Les personnels de la centrale présents sur le site lors de l'accident et les équipes d'urgence qui se sont portées à leur secours ont été victimes de fortes irradiations. Ces personnes ont reçu en quelques heures des doses supérieures à 0,5 Gy. Vingt-huit décès sont survenus dans les jours ou semaines qui ont suivi l'accident du fait d'un syndrome d'irradiation aiguë, survenant à des doses de plusieurs Gy ; trois autres sauveteurs sont décédés à la suite de traumatismes (non liés à l'irradiation). Onze décès supplémentaires ont été enregistrés depuis sur la période 1986-1998 (UNSCEAR 2000). Huit de ces décès sont dus à des maladies n'ayant pas de lien avec les rayonnements ionisants, deux décès sont liés à une maladie précancéreuse de la moelle osseuse et un décès est lié à un cas de leucémie aiguë.

Pour le reste de la population, les doses reçues depuis 1986 sont beaucoup plus faibles et étalées dans le temps (cf. paragraphe 2) : dans ces circonstances, les risques à étudier sont des effets à long terme, principalement des cancers, qui apparaissent plusieurs années ou dizaines d'années après l'irradiation, chez une partie seulement des personnes exposées, et dont la proportion augmente en fonction de la dose reçue. Pour connaître le nombre de décès par cancers survenus ou à venir parmi les personnes exposées aux retombées de l'accident de Tchernobyl, il faudrait suivre l'ensemble de ces personnes durant leur vie entière, ce qui impliquerait de suivre individuellement plusieurs millions de personnes. Même avec un tel suivi, il serait difficile de considérer que l'exposition aux rayonnements ionisants est seule responsable d'un décès par cancer, les cancers étant des maladies pour lesquelles de multiples facteurs individuels et environnementaux interviennent.

1.1 La prédiction des risques de décès par cancer.

Les seules indications possibles pourraient venir de calculs, tenant compte

- du nombre de personnes exposées et de leur niveau d'exposition
- des connaissances acquises sur la relation dose-effet (provenant d'études autres que Tchernobyl). Pour calculer les effets aux faibles doses, l'hypothèse retenue est celle d'une proportionnalité entre les effets et les doses (loi linéaire sans seuil). Cette hypothèse, non scientifiquement démontrée aux faibles doses, conduit vraisemblablement à une valeur majorée du nombre de cas réels, dans une proportion qui ne peut pas être précisée.

S'agissant de l'accident de Tchernobyl, des prédictions de décès par cancer ont été publiées par différents experts et organismes. Ces études fournissent une fourchette de valeurs hautes et basses traduisant les incertitudes sur les connaissances et les modèles employés. Selon Anspaugh et al. (2000), les retombées de l'accident de Tchernobyl pourraient être responsables de 2 000 à 17 000 décès par cancer sur la vie entière, parmi les habitants de l'ex-URSS; ces chiffres représenteraient 0,6 à 5 % de l'ensemble des décès par cancer normalement attendus dans la même population.

Selon une publication du NRPB (*National Radiological Protection Board*, Royaume Uni), l'accident de Tchernobyl pourrait être responsable de :

- 700 décès par cancer chez les personnes évacuées de la zone interdite² (soit 2 % des décès par cancers normalement attendus dans la même population) ;
- de 2 500 à 75 000 décès par cancer pour les habitants de la partie occidentale de l'ex-URSS (risques estimés à partir des données fournies dans cette publication) ;
- de 1 000 à 3 000 décès par cancer dans les pays de l'Europe occidentale (soit moins de 0,02 % des décès par cancer normalement attendus dans ces pays).

Ces valeurs sont calculées sur la vie entière des personnes exposées.

2. Evaluation des doses reçues à la suite de l'accident de Tchernobyl

Les doses reçues à la suite de l'accident de Tchernobyl ont pu être évaluées d'une part pour certains groupes de travailleurs présents sur le site au moment de l'accident et pour ceux intervenus pour les sauver, d'autre part pour les populations venues par la suite pour nettoyer le site (« liquidateurs »), enfin pour les populations générales des régions contaminées.

Les groupes de population exposés

- Les personnels de l'installation et les équipes de secours présents sur le site pendant les premières heures de l'accident ont subi une irradiation aiguë provenant des fragments du réacteur éparpillés sur le site, du nuage et des dépôts radioactifs. Sur 237 personnes hospitalisées en raison de doses élevées, un syndrome d'irradiation aiguë a été confirmé chez 134 d'entre elles et 28 de ces personnes sont décédées.
- Les « liquidateurs » sont les personnes qui sont intervenues dans les zones les plus contaminées, soit proches du réacteur endommagé, soit dans la zone des 30 km. Leur nombre est estimé à 600 000 environ. Ils ont été exposés à des niveaux d'irradiation plus faibles que le groupe précédent, et sur des périodes plus longues. Ils n'ont été qu'exceptionnellement équipés de dosimètres individuels. Leur suivi est difficile car ils sont maintenant dispersés dans l'ensemble de l'ex-URSS.
- Parmi les 135 000 habitants de la zone des 30 km, réglementée depuis l'accident, 115 000 ont été évacués dans la première semaine. Ils ont subi, durant le rejet, une irradiation externe et, à un moindre degré, une contamination interne due à l'inhalation de poussières radioactives.
- Les habitants actuels des zones contaminées sont continuellement soumis à une irradiation externe et une contamination interne par ingestion d'aliments contaminés. Ils sont environ 1,4 million dans les zones à plus de 185 000 Bq.m⁻² (5 Ci.km⁻²) et près de 5,5 millions dans les régions où la contamination des sols est comprise entre 37 000 Bq/m² (1 Ci/km²) et 185 000 Bq/m² (5 Ci/km²). Leurs niveaux d'irradiation sont plus faibles que ceux des liquidateurs. Dans les zones les plus contaminées, environ 260 000 personnes ont quitté leur domicile, ou été relogées ailleurs.
- Le reste de la population générale de l'ex-URSS, environ 280 millions de personnes en 1991, vit sur des territoires dont le niveau de contamination en césium 137 est inférieur à 37 000 Bq/m².

² Elle correspond à une zone centrée sur la centrale, d'un rayon de 10 km.

2.1. Les travailleurs du site et les liquidateurs

Les doses reçues par les travailleurs présents sur le site au moment de l'accident et les personnels d'intervention sont dues pour l'essentiel à l'exposition externe de l'organisme, relativement uniforme dans le cas des rayonnements gamma, et plus ou moins localisée sur certaines parties du corps dans le cas des rayonnements bêta. Les doses internes liées à l'inhalation de substances radioactives ont été généralement faibles, comparées aux doses externes. Dans de nombreux cas, les dosimètres portés n'ont pas pu être exploités en raison des niveaux élevés d'irradiation. Cependant, les doses ont pu être estimées par des techniques de dosimétrie biologique (dénombrement d'aberrations chromosomiques). Les doses externes reçues par les travailleurs sont connues avec des incertitudes de l'ordre de 10 à 100% selon le niveau d'exposition. Elles s'échelonnent entre quelques centaines de mGy et plus de 10 Gy.

Les doses internes ont été estimées à partir de mesures de contamination effectuées au niveau de l'organisme entier et de la thyroïde, ou à partir d'analyses de contamination dans les urines. Des analyses post-mortem de certains tissus ont également été réalisées sur la plupart des victimes. Une vingtaine de radionucléides ont été détectés chez la plupart des victimes, mais seuls les isotopes du césium et ceux de l'iode ont été responsables de doses significatives. Les doses à la thyroïde ont parfois été plusieurs fois supérieures aux doses à l'organisme entier dues à l'exposition externe.

Les « liquidateurs », environ 600 000 personnes civiles et militaires, sont intervenus dans les premières années qui ont suivi l'accident pour effectuer diverses tâches : travaux auprès du réacteur, décontamination du site, construction du sarcophage. Une large proportion de ces 600 000 personnes, notamment en Biélorussie a reçu des doses relativement faibles, car ayant effectué des tâches de courte durée, parfois plusieurs années après l'accident. Ces « liquidateurs » ont donc subi des expositions externes et internes à des degrés divers. Les doses d'exposition externe ont été déterminées le plus souvent à partir d'une dosimétrie individuelle ou de groupe. En l'absence de dosimètres, les doses ont été estimées à partir des mesures disponibles sur les différents lieux où ont séjourné les intervenants, en tenant compte des durées de séjour correspondantes. Quels que soient les moyens utilisés, les doses sont incertaines. Selon l'UNSCEAR, la dose efficace (reçue par le corps entier) moyenne due aux rayonnements gamma, reçue pendant la période 1986-1987, est de l'ordre de 0,1 Sv (Sievert, cf. lexique). En l'absence de protection, la dose à la peau due à la contamination externe par des émetteurs bêta a pu atteindre plusieurs centaines de millisieverts. Comme les travailleurs du site et les équipes de secours, les liquidateurs ont reçu des doses internes, notamment à la thyroïde, dont le niveau reste le plus souvent faible par rapport aux doses externes.

2.2. Les populations des régions contaminées

Les radionucléides rejetés par le réacteur dans l'environnement ont donné lieu à une contamination des sols sur de vastes étendues. Les doses reçues par la population proviennent, d'une part, de l'irradiation externe due aux radionucléides déposés sur les sols, d'autre part, de la contamination interne, principalement due à la consommation de produits contaminés.

→ Doses reçues par irradiation externe

Les populations vivant dans les régions contaminées ont subi une irradiation externe liée essentiellement à des radionucléides à vie courte. Par la suite, les individus ont continué d'être exposés aux césium 137 (^{137}Cs) et césium 134 (^{134}Cs) présents dans les sols. Les populations évacuées des régions contaminées ont reçu des doses estimées à 20 mSv environ en moyenne, jusqu'à 380 mSv pour les plus exposées (UNSCEAR 2000). Toutefois, les doses sont connues avec des incertitudes relativement grandes, les niveaux de contamination des sols en radionucléides à vie courte étant estimés à partir de modèles utilisant les résultats de mesures du ^{137}Cs .

→ Doses reçues par contamination interne

Immédiatement après l'accident, les populations évacuées ont subi une exposition interne liée à l'inhalation des radionucléides à vie courte. Pour ces populations, la dose efficace moyenne par inhalation a été estimée à environ 10 mSv.

Dans les semaines qui ont suivi l'accident, c'est la thyroïde qui a été l'organe le plus exposé, à cause de l' ^{131}I présent dans les produits alimentaires et en particulier le lait. Dans les mois et années qui ont suivi, c'est la contamination des aliments par le ^{137}Cs qui est à l'origine de l'essentiel des doses internes. Celles-ci ont été estimées à partir de mesures directes sur les individus (anthroporadiamétries « corps entier », mesures de la thyroïde) ou à partir de modèles faisant intervenir des mesures de la contamination de la chaîne alimentaire. La plus grande incertitude qui existe est celle concernant les doses internes liées aux radionucléides à vie courte pour lesquels peu ou pas de mesures ont été réalisées.

Les deux paragraphes suivants présentent les estimations des doses reçues à la thyroïde et les doses efficaces pour les populations de Biélorussie et d'Ukraine les plus exposées.

➤ Doses à la thyroïde

Le calcul des doses à la thyroïde a été effectué chez 130 000 personnes résidant en Biélorussie³ à partir de mesures d'activité thyroïdienne. Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous ont été publiés par une équipe russe en 1999. Ils confirment que les doses à la thyroïde sont particulièrement élevées chez les enfants et adolescents qui résidaient au moment de l'accident dans la zone la plus contaminée, la région de Gomel au sud-est de la Biélorussie. Les doses maximales sont très élevées et se rapprochent des doses reçues lors de traitements des cancers de la thyroïde utilisant l'iode 131.

³ Toutes les personnes résidant dans les zones contaminées n'ont pas pu faire l'objet de mesures de contamination dans les semaines suivant l'accident, c'est pourquoi l'estimation des doses à la thyroïde est particulièrement difficile pour la plupart des personnes exposées.

Zones	Dose moyenne à la thyroïde (Gray)	Dose maximale à la thyroïde (Gray)	Intervalle de dose où se trouvent 80 % des enfants (Gray)
Villages évacués des zones les plus contaminées (Gomel)	1,3	50	0,18-5,4
Villages non évacués des zones les plus contaminées	0,5	57	0,08-2,4
Nord-Est de la région de Gomel	0,28	20	0,05-1,5
Ville de Gomel	0,13	7,5	0,04-0,56
Région de Mogilev	0,15	20	0,007-0,7

Doses à la thyroïde chez les enfants et adolescents de Biélorussie au moment de l'accident de Tchernobyl, dues à l'iode 131 (estimations à partir des mesures de la thyroïde)

➤ Doses efficaces dues à l'exposition interne

- Dans une étude récemment publiée portant sur la population rurale des régions contaminées du Nord de l'Ukraine, les doses sur la période 1986-1997 dues à l'ingestion de produits contaminés par le césium 137 et le césium 134 ont été évaluées à partir de mesures portant, soit sur des échantillons de lait (120 000) soit directement sur l'homme (mesures anthroporadiométriques effectuées sur 100 000 personnes). Ces analyses concernent 4 227 localités de ces régions.

Les résultats montrent que les doses efficaces liées à l'ingestion de produits contaminés cumulées sur la période 1986-1997 dans la population générale de ces zones rurales sont inférieures ou égales à 1 mSv pour 63,2 % des individus, comprises entre 1 et 10 mSv pour 26,6 %, comprises entre 10 et 100 mSv pour 10,8 % et supérieures à 100 mSv pour 0,06 %. L'analyse des écarts entre les doses réellement reçues et les doses calculées sur la base de la contamination des aliments montre que les mesures de protection ont été de moins en moins appliquées au fil du temps. L'analyse montre aussi que l'essentiel des doses reçues par ingestion proviennent du lait (Liktharev, 2000).

- Une autre étude réalisée en Ukraine (région de Narodichi) fournit une estimation des doses liées à l'ingestion de produits contaminés par le strontium 90 sur la période 1986-1998 : les doses moyennes cumulées sont de l'ordre de 0,2 mSv (maximum 1,5 mSv) et sont peu différentes dans les zones contrôlées (zones où subsistent des dépôts de césium 137 supérieurs à 37 000 Bq.m⁻²) et les zones non contrôlées (Repin, 2000).

- En Russie, une étude effectuée dans la région de Briansk a évalué les doses internes annuelles chez les enfants des zones contaminées sur la base de mesures du césium 137 incorporé réalisées entre 1991 et 1996. La dose annuelle moyenne est de 0,2 mSv. Elle dépasse 1 mSv par an pour 2 % des 26 000 enfants de l'étude (Hoshi, Health Physics, 2000).

- Une autre étude porte sur des mesures de contamination effectuées entre 1991 et 1993 sur 6000 prélèvements alimentaires et sur 250 000 personnes résidant en Russie (région de Briansk) et en Biélorussie (région de Gomel). Les doses reçues par la population sur la période 1986-1998 ont été estimées par modélisation à partir de ces mesures. Selon les localités, la dose interne moyenne varie entre 21 et 72 mSv, la dose externe entre 5 et 25 mSv et la dose totale entre 28 et 97 mSv. La dose liée au rayonnement naturel (non incluse dans les estimations précédentes) peut être estimée à 25 mSv environ sur la même période. Le fait de résider depuis l'accident dans les zones parmi les plus contaminées a donc conduit à multiplier la dose totale reçue du fait des rayonnements ionisants par 2 à 5 (Hille, Radiat. Environ. Biophys, 2000).

3. Effets sanitaires observés sur les populations des territoires les plus contaminés

3.1. Cancers solides et cancers de la thyroïde

Les études descriptives menées dans les régions les plus contaminées n'ont pas montré d'augmentation nette des tumeurs solides autres que de la thyroïde depuis l'accident de Tchernobyl. Il est nécessaire de continuer l'enregistrement des cancers dans ces trois pays, afin de décrire leur évolution à long terme : pour certains types de cancer, un temps de latence supérieur à 15 ans n'est pas à exclure.

→ Cancers de la thyroïde chez les enfants et les adolescents .

L'excès de cancer de la thyroïde a été observé dès 1990, dans les services de pédiatrie. Depuis, cet excès continue à se manifester chez les enfants et adolescents, en particulier chez ceux qui avaient moins de 5 ans au moment de l'accident. Le suivi de l'incidence des cancers de la thyroïde chez les jeunes adultes, avec une description détaillée par tranches d'âges est actuellement une priorité, car tous ceux, âgés de 5 ans et plus au moment de l'accident ont atteint en 2002 les tranches d'âge de 15 à 30 ans.

Le bilan le plus complet, décrivant cette augmentation des cancers de la thyroïde chez l'enfant a été publié en 2000 par l'UNSCEAR. Il porte sur la période de 1990 à 1998. Dans le cadre de l'initiative franco-allemande (IFA), l'IRSN travaille en étroite collaboration avec les organismes gestionnaires des registres des cancers nationaux de Biélorussie et d'Ukraine et dispose également des données de quelques registres dans les oblasts russes les plus contaminés. De ce fait, l'IRSN a actualisé les données concernant les diagnostics de cancers de la thyroïde chez les enfants de moins de 15 ans, en tenant compte des cas diagnostiqués en 1999, 2000 et 2001 (Figure 2) :

- Pour la Biélorussie, ces données sont collectées depuis 1980, grâce à l'existence d'un registre national des cancers installé bien avant l'accident de Tchernobyl. De 1990 à 1996, une forte augmentation du nombre de cancers de la thyroïde a été constatée. Le nombre de cancers de la thyroïde observés a ensuite diminué progressivement. Il faut noter que les cas de cancer diagnostiqués chez les enfants de moins de 15 ans en 2001 correspondent en fait à des enfants nés après l'accident : ces enfants ont à nouveau atteint des niveaux de risque proches de ceux observés avant 1990.

- La figure 2 décrit cette évolution aussi bien pour la Biélorussie, que pour l'Ukraine. Pour la Russie, les données recueillies concernent une population moins nombreuse et correspondent donc à un nombre de cancers plus faible.
- La figure 3 décrit à partir du registre national des cancers de Biélorussie, l'évolution du nombre de cancers de la thyroïde en parallèle pour deux tranches d'âges : ceux qui avaient moins de 15 ans et ceux qui avaient entre 15 et 29 ans au moment du diagnostic.

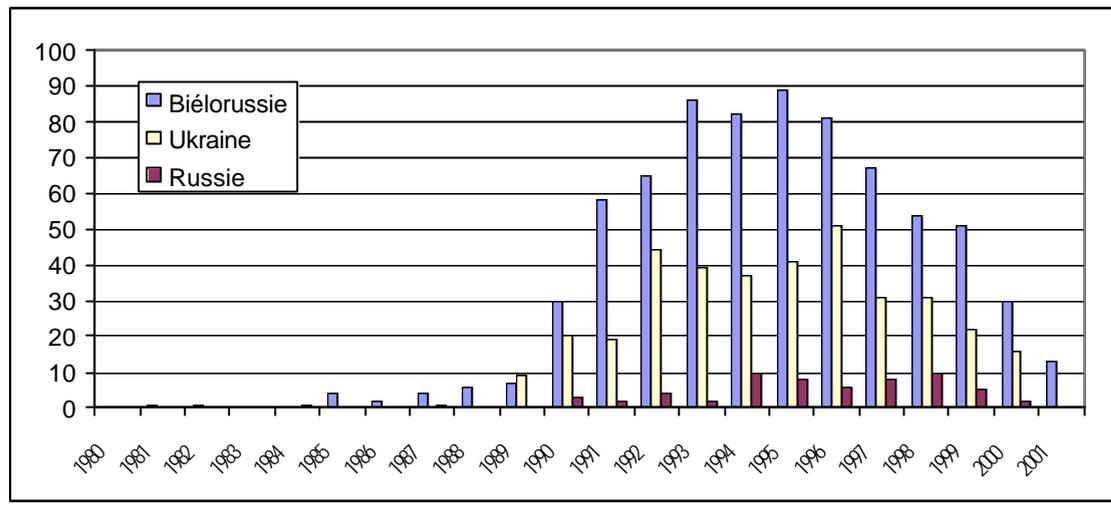


Figure 2 : Nombre de cancers de la thyroïde sur la période 1980-2001 chez les personnes âgées de moins de 15 ans au moment du diagnostic

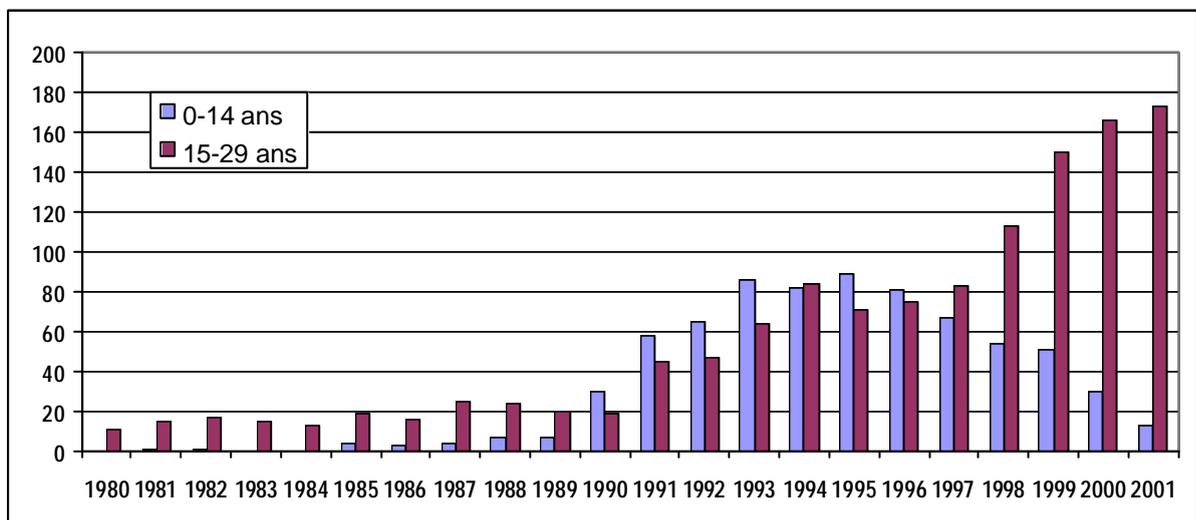


Figure 3 : Nombre de nouveaux cas de cancers de la thyroïde chez les enfants (0-14 ans) et chez les adolescents et jeunes adultes (15-29 ans) en Biélorussie, données du Registre National des Cancers de Biélorussie

Les données pour 2000-2001 doivent toutefois être considérées comme préliminaires : il faut plusieurs années aux enquêteurs du registre pour s'assurer de la qualité des données transmises.

Les évolutions observées appellent les commentaires suivants :

- Dans les deux classes d'âge considérées, les observations effectuées de 1979 à 1989 font office de valeurs de référence pour le nombre de cancers spontanés de la thyroïde observés en Biélorussie et non attribuables à l'accident de Tchernobyl, en admettant un temps de latence minimum de 3 ans. Pendant cette période, les conditions de dépistage peuvent être considérées comme comparables.
 - Dans la classe d'âge 0-14 ans, on constate une augmentation importante du nombre de cas à partir de 1990, suivie d'une diminution lente à partir de 1995. Cette diminution peut s'expliquer par le fait que d'une année sur l'autre, il existe dans cette classe d'âge de moins en moins d'enfants ayant été exposés en 1986. Ainsi, tous les enfants âgés de moins de 14 ans en 2001 sont nés au plus tôt en 1987 et n'ont pas pu être exposés à l'iode 131 émis lors de l'accident de Tchernobyl.
 - Dans la classe d'âge 15-29 ans, on observe une augmentation du nombre de cas de cancers de la thyroïde à partir de 1991, ce qui correspond aux personnes qui avaient entre 10 et 24 ans en 1986. Cette augmentation se poursuit, voire s'accroît au cours des années les plus récentes. Si on tient compte du fait qu'en 1999, la classe d'âge 15-29 ans correspond aux personnes qui avaient entre 2 et 16 ans en 1986, l'évolution observée tend à confirmer que l'épidémie de cancers de la thyroïde des enfants exposés à l'accident de Tchernobyl semble se poursuivre chez les adolescents et les adultes jeunes. L'influence d'un dépistage plus systématique durant ces dernières années est actuellement à l'étude dans le cadre de l'Initiative Franco-Allemande. Il pourrait expliquer une partie plus ou moins grande de l'excès observé.
- Une étude épidémiologique réalisée en Biélorussie en collaboration avec le *National Cancer Institute* (Etats-Unis) et publiée en 1998 a montré une forte association statistique entre la fréquence du cancer de la thyroïde chez l'enfant et l'estimation des doses à la thyroïde dues à l'exposition à l'iode 131. Aujourd'hui, une des principales difficultés est de quantifier le risque de cancer de la thyroïde en fonction du niveau d'exposition à l'iode 131, et de déterminer si d'autres facteurs (individuels, environnementaux) ont pu avoir une influence sur l'importance de ce risque. Des études de type cas témoins sont actuellement en cours, visant une estimation individuelle des différents types d'exposition. Cette estimation doit être menée de manière rétrospective à partir de diverses données recueillies par interrogatoire auprès des familles : consommations alimentaires, lieux de résidence, ...
- Un groupe international, auquel participe des épidémiologistes de l'IRSN, réalise actuellement une expertise de toutes les données disponibles, afin d'aboutir à une seule et même évaluation dosimétrique individuelle pour l'ensemble des études en cours.
- Dans ces études, il est également possible de tenir compte d'indicateurs de prédisposition familiale.

→ **Cancers de la thyroïde chez les personnes exposées à l'âge adulte**

Une augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde est constatée chez les adultes depuis le début des années 90, en Biélorussie, en Russie, et en Ukraine. L'analyse préliminaire des données du Registre des Cancers de Biélorussie montre que cette augmentation touche les tranches d'âge inférieures à 50 ans au moment de l'accident. Pour les personnes âgées de plus de 50 ans au moment de l'accident, aucun excès n'est observé. Les discussions actuelles portent sur l'importance du dépistage dans l'augmentation du nombre de cancers diagnostiqués, notamment quand on compare l'incidence des cancers entre les régions fortement et faiblement contaminées.

Dans le cadre de l'Initiative Franco-Allemande, la publication récente d'une étude réalisée dans la région de Briansk, région la plus contaminée de Russie, a permis de décrire l'incidence des cancers de la thyroïde survenus chez les adultes, âgés de plus de 15 ans au moment de l'accident (Ivanov, Health Phys, 2003). Pour chaque cas de cancer, une dose a été attribuée en fonction de la résidence au moment de l'exposition, du sexe, et de l'âge à l'exposition. La dose collective a été calculée pour chaque unité géographique par tranche d'âge et par sexe. Le rapport d'incidence standardisé qui décrit l'excès de risque dans la région contaminée est, pour la population masculine de 1,27 (Intervalle de Confiance à 95% (IC95%)=0,92-1,73) pour la période 1986-1990, et de 1,45 (IC95% 1,20-1,73) pour la période 1991-1998, et pour la population féminine, il est de 1,94 (IC95%=1,70- 2,20) et 1,96 (IC95%=1,82- 2,1) respectivement pour les deux périodes considérées.

L'excès de risque par unité de dose (par Gy) qui exprime l'augmentation du risque en fonction de l'irradiation de la thyroïde, a ensuite été estimé pour les hommes et les femmes : les résultats de cette analyse statistique concluent que l'augmentation de l'incidence observée n'a pas pu être mise en relation avec la dose d'irradiation à la thyroïde.

Cette étude repose sur une bonne qualité du diagnostic, car près de 90% des cas présente une vérification histologique. La reconstitution des doses a demandé de nombreuses validations auprès des populations. Il s'agit d'une étude où la reconstruction de la dose a été établie à partir d'une connaissance détaillée de la démographie au niveau du district. Les résultats indiquent que s'il existe un risque après exposition à l'âge adulte, ce risque est probablement faible, voir nul et ne peut être mis en évidence par des études épidémiologiques au niveau des populations concernées.

Des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer cette information ; elles sont actuellement en cours en Ukraine et Biélorussie. Elles reposent sur des populations suivies plus nombreuses que celles de Briansk; par contre, la reconstruction de la dose à la thyroïde s'avère très lente car elle doit être effectuée pour la totalité de la population nationale.

3.2. Leucémies

La plupart des études descriptives, menées à ce jour sur la population, ne montrent pas d'augmentation significative du taux des leucémies par rapport à la période antérieure à l'accident, y compris dans les zones les plus contaminées.

- Une étude descriptive sur les enfants biélorusses a été effectuée à partir des données collectées par le Centre d'Hématologie et de Transfusion Sanguine de Minsk, dans le cadre de l'Initiative Franco-Allemande. Cette étude porte sur la période 1982-1995 ; elle ne montre pas d'augmentation de la fréquence des leucémies chez l'enfant après l'accident de Tchernobyl, et ce quel que soit le niveau de contamination des régions considérées. Les résultats indiquent que la fréquence annuelle des leucémies

de l'enfant fluctue, sur la période 1982-1995, entre 2 et 7 cas pour 100 000 enfants. Ce taux est similaire à celui des registres français. La fréquence des leucémies après l'accident dans la région la plus fortement contaminée (Gomel) n'est pas significativement différente de celles des autres régions moins contaminées. Ces observations, qui ont le mérite de décrire des observations à large échelle n'excluent pas que des excès de leucémies de l'enfant puissent exister au niveau d'un oblast déterminé.

- Une étude descriptive publiée en 2001 portant sur deux régions en Ukraine, l'une contaminée et l'autre non, révèle une augmentation de l'incidence des leucémies chez les enfants exposés *in utero*, deux fois plus élevée pour la région contaminée sur la période 1987-1991 et 5,5 fois plus élevée sur la période 1992-1996, par rapport à la région non contaminée. La méthode de l'étude ne permet cependant pas de conclure que cette différence est liée à l'exposition *in utero* aux retombées de l'accident de Tchernobyl. Dès 1986, c'est-à-dire avant que ne puissent apparaître les premières leucémies provoquées par l'accident, l'écart d'incidence entre les deux régions était très important, ce qui pourrait s'expliquer par des différences dans la détection et l'enregistrement de ces maladies d'une région à l'autre.

- A la suite de cette étude, une étude cas-témoin a été publiée en 2002 : elle compare les niveaux d'exposition d'enfants âgés de moins de 20 ans au moment de l'accident de Tchernobyl et atteints de leucémies, aux niveaux d'exposition « d'enfants témoins » de même âge, de même sexe, vivant dans les mêmes oblasts et ayant un habitat comparable (Noshchenko, 2002, *Int. J. Cancer*). Cette étude a mis en évidence une augmentation nette du risque de leucémie dans le groupe d'enfants, ayant des expositions externe et interne cumulées comprises entre 10 et 100 mSv, comparativement au groupe exposé entre 0 et 1,9 mSv. Ces risques, bien qu'élevés, sont compatibles avec les estimations de risque issues d'Hiroshima et Nagasaki. Cette étude suscite quelques commentaires :

- Tous les enfants atteints de leucémie et leur entourage n'ont pas été interrogés, notamment dans le groupe des enfants atteints de leucémie aiguë de type non spécifié qui regroupe la majorité des diagnostics effectués les six premières années après l'accident.
- L'existence de biais ou d'erreurs systématiques ne peut être exclue, en particulier on imagine très bien que les familles touchées par un cas de leucémie n'ont probablement pas le même souvenir de leur comportement passé (consommation alimentaire, mode de vie des premiers jours suivant l'accident) que les familles ayant des enfants en bonne santé.
- La dose moyenne calculée à la moelle osseuse est faible, elle est de 4,5 mSv pour l'ensemble des enfants étudiés, avec 65% des enfants du groupe ayant une dose inférieure à 2 mSv.
- Sur les 272 enfants recensés atteints de leucémie, seuls 165 ont eu un diagnostic confirmé par l'histologie et seulement 98 ont pu être interrogés avant la fin de l'étude. De même tous les témoins prévus ne sont pas appariés aux cas, comme prévu dans le protocole initial. Il est étonnant que ces résultats aient été publiés avant que tous les cas et témoins aient été interrogés

Les auteurs concluent que cette étude suggère un excès de leucémie chez les enfants dans les régions de Zhytomir et Rovno, excès observé surtout chez des garçons, pour les formes aiguës de leucémies lymphoblastiques et myéloïdes. La discussion de la mise en évidence d'une relation entre cet excès et l'irradiation reçue mériterait de s'appuyer sur un plus grand nombre de cas de leucémies. Dans le futur, ces résultats doivent être comparés à ceux d'autres études cas-témoins actuellement en cours en Russie et en Biélorussie. Ces résultats sont importants pour l'estimation du risque de leucémie attribuable à l'accident de Tchernobyl.

3.3. Les affections thyroïdiennes autres que les cancers

Dans le cadre d'une coopération menée, de 1991 à 1996, par l'association japonaise Sasakawa avec la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie, environ 120 000 enfants vivant dans les zones affectées par les retombées de l'accident de Tchernobyl ont subi un dépistage médical. Une fréquence accrue de diverses pathologies thyroïdiennes a été constatée dans les régions les plus contaminées par l'accident. Le plus grand nombre de nodules de la thyroïde, bénins ou malins, a été observé dans la région de Gomel (Biélorussie), la plus contaminée. Une fréquence plus élevée de thyroïdites, affections inflammatoires de la thyroïde, a également été constatée dans cette région, de même qu'une augmentation de la fréquence des anticorps antithyroïdiens.

Les résultats de ces campagnes de dépistage semblent aussi montrer une augmentation de la fréquence de l'hypothyroïdie chez les enfants résidant dans les zones les plus contaminées par l'iode radioactif au moment de l'accident.

3.4. Les malformations congénitales

L'un des grands soucis exprimés par la population affectée par l'accident est l'éventualité d'effets sur la descendance. La crainte serait que l'irradiation subie par les enfants qui étaient en cours de gestation en avril 1986 se soit traduite, soit par des malformations à la naissance, soit par des retards mentaux.

Dans les pays de l'ex-URSS les plus exposés, un excès d'anomalies congénitales à l'issue de la grossesse est suspecté mais non confirmé. En effet, les résultats publiés par le registre de malformations de Biélorussie suggèrent une augmentation de certains types d'anomalies : polydactylies, malformations multiples. Mais les données présentées souffrent de nombreuses lacunes méthodologiques et ne permettent pas de conclure.

Une collaboration avec l'institut des Maladies Héréditaires de Minsk (Biélorussie) a débuté en 1998 associant l'IRSN, EUROCAT (European Registration of Congenital Anomalies) et l'institut européen des Génomutations (Lyon). La collaboration a pour objectif de valider les données sur les anomalies congénitales enregistrées en Biélorussie avant et après l'accident de Tchernobyl et de mettre en place d'autres études pour vérifier si des augmentations de divers types d'anomalies congénitales peuvent ou non être détectées. Dans un premier temps, une enquête réalisée sur un échantillon de maternités tirées au sort dans des régions plus ou moins contaminées a permis de déterminer que la qualité de l'enregistrement des anomalies congénitales par le registre était identique dans les zones contaminées et non contaminées au cours du temps. L'étude dans le temps et l'espace de la fréquence à la naissance de l'ensemble des anomalies surveillées n'a pas montré d'augmentation dans les zones les plus contaminées après l'accident. Le recueil début 2003 de données plus fines sur l'implantation géographique des populations doit permettre d'approfondir cette étude.

3.5. Autres problèmes de santé

Une enquête nutritionnelle a été réalisée en 2000 dans le cadre de l'Initiative Franco-Allemande sur un échantillon représentatif de la population générale résidant dans les territoires contaminés et non contaminés du Nord de l'Ukraine. Un questionnaire nutritionnel a été rempli pour 430 enfants et un examen du taux d'hémoglobine dans le sang a pu être effectué chez 361 d'entre eux.

L'analyse de ces derniers révèle une prévalence de l'anémie très élevée : la moitié environ des enfants de moins de 4 ans et un quart environ des enfants âgés de 4 à 6 ans avaient une anémie. Ces résultats sont observés quel que soit le niveau de contamination des zones considérées.

4. Conséquences sur la population des « liquidateurs »

Après l'accident, des mesures d'urgence ont été prises pour maîtriser les rejets radioactifs, dégager les décombres du réacteur, construire le « sarcophage », déblayer, décontaminer, construire des routes, enfouir les débris divers... Ces interventions ont été menées entre 1986 et 1990 par de très nombreux « liquidateurs » comprenant des opérateurs de la centrale, des sapeurs-pompiers, des militaires et des civils. Ces intervenants n'ont été que rarement équipés de dosimètres. Ils ont été recensés dans des fichiers, leur nombre est estimé à plusieurs centaines de milliers, mais leur activité et leur exposition ont pu être très variées. A la fin de 1990, la notion de liquidateur s'étendait à toute personne ayant travaillé à un moment donné dans la zone des 30 km autour de la centrale.

Le suivi médical des « liquidateurs » est difficile car ils sont de nationalités différentes (russes, ukrainiens, estoniens...) et sont éparpillés dans les républiques issues de l'ancienne Union soviétique.

Les deux groupes les plus particulièrement étudiés sont celui des « liquidateurs » estoniens (4 833 personnes) et celui des « liquidateurs » russes (environ 168 000 personnes). Des excès de leucémies et de cancers de la thyroïde ont été rapportés en 1997 chez les « liquidateurs » russes, mais ne sont actuellement pas confirmés. Chez les « liquidateurs » estoniens, la seule observation particulière qui a été établie est un taux de suicide nettement plus important que celui rencontré dans la population générale.

4.1. « Liquidateurs » estoniens

Dans le cadre d'une étude commune du *National Cancer Institute* (Etats-Unis) et d'équipes de recherche suédoise, finlandaise et estonienne, la cohorte des « liquidateurs » estoniens a été reconstituée de façon quasi complète : elle comporte 4833 hommes. Les doses officielles des « liquidateurs » estoniens, reçues en plusieurs semaines ou plusieurs mois, atteignent jusqu'à 605 mSv. La moyenne est de 109 mSv et des doses supérieures à 250 mSv sont attribuées à 1,4% des membres de la cohorte.

Pour vérifier l'ordre de grandeur des doses cumulées réellement reçues, des bio-indicateurs dosimétriques ont été étudiés : il s'agit de mesures sur des cellules sanguines permettant de détecter divers types d'anomalies dont on sait qu'elles peuvent être induites par les rayonnements ionisants. Les résultats obtenus suggèrent que la dose moyenne reçue par les « liquidateurs » estoniens est probablement peu supérieure à 100 mSv.

Afin de vérifier cette estimation, une nouvelle étude a été menée en 1998 (Littlefield, Radiat Res, 1998) sur 118 « liquidateurs » estoniens dont la dose moyenne officielle était de 103 mGy (dose maximale 250 mGy). Des techniques modernes (« fluorescence in situ par hybridation » ou FISH) ont été utilisées pour repérer et compter, sur les chromosomes de lymphocytes prélevés chez ces personnes, des anomalies chromosomiques dont on sait qu'elles peuvent être radio-induites. Alors que les auteurs de l'étude s'attendaient à mettre en évidence une augmentation de 40 % à 65 % de ces anomalies, les résultats ont montré que la fréquence de ces anomalies était inférieure à celle de 50 sujets témoins, non exposés. Ces résultats permettent de penser que les doses officielles des liquidateurs ont plutôt été surestimées.

Sur la période 1986-1993, on n'observe ni augmentation des cancers ni augmentation de la mortalité globale dans ce groupe. Par ailleurs, aucune association entre les indicateurs d'exposition aux rayonnements ionisants et la fréquence des nodules bénins de la thyroïde n'a été constatée.

En revanche, un excès de suicides (50 % par rapport à la population) est signalé. Chez ces « liquidateurs », le suicide est la troisième cause de mortalité après les accidents et empoisonnements et les maladies de l'appareil circulatoire.

4.2. «Liquidateurs» russes et ukrainiens

Le groupe des « liquidateurs » russes a été reconstitué à partir du Registre National Russe Médical et Dosimétrique. En 1992, 284 000 « liquidateurs » y étaient enregistrés mais en janvier 1996, le registre ne contenait des informations que sur 168 000 d'entre eux, les autres étant perdus de vue. Sur l'ensemble, environ 78 000 sont intervenus sur le site en 1986, 59 000 en 1987 et 31 000 entre 1988 et 1990. La dose moyenne due à l'irradiation externe reçue par cette cohorte, calculée à partir des données officielles, est de 108 mSv (4,2 % des « liquidateurs » ayant reçu plus de 250 mSv).

20% des liquidateurs ukrainiens ayant travaillé en 1986 a reçu une dose supérieure à 250 mSv et 2 % de ceux ayant travaillé en 1987 a reçu une dose dépassant les 250 mSv. Mais un nombre important de ces liquidateurs ne portaient pas de dosimètre et leur dose est manquante dans le fichier officiel.

Pour la période 1990-1993, un excès de leucémies a été mentionné dans le groupe des « liquidateurs » russes, par comparaison à la population générale masculine. Ce résultat a ensuite été démenti par les mêmes auteurs qui ont refait leur analyse avec une méthode plus rigoureuse.

Une analyse préliminaire de la mortalité des liquidateurs résidant en Russie a été récemment publiée (Ivanov, Health Phys, 2001). L'étude effectuée à partir des données du Registre National Russe Médical et Dosimétrique, concerne environ 66 000 liquidateurs avec des doses comprises entre 50 et 300 mSv. Elle montre une sous mortalité pour l'ensemble des causes de décès considérées ainsi que pour

l'ensemble des cancers. Elle retrouve néanmoins un excès de risque relatif par cancer d'environ 2 par Sv compatible avec les résultats de la cohorte d'Hiroshima et Nagasaki.

Les pathologies digestives chez les travailleurs de la centrale et chez les liquidateurs

Des pathologies digestives, caractérisées par l'apparition de diarrhées aiguës et de fibroses en phase tardive, peuvent être observées à la suite d'une irradiation de l'intestin à forte dose. Il est donc pertinent d'étudier quel est l'impact, sur le plan digestif, de l'accident de Tchernobyl chez les personnes les plus fortement irradiées.

Concernant ces personnes fortement irradiées, une base de données (ICDREC, *International Computer Database for Radiation Exposure Case Histories*) est tenue à jour par un groupe de recherches de l'Université d'Ulm en Allemagne (*Institute of Occupational and Social Medicine*). Cette base regroupe les données de suivi clinique de 134 victimes de l'accident de Tchernobyl ayant développé un syndrome aigu d'irradiation. L'apparition de troubles digestifs a été observée chez 42 d'entre elles.

Concernant les liquidateurs et la population locale, des registres (notamment le Registre National Russe Médical et Dosimétrique) ont été mis en place pour regrouper les données dosimétriques et celles sur le suivi médical. L'ensemble de ces informations est en cours d'exploitation. Mais à ce jour, pour ces groupes de population, il n'y a pas d'élément permettant d'affirmer l'existence de conséquences au niveau digestif.

5. Conséquences sur les populations du reste de l'Europe

A ce jour, aucune évolution des cancers solides et des leucémies pouvant être attribuée à l'accident de Tchernobyl n'a été constatée en Europe. Compte tenu des faibles niveaux des doses moyennes reçues par les populations, la détection d'excès éventuels de cancers radio-induits serait, en tout état de cause, difficilement réalisable.

5.1. Leucémies et cancers chez l'enfant

→ Grèce, Allemagne

La revue Nature a publié en 1996 un article qui constatait une augmentation de 160 % des leucémies chez les enfants âgés de moins d'un an en Grèce et nés dans l'année suivant l'accident. Les auteurs attribuaient cette augmentation à l'exposition en cours de grossesse aux retombées de l'accident de Tchernobyl. Une étude similaire réalisée en ex-RFA, et publiée en mai 1997 dans la même revue, a aussi constaté un excès de 50 % de leucémies dans un groupe équivalent d'enfants allemands. Mais, dans le cas de l'Allemagne, les auteurs ont écarté tout lien avec les retombées de l'accident de Tchernobyl.

Deux remarques peuvent être faites concernant les études grecque et allemande :

- Les résultats de l'étude grecque ne sont pas retrouvés dans une étude réalisée à l'échelle européenne par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) et dans d'autres études effectuées dans des pays où les niveaux de contamination ont été plus importants, notamment en Europe de l'Est et en Europe centrale.
- Les doses reçues en cours de grossesse sont faibles (inférieures à 0,1 mSv) ; il est donc peu probable qu'un excès de leucémies attribuable aux rayonnements ionisants puisse être observé chez l'enfant dans ces conditions.

→ Suède

En Suède, une étude des cancers sur la tranche d'âge 0-19 ans a été effectuée pour la période 1978-1992 dans les six comtés les plus contaminés après l'accident de Tchernobyl. La dose sur la première année après l'accident varie entre 1 et 4 mSv, alors que, sur l'ensemble de la Suède, la dose individuelle moyenne sur 50 ans, due à l'accident de Tchernobyl, est évaluée à 0,7 mSv.

746 cas de cancers ont été enregistrés, dont 203 tumeurs cérébrales et 151 leucémies aiguës. La fréquence des tumeurs cérébrales augmente sur toute la période 1978-1992 de façon significative, mais ce phénomène est observé depuis 30 ans en Suède ainsi qu'aux Etats Unis.

Il n'y a pas d'augmentation nette sur la période après l'accident. L'incidence des leucémies aiguës a diminué sur la période 1978-1992, sans relation avec le niveau d'exposition dû à l'accident de Tchernobyl. Cette étude confirme les résultats d'autres études réalisées en Suède et en Finlande.

→ Grande-Bretagne

Une étude écologique a recensé tous les cas de cancers de la thyroïde diagnostiqués entre 1968 et 1997 chez les enfants et les adultes âgés de moins de 25 ans, à partir du registre qui couvre toute la moitié nord de l'Angleterre [Cotterill, Eur J Cancer, 2001]. L'incidence des cancers a été comparée avant et après l'accident. Les résultats montrent qu'entre les deux périodes, l'incidence a été multipliée par 2,7 de façon non significative chez l'enfant et par 2,2 de façon significative chez les adultes jeunes. Par ailleurs, dans la région de Cumbria (la plus exposée aux retombées de l'accident) l'augmentation est de l'ordre de 12. Bien que les auteurs concluent à une compatibilité de l'augmentation de l'incidence des cancers de la thyroïde avec les retombées de l'accident de Tchernobyl, cette étude souffre de lacunes préjudiciables à la qualité des résultats:

- L'excès observé sur l'ensemble de la région est comparé à celui de la région de Cumbria qui semble lui-même davantage reposer sur une sous incidence dans la période pré-accidentelle (1 seul cas de cancer, incidence de 0,36 cas par million contre 1,33 par million sur l'ensemble de la zone) que sur une augmentation dans la période post accidentelle.
- Il s'agit d'une étude écologique ne permettant aucune interprétation de causalité.
- Aucun temps de latence pour le développement des cancers n'a été pris en compte ce qui fait que des cancers diagnostiqués en début de période post-Tchernobyl pourraient être imputables à la période pré-Tchernobyl et de ce fait, diminuer l'importance de l'augmentation observée.

5.2. Anomalies congénitales

- L'analyse des données de surveillance des anomalies congénitales de 16 registres, principalement d'Europe de l'Ouest, menée par une équipe anglaise (Dolk, International Journal of Epidemiology, 1999) montre que l'accident de Tchernobyl n'a pas eu d'impact détectable sur la fréquence des anomalies congénitales en Europe de l'Ouest.

L'analyse a porté sur 302 cas de trisomie 21 (diagnostiquée de façon fiable et pouvant être liée à un effet mutagène) détectés parmi des naissances ayant eu lieu entre février 1987 et janvier 1988 (cohorte considérée comme exposée) et 710 cas détectés parmi les naissances ayant eu lieu entre février 1988 et janvier 1990 (cohorte considérée comme témoin). Aucune augmentation de la fréquence des trisomies 21 n'a été constatée dans la cohorte exposée alors qu'une augmentation significative de 20 % a été constatée dans la cohorte témoin, mais uniquement dans les zones faiblement ou moyennement contaminées. Il est peu probable que cette augmentation soit due aux retombées de l'accident de Tchernobyl. Aucune augmentation des anomalies du système nerveux central et de l'œil, pour lesquelles une association avec l'exposition *in utero* a été observée dans d'autres circonstances (Hiroshima et Nagasaki, doses élevées), n'a été constatée.

- Une étude a été effectuée en Bavière par une équipe d'épidémiologistes de l'Office Fédéral de Radioprotection sur la fréquence des malformations congénitales à la naissance, entre 1984 et 1987. L'analyse des données collectées dans des hôpitaux dotés d'unités de pédiatrie, de chirurgie pédiatrique et de cardiologie pédiatrique ne montre pas d'excès d'anomalies congénitales en rapport avec l'exposition aux rayonnements ionisants.

- Une étude effectuée par une équipe allemande (Scherb, International Journal of Epidemiology, 1999) sur l'évolution dans le temps de la proportion d'enfants mort-nés parmi les naissances a été menée à partir des données statistiques publiées pour différents pays d'Europe entre 1982 et 1992. Elle indique que la proportion d'enfants mort-nés est en constante diminution depuis 1982 quelles que soient les zones géographiques considérées dans l'étude (« zone ouest » : Belgique, France, Grande Bretagne, Irlande, Luxembourg, Portugal, Espagne ; « zone centrale » : Autriche, Danemark, Allemagne, Italie, Norvège, Suisse ; « zone Est » : Grèce, Hongrie, Pologne, Suède).

Pour la zone la plus à l'est, c'est-à-dire la plus exposée aux retombées de l'accident de Tchernobyl (cependant les pays les plus exposés tels que la Biélorussie et l'Ukraine ne sont pas inclus dans cette étude), on note une augmentation relative de la proportion d'enfants mort-nés en 1986 et 1987, la diminution observée dans les années précédentes reprenant à partir de 1988. Les résultats de cette étude doivent cependant être interprétés avec prudence, selon les auteurs, car la méthode employée (étude de données groupées) ne permet pas de conclure à une relation causale avec les retombées de l'accident de Tchernobyl. D'autres facteurs pourraient expliquer ce résultat, notamment une discontinuité dans l'amélioration de la prise en charge médicale des grossesses dans la zone considérée.

Afin d'étudier les conséquences des retombées de l'accident de Tchernobyl, une étude de l'issue des grossesses a été réalisée en Finlande [Auvinen, Environ Health Perspect, 2001]. Les expositions ont été estimées à partir d'une campagne de mesure réalisée au niveau national. Des augmentations d'un facteur 4 ont été trouvées dans les zones les plus contaminées, la radioactivité était augmentée d'un facteur 4 comparativement à la période précédant l'accident. Les doses moyennes cumulées par les individus dans les deux années qui ont suivi l'accident ont été estimées entre 0,4 et 1 mSv. Un suivi dans le temps du taux de naissances vivantes, de morts nés et d'interruptions de grossesse a été réalisé **sur une période débutant avant l'accident de Tchernobyl**. Les auteurs ont observé une

diminution du taux de naissances vivantes et une augmentation du taux d'interruptions de grossesse sur indication médicale à travers tout le pays sans rapport avec le niveau de contamination des différentes zones. En revanche une tendance à l'augmentation du taux d'avortements spontanés a été notée après l'accident dans les zones les plus contaminées. Les auteurs interprètent leurs résultats avec prudence car :

- il s'agit d'une étude écologique dans laquelle les doses individuelles n'ont pas été calculées et les facteurs de confusion potentiels n'ont pas pu être pris en compte,
- des résultats identiques n'ont pas été trouvés dans les pays les plus contaminés par les retombées de l'accident,
- pour des niveaux d'exposition correspondant à un doublement de la radioactivité naturelle, de tels effets n'ont pas été observés.

6. Actions de l'IRSN autour de Tchernobyl

En collaboration étroite avec le Département de l'Energie américain (DOE) et le *National Cancer Institute* (NCI, Etats-Unis), ainsi qu'avec le centre ukrainien de recherche en médecine des radiations (RCRM) un protocole d'étude épidémiologique a été établi afin d'estimer les facteurs de risque des leucémies ou lymphomes chez les « liquidateurs » ukrainiens. L'étude de faisabilité a été concluante et une étude de type cas-témoin est en cours à partir du Registre d'Etat de Tchernobyl qui contient les dossiers d'environ 200 000 « liquidateurs », après validation des données médicales au niveau régional.

Deux projets comparables, soutenus par l'Union Européenne sous la responsabilité scientifique du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) de l'OMS, ont été mis en place en Biélorussie et en Russie. Les experts de l'IRSN y participent, notamment dans le cadre d'un groupe international visant une évaluation dosimétrique individuelle pour l'ensemble des études en cours.

L'objectif général du projet "Santé" mené dans le cadre de l'Initiative Franco-Allemande pour Tchernobyl (IFA) est de valider les données engrangées depuis plusieurs années dans différentes bases, de décrire et harmoniser les méthodes employées pour les constituer et de favoriser la diffusion des résultats auprès des scientifiques et surtout auprès du public et des populations affectées par l'accident.

Les cancers de la thyroïde

Qu'est-ce que la glande thyroïde ?

La glande thyroïde fabrique les hormones thyroïdiennes qui permettent de réguler la pression sanguine, la fréquence cardiaque et la température du corps. Les hormones thyroïdiennes sont aussi indispensables pour assurer la croissance et le développement des enfants. La glande thyroïde utilise l'iode, un élément minéral qui se trouve dans l'alimentation, pour fabriquer les hormones thyroïdiennes.

Quels sont les symptômes de cancer de la thyroïde et comment est-il détecté ?

Le symptôme le plus fréquent est le nodule qui peut être senti ou palpé au niveau du cou. Les autres symptômes sont rares, en particulier, la douleur est rarement présente au début de la maladie. Le médecin peut détecter un cancer de la thyroïde en palpant le cou et sentir un nodule ou des ganglions cervicaux. Une échographie permet aussi de détecter et de confirmer la présence d'un nodule au niveau de la thyroïde. Tous les nodules ne sont pas cancéreux : il s'agit le plus souvent de kystes ou de tumeurs bénignes.

Comment traite-t-on un cancer de la thyroïde ?

La chirurgie constitue la base majeure du traitement. Elle est habituellement suivie d'un traitement complémentaire par de l'iode 131 à forte dose qui permet d'éliminer les cellules cancéreuses qui ne l'auraient pas été par la chirurgie et d'éviter que se produisent des métastases. La plupart des cas de cancer de la thyroïde ont un excellent pronostic lorsqu'ils ont été correctement traités. Cependant, les patients doivent ensuite suivre un traitement pour remplacer les hormones thyroïdiennes et être suivis au plan médical pendant de nombreuses années.

Quelles sont les causes du cancer de la thyroïde ?

- Une étude internationale a été publiée dans la revue «Cancer, Cause & Control » en 1999 sur les facteurs favorisant le risque de cancer de la thyroïde. Elle réunit les données recueillies dans 14 études épidémiologiques : 4 aux Etats Unis, 8 en Europe et 2 en Asie. Les résultats montrent que les antécédents de goitre ou de nodules bénins de la thyroïde constituent des facteurs de risques importants pour la survenue ultérieure d'un cancer de la thyroïde. Par exemple, ce risque est multiplié par 6 et par 38 respectivement chez les femmes et les hommes ayant un antécédent de goitre ; il est multiplié par 30 chez les femmes ayant un antécédent de nodule bénin de la thyroïde.
- Par ailleurs, l'exposition, durant l'enfance, à des rayonnements ionisants constitue aussi un facteur de risque bien établi de ce cancer. Dans les années 50, de nombreux enfants ont été traités par des rayons X pour des affections des amygdales, du thymus ou pour des affections parasitaires du cuir chevelu. Ils ont subi, durant ces traitements, une irradiation de la thyroïde : les études épidémiologiques ont montré que le risque de développer plus tard un cancer de la thyroïde était augmenté pour des doses de rayons X à la thyroïde de l'ordre de 100 mGy . A des doses inférieures, une augmentation du risque n'a pas été observée mais ne peut pas être exclue.
- Des études ont aussi été réalisées pour évaluer le risque de cancer lors d'expositions, dans l'enfance, à l'iode 131. Elles ont porté sur des enfants exposés aux retombées des tests atmosphériques d'armes nucléaires réalisés aux Etats Unis dans les années 50, par exemple dans le Nevada, ou encore sur des enfants soignés avec de l'iode 131. Ces études n'ont, pour le moment, pas permis de conclure à l'existence ou l'absence d'une augmentation de risque de cancer thyroïdien chez ces enfants. Une étude épidémiologique a été menée chez des enfants qui résidaient près du site nucléaire américain de Hanford. Ils ont reçu des doses à la thyroïde de l'ordre de 190 mGy à la suite de contaminations internes par de l'iode radioactif. Cette étude n'a pas mis en évidence d'augmentation significative du risque.

Les études en cours dans les pays les plus contaminés par l'iode 131 à la suite de l'accident de Tchernobyl (Biélorussie, Russie, Ukraine) sont donc très importantes. Elles devraient notamment permettre de mieux comprendre l'importante augmentation de la fréquence du cancer de la thyroïde constatée dans ces pays.

Intérêt de l'épidémiologie post-Tchernobyl

La réalisation d'études épidémiologiques à la suite de l'accident de Tchernobyl a deux justifications importantes :

- le souci d'améliorer les connaissances sur les effets des rayonnements ionisants et d'une catastrophe de cette ampleur ;
- la nécessité d'informer sur les effets sanitaires et médicaux à court, moyen et long termes les populations directement victimes ainsi que les autorités qui ont à répondre à leurs interrogations.

Les connaissances actuelles sur les effets des rayonnements ionisants chez l'homme viennent essentiellement des études épidémiologiques effectuées chez les survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki. Cependant ces études ont certaines limites :

- elles ne fournissent des informations que sur les effets d'expositions quasi instantanées à des doses élevées et non sur ceux des expositions à de faibles doses (< 100-200 mSv) comme dans les territoires contaminés par l'accident de Tchernobyl ;
- la population japonaise d'Hiroshima et de Nagasaki présente des caractéristiques spécifiques par rapport aux autres populations (mode de vie, fréquence de certaines tumeurs...).

L'étude des populations victimes de l'accident de Tchernobyl devrait notamment permettre d'améliorer les connaissances scientifiques sur les effets d'expositions à de faibles doses et les interactions des rayonnements ionisants avec d'autres facteurs (environnementaux ou génétiques).

Par ailleurs, informer le public et gérer les conséquences de l'accident sur la santé nécessitent de recourir à la fois à l'épidémiologie descriptive et à l'épidémiologie analytique.

Les études descriptives étudient l'évolution des fréquences de certaines maladies dans le temps et leurs variations dans l'espace. Elles fournissent un ordre de grandeur des problèmes de santé publique après un accident et donnent l'alerte sur des problèmes non prévus. Après l'accident de Tchernobyl, les études descriptives ont porté sur les différents types de cancers et les anomalies congénitales.

Les études analytiques contribuent à établir des relations de cause à effet entre un facteur et une maladie. Leur mise en œuvre requiert la collecte de données individuelles. Pour fournir des résultats interprétables lors d'expositions à de faibles doses, elles doivent respecter un certain nombre de conditions :

- couvrir un nombre important de personnes ;
- recenser les cas de maladie de façon complète ;
- être fondés sur des estimations de doses individuelles les plus précises possibles.

Les études analytiques en cours après l'accident de Tchernobyl concernent essentiellement :

- l'épidémie de cancers de la thyroïde initialement détectée chez les enfants dans les populations de Biélorussie, d'Ukraine et de Russie : les études devraient permettre de mieux préciser le potentiel carcinogène de l'iode 131 chez l'homme et le rôle des interactions avec l'environnement (carence iodée) et les facteurs de sensibilité individuelle (facteurs génétiques par exemple) ;
- la population des « liquidateurs » pour laquelle les effets d'expositions à faibles débits de dose et à des types de rayonnements différents devraient pouvoir être mieux appréhendés.

Le Programme CORE

Le programme CORE (Coopération pour la Réhabilitation) a été engagé par le Comité Tchernobyl de Biélorussie avec différents acteurs internationaux. Un grand nombre d'institutions biélorusses, françaises et internationales dont l'IRSN ont d'ores et déjà manifesté leur intérêt à s'impliquer dans la mise en œuvre et le financement de CORE. Ce programme doit participer au contrôle et au suivi de la santé des personnes, de la production agricole et de l'environnement des populations de 15 villages dans 4 districts contaminés de Biélorussie. Ce programme concerne :

-le développement économique et social des zones rurales contaminées par la mise en œuvre d'actions d'accompagnement des producteurs privés, notamment la mise en place de micro-crédits.

-le suivi sanitaire des populations qui sera assuré par l'IRSN et Médecins du Monde comporte deux parties :

■ **un programme de suivi sanitaire des enfants** vivant dans les territoires contaminés prévoit de mettre à la disposition des professionnels de santé locaux, des moyens diagnostic performants pour faire un bilan de santé des enfants, en collaboration avec des experts médicaux biélorusses et internationaux de différentes disciplines (cardiologie, gastro-entérologie, hématologie, endocrinologie, ..). Le bilan de santé portera sur les pathologies connues pour être induites par l'exposition aux rayonnements ionisants (problèmes thyroïdiens et hématologiques, cataracte...), mais également sur d'autres pathologies (troubles du rythme cardiaque, gastrites/ulcères, déficits immunitaires....) dont l'incidence a augmentée ces dernières années d'après les médecins locaux. Ce programme sera mis en œuvre dans le district de Chechersk, il est envisagé de l'étendre ensuite au district de Bragin et à un district non contaminé, avec les mêmes caractéristiques socio-économiques, qui servirait de référence. Le premier objectif est de faire bénéficier d'un bilan de santé tous les enfants de ce district au cours de l'année 2004.

En parallèle, une étude rétrospective des données dosimétriques individuelles sera effectuée dans le but d'évaluer le niveau de contamination de chaque enfant. Pour chaque enfant, les données sanitaires et dosimétriques seront mises en relation et analysées par des épidémiologistes afin de déterminer si la contamination chronique par le césium pourrait avoir joué un rôle dans les pathologies observées

■ **un programme d'éducation des femmes enceintes.**

Il est envisagé de compléter les sessions de formation prévue pour les femmes enceintes (accouchement, allaitement, ...) par un module de radioprotection pratique, l'objectif étant d'informer les femmes enceintes sur les moyens de limiter la contamination radioactive. Cette formation sera mise en œuvre à l'hôpital du district de Stolin ; ensuite, en fonction des résultats du bilan, elle pourrait être étendue à d'autres districts.

-le développement et la transmission patrimoniale et intergénérationnelle d'une culture radiologique de la mémoire de l'accident de Tchernobyl et de ses conséquences pour l'homme à travers des actions auprès notamment des écoles et clubs des villages.

Le programme CORE doit démarrer au second semestre 2003.

LE PROGRAMME ENVIRHOM : EFFETS SUR LES POPULATIONS DES EXPOSITIONS CHRONIQUES AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Les suites de l'accident de Tchernobyl ont mis en lumière les conditions particulières d'exposition de populations vivant dans des territoires contaminés et ont conduit à identifier de nouvelles préoccupations de santé publique et de radioprotection. L'IRSN, déjà présent en Ukraine, Biélorussie et Russie dans le cadre de plusieurs programmes (radioprotection, radioécologie, sûreté...), a élargi et orienté ses recherches en vue de répondre aux nouvelles préoccupations identifiées et de renforcer ainsi sa capacité d'expertise sur les conséquences de situations accidentelles.

Aujourd'hui les populations qui vivent dans les territoires contaminés de la région de Tchernobyl sont exposées aux rayonnements, principalement du fait de l'ingestion d'aliments contaminés par le césium.

Ce type d'exposition (durées d'exposition longues, niveaux faibles, voie d'atteinte interne) est différent de celui qui a servi à élaborer le système de radioprotection actuel, fondé sur l'extrapolation des effets observés sur les survivants des explosions nucléaires d'Hiroshima et de Nagasaki (expositions de courte durée, voie d'atteinte externe principalement).

La question des expositions prolongées à de faibles doses a ainsi pris une ampleur particulière au cours des dernières années. Elle s'accompagne d'une demande croissante du public de mieux connaître les effets d'une l'exposition chronique non seulement pour les groupes de population importants vivant dans les territoires contaminés mais aussi pour ceux qui sont exposés aux rejets de routine des installations nucléaires dans des contextes de multi-pollutions

Dans ce contexte, l'IRSN a lancé le programme expérimental ENVIRHOM. Son objectif est d'étudier les phénomènes de bio-accumulation dans les écosystèmes et chez l'homme, dans des situations d'exposition chronique à des radionucléides présents dans l'environnement à faibles niveaux, dans un contexte de multipollutions.

Dans les tissus et les cellules, les mécanismes de bio-accumulation pourraient, en effet, conduire à des concentrations localement très importantes de radionucléides et, en conséquence, à des réponses biologiques particulières d'un groupe cellulaire, susceptibles d'induire des anomalies fonctionnelles ou des lésions. Tant pour ce qui concerne l'homme que l'environnement, les réponses aux questions correspondantes ne sont pas aujourd'hui connues avec précision, la grande majorité des données disponibles correspondant à des études faites à fortes doses de rayonnements, pour des expositions à court terme en dehors d'un contexte de multipollutions.

Les programmes de recherche de l'IRSN, notamment ENVIRHOM, constituent en matière d'environnement et de santé publique, un enjeu pour les années à venir.

Chapitre 3 :

L'environnement de Tchernobyl et la gestion des territoires contaminés

- *Dix-sept ans après l'accident, une grande partie des produits agricoles cultivés dans les territoires contaminés est en dessous des limites de contamination fixées par les autorités ukrainiennes, grâce aux contre-mesures appliquées, mais il reste un nombre important de fermes qui ont une production dont la contamination est encore significative.*
- *Début 2001, en Ukraine, 2217 agglomérations sont encore soumises à des contrôles radiologiques. Sur la base des mesures effectuées en 1997 et de la réglementation portant sur les zones contaminées en vigueur depuis 1991, 1316 de ces agglomérations devraient rester soumises à des contrôles radiologiques, le reste (901) devant être libéré de tout contrôle.*
- *Dans le cadre de l'Initiative Franco-Allemande, l'IRSN mène un projet « Radioécologie » dont l'objectif est de rassembler dans une base de données informatique les données relatives à la situation radiologique de l'environnement dans les territoires contaminés ainsi que celles relatives aux stockages de déchets, aux transferts de contamination vers les plantes et les animaux, aux contre-mesures appliquées en milieu urbain et agricole.*
- *Depuis 1996, l'IRSN poursuit un programme d'étude sur le comportement des radionucléides dans les sols à proximité de la centrale de Tchernobyl. Ce programme contribuera à améliorer la prévision de l'évolution de la contamination autour de la centrale accidentée, qui pourrait en particulier induire une contamination de la nappe phréatique.*



*Photo©Patrick Landman
La ville abandonnée de Prypiat*

La nature et les niveaux de contamination dans tous les milieux de l'environnement sont désormais bien connus pour les régions les plus touchées par les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl, en Biélorussie, en Russie et en Ukraine. Des cartes nationales et régionales ont été établies et de nombreuses études radioécologiques ont été menées, pour une grande part financées par les organisations internationales et notamment l'Union Européenne. Les informations rassemblées permettent de mieux comprendre le comportement de la radioactivité dans l'environnement et les processus de transfert des principaux radionucléides : césium 137, strontium 90, isotopes du plutonium.

1. Contamination de l'environnement et gestion des populations

1.1. Inventaire de la radioactivité présente

→ Le césium

Environ 80 000 térabecquerels¹ de césium 137 (¹³⁷Cs), soit 30 % à 40 % de l'inventaire du cœur du réacteur accidenté, ont été rejetés dans l'atmosphère. Une partie de cette activité s'est déposée sur les sols à proximité du site accidenté. Dans la zone d'exclusion (cf. paragraphe 1.3), l'activité des sols en ¹³⁷Cs est de plusieurs dizaines de becquerels (Bq) par gramme, soit plusieurs millions de Bq par m². Les « points chauds » présentent des activités qui peuvent être dix fois plus élevées. Le césium 137 est à l'origine de plus de 90% de l'irradiation externe reçue par les travailleurs de la zone d'exclusion.

Au-delà de cette zone d'exclusion, jusqu'à deux ou trois cents kilomètres vers le nord et le nord-ouest de la centrale, les concentrations maximales en ¹³⁷Cs sont d'environ 10 Bq/g de sol. Au sud et à l'est du site de Tchernobyl, à quelques dizaines de kilomètres du réacteur, elles sont nettement plus faibles, inférieures au becquerel par gramme.

La quasi-totalité des dépôts de césium se retrouve actuellement dans les quinze premiers centimètres du sol. La migration en profondeur du césium est très faible et sa disparition de la surface des sols est très lente ; elle s'effectue essentiellement au rythme de la décroissance radioactive (le césium 137 décroît naturellement de moitié tous les 30 ans) et par lixiviation (lessivage) des sols.

La lixiviation des sols est provoquée par le ruissellement des eaux (eaux de pluie, eaux de crue et fonte des neiges) qui entraîne une certaine proportion des particules radioactives déposées à la surface des sols. La lixiviation du bassin de la rivière Pripyat a entraîné ainsi depuis douze ans près de 120 térabecquerels de ¹³⁷Cs dans la rivière. En 1997, l'activité mesurée de l'eau de cette rivière était inférieure à moins de 0,2 becquerel de ¹³⁷Cs par litre.

¹ 1 térabecquerel = 1 TBq = mille milliards de becquerels

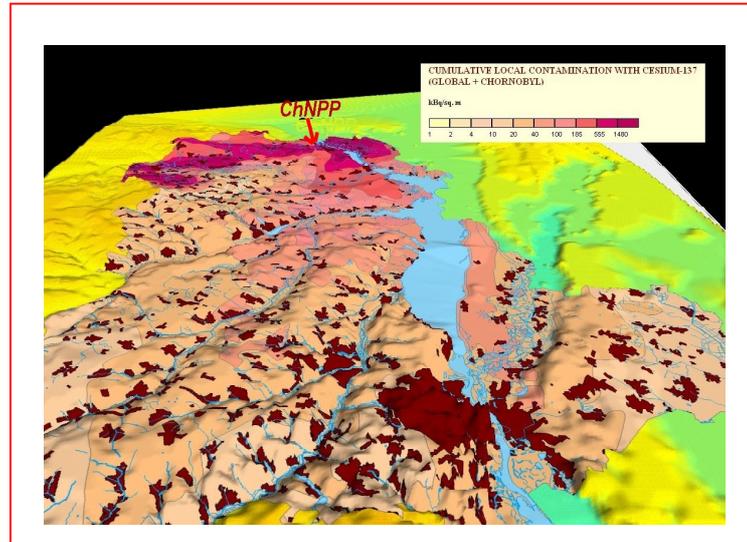


Figure 4 : Carte tridimensionnelle de la répartition du césium 137 autour de la centrale de Tchernobyl (ChNPP)

→ Le strontium

Environ 8 000 térabecquerels de strontium 90 (^{90}Sr) ont été rejetés dans l'atmosphère. Les observations faites montrent que le strontium est deux à trois fois plus mobile que le césium. S'il reste encore concentré, pour l'essentiel, dans la couche superficielle du sol, ce radioélément a été mesuré à plusieurs mètres de profondeur dans des terrains dépourvus de matière organique.

On observe depuis 1987 que le strontium migre dans les eaux en quantités plus importantes que le césium ; on retrouve également le strontium dans les végétaux (notamment les arbres) situés dans la zone d'exclusion.

Cependant, la diminution des concentrations de strontium dans les sols est, elle aussi, très lente. La lixiviation du bassin de la rivière Pripyat a entraîné depuis douze ans près de 170 térabecquerels de ^{90}Sr dans la rivière. En 1997, l'activité mesurée de l'eau était inférieure à 1 becquerel de ^{90}Sr par litre, soit un niveau très faible.

→ Le plutonium

Environ 6 000 térabecquerels de plutonium 241 (^{241}Pu) et 100 térabecquerels de plutonium 239 et de plutonium 240 ($^{239-240}\text{Pu}$) ont été rejetés, essentiellement sous forme de particules de combustible. Les dépôts correspondent géographiquement aux dépôts de strontium car ces deux radionucléides ont été émis sous la forme de particules de même taille (le césium, émis sous une forme plus volatile, a été transporté plus loin). L'activité en plutonium des sols est de quelques centièmes à quelques dixièmes de Becquerel par gramme.

85 % à 97 % de ces éléments se trouvent dans la couche supérieure du sol (5 premiers centimètres du sol). La contamination évolue très lentement et la tendance générale de l'évolution de l'environnement naturel dans la zone interdite des 30 km autour de la centrale se traduit par une stabilisation des niveaux d'activité.

1.2. Travaux de décontamination et sites de stockage dans la zone d'exclusion

Dans certaines zones proches de la centrale de Tchernobyl, des travaux de décontamination ont été entrepris. Pour certaines parcelles, le sol contaminé a été retiré, pour d'autres, le sol a été recouvert de terre exempte de contamination. Ces procédés se sont avérés assez efficaces. La contamination dans les cinq premiers centimètres du sol a été réduite d'un facteur 10 à 15, dans certains cas d'un facteur 100.

En plus des particules déposées sur le sol pendant la phase des rejets, des activités importantes sont concentrées dans les sites d'enfouissement. 800 zones d'enfouissement de déchets radioactifs ont été creusées en 1986 et 1987 dans le cadre des activités d'assainissement d'une zone de 10 km autour de la centrale. Le volume et l'activité des déchets stockés dans ces zones d'enfouissement sont estimés respectivement à 1 000 000 m³ et à 13.10¹⁵ Bq. Les sites les plus importants, Pidlisnii, Kompleksnii et Bouriakivka totalisent près de 3.10¹⁵ Bq de ¹³⁷Cs et ⁹⁰Sr.

Début 1990, une entreprise de décontamination (Komplex) s'est installée dans des ateliers non loin de la centrale. Elle a pour objet de collecter les matériels et les matériaux éparpillés dans la zone d'exclusion. L'entreprise collecte ainsi les voitures, camions, moteurs, avions, tuyaux, câbles, gravats de démolition. Ces matériels et matériaux sont décontaminés par trempage dans des bains de solvant ou d'acide, nettoyés sous pression. Les points de radioactivité restants sont détectés, à l'aide d'un compteur, puis abrasés manuellement.

Si le niveau de contamination est inférieur aux normes en vigueur (5 Bq/cm² β , γ et 0,5 Bq/cm² α) les matériaux et matériels sont revendus, réutilisés ou recyclés par l'industrie. Si les matériaux ou matériels ne sont pas « décontaminables » ou si le niveau de contamination obtenu est supérieur aux normes en vigueur, ils sont envoyés sur un site de stockage situé dans la zone des 10 kilomètres. Ce site comprend 30 tranchées de 20 000 m³ chacune. L'isolation du fond de la tranchée, pour éviter les fuites de radioactivité dans les sols, est réalisée par un film en polypropylène, une couche de sable et une couche d'argile (soit au total cinq mètres d'épaisseur). La tranchée est recouverte d'une couche de sable et d'argile, formant ainsi un tumulus.

Au total, les responsables de l'entreprise estiment à 12 000 000 m³ le volume des matériaux et des matériels à traiter. Selon les dernières estimations, plus de 22 000 tonnes de matériel ont été recyclées.

	Stockage de surface	Entreposages temporaires	Bassin de refroidissement de la centrale
¹³⁷ Cs	3,4 · 10 ¹⁵	1,1 · 10 ¹⁵	0,16 · 10 ¹⁵
⁹⁰ Sr	2,8 · 10 ¹⁵	0,7 · 10 ¹⁵	0,1 · 10 ¹⁵
²⁴¹ Pu	2,7 · 10 ¹⁵	0,7 · 10 ¹⁵	0,1 · 10 ¹⁵
^{238, 239, 240} Pu et ²⁴¹ Am	1,4 · 10 ¹⁴	0,4 · 10 ¹⁴	5,0 · 10 ¹²

*Inventaire de la radioactivité (exprimée en Bq)
présente dans les stockages de la zone d'exclusion*

1.3. Organisation administrative des zones contaminées

Dans les premiers jours qui ont suivi l'accident (27 avril – 7 mai 1986), les populations ont été évacuées d'une zone de 30 kilomètres de rayon autour du site du réacteur (« zone des 30 km ») ; cette zone a une surface d'environ 2 800 km². Des agglomérations extérieures à cette zone ont aussi été évacuées au cours des jours qui suivirent l'accident et plus tardivement en 1986. Des zones également extérieures à cette zone des 30 km ont été interdites de toute activité agricole. Certaines le sont encore. L'ensemble formé par la zone des 30 km, les agglomérations évacuées et les zones interdites à toute activité agricole est appelée « **zone d'exclusion** ».

Cette zone d'exclusion a une surface totale de plus de 4 300 km² : 2 100 km² en Biélorussie – appelée « Polessye » - 2 040 km² en Ukraine et 170 km² en Russie.

Depuis 1991, dans chacun de ces trois Etats, des zones sont définies en fonction de la contamination du sol. Les critères définissant ce zonage sont les activités surfaciques au sol en ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs et plutonium, mais se réfèrent dans la majorité des cas à l'activité surfacique due au ¹³⁷Cs.

- Les zones dans lesquelles l'activité surfacique du ¹³⁷Cs était supérieure à 1 480 kBq/m² ont été évacuées dans les jours qui ont suivi l'accident. Les zones dans lesquelles l'activité surfacique du ¹³⁷Cs était comprise entre 555 et 1 480 kBq/m² ont été partiellement évacuées.
- Là où l'activité surfacique du ¹³⁷Cs est supérieure à 555 kBq/m², l'habitation et les productions industrielles et agricoles sont interdites. L'entrée et la sortie de ces zones sont soumises à une autorisation spéciale. Ces zones sont appelées « zones de relogement obligatoire ».
- Là où l'activité surfacique du ¹³⁷Cs est comprise entre 185 kBq/m² et 555 kBq/m², les entreprises industrielles ou agricoles existantes ne peuvent pas être étendues et de nouvelles entreprises ne peuvent pas être créées. Ces zones sont appelées « zones de relogement volontaire » ; les populations peuvent demander à être relogées dans des zones non contaminées, mais n'y sont pas contraintes.
- Là où l'activité surfacique du ¹³⁷Cs est comprise entre 37 kBq/m² et 185 kBq/m² (ce qui correspond à une dose annuelle ajoutée de 1 mSv à 5 mSv), les restrictions sont les mêmes que celles des « zones de relogement volontaire » mais ne s'appliquent qu'aux entreprises dont les activités peuvent affecter la santé des populations ou la qualité de l'environnement.

Les établissements de soins ne peuvent pas non plus être implantés dans ces zones. Ces zones sont appelées « zones de contrôle radiologique ».

1.4. Contamination des produits agricoles en Ukraine

Une grande partie des produits agricoles cultivés dans les territoires contaminés est en dessous des limites de contamination fixées par les autorités ukrainiennes, grâce aux contre-mesures appliquées. Toutefois, une partie de la production de lait, de viande, de légumes, provenant principalement de petits producteurs, reste supérieure aux limites fixées.

En Ukraine, sur la plus grande partie des territoires contaminés, les entreprises agricoles et les particuliers produisent des produits alimentaires conformes aux normes en vigueur depuis le 25 juin 1997 (pour le ^{137}Cs , 100 Bq/l pour les produits laitiers, 200 Bq/kg pour la viande, 20 Bq/kg pour les pommes de terre et le pain).

Depuis 1986, la contamination des végétaux a été divisée par un facteur de 2 à 4 suivant le type de sol et la nature des végétaux. C'est la capacité du sol à fixer le césium qui est le principal paramètre dans le processus de contamination d'un végétal. C'est ce même processus que l'on retrouve dans la contamination du lait qui dépend de la contamination de l'herbe consommée par les bovins.

La gestion des terres agricoles contaminées doit être extrêmement rigoureuse. Le facteur de transfert du césium d'un sol à la plante peut en effet varier considérablement (de 1 à 20) suivant la composition, la teneur organique, l'acidité et l'humidité du sol.

En Ukraine, 8,4 millions d'hectares de terres agricoles contaminées par le césium font l'objet de mesures agronomiques :

- 54 900 hectares dans la zone d'exclusion et 35 600 hectares dans les zones contaminées au-delà de 555 kBq/m^2 sont exclus de toute activité agricole, soit un total de 90 500 hectares ;
- 130 800 hectares sont situés dans des zones contaminées entre 185 et 555 kBq/m^2 , dont 15 000 hectares de tourbières où le transfert du sol à la plante est plus élevé pour le césium ;
- 1,1 millions d'hectares sont situés dans des zones contaminées entre 37 et 185 kBq/m^2 dont 99 500 hectares de tourbières ;
- 7 238 millions d'hectares sont situés dans des zones contaminées entre 3,7 et 37 kBq/m^2 .

Depuis 1991, la moitié des doses délivrées par irradiation interne est due à la consommation de lait. Les contre-mesures ont permis de réduire les doses d'un facteur 10. La principale contre-mesure consiste à diminuer l'acidité du sol. Entre 1986 et 1998, 617 400 hectares ont été amendés afin de réduire les transferts de césium et de métaux lourds. Toutefois, ce traitement diminue également la qualité nutritive de l'herbe, et en définitive la qualité du lait.

De 1986 à 1994, plus de 1,5 million d'hectares ont été amendés, permettant de diviser la contamination des produits végétaux cultivés par un facteur de 2,5 à 5. Depuis 1994, les difficultés économiques ont entraîné une diminution de l'effort d'amendement et la contamination des produits a, en conséquence, augmenté à cause d'une carence des sols en potassium, entraînant une plus grande disponibilité du césium.

L'interdiction de l'emploi de sols à des fins agricoles n'a pas été décidée sur le seul critère du niveau de contamination mais aussi sur la base de la nature et de l'hétérogénéité de la contamination. Plus de la moitié des sols contaminés ont été exclus de toute activité agricole à cause de leur localisation

géographique, au milieu de zones contaminées, de leur éloignement d'une exploitation agricole, de leur caractère inexploitable à cause de la pauvreté des sols... Parmi toutes ces terres privées d'utilisation agricole, 20 % à 30% étaient des terres arables, 3 % à 5% des pâturages, 13 % des clairières. Le reclassement de ces terres sera régulièrement examiné par les autorités en fonction du niveau de contamination, de la fertilité naturelle, de la proximité d'une exploitation agricole et de la nature du sol.

Le cas du nord de l'Ukraine

Cinq régions du nord de l'Ukraine, celles de Rovno, Jitomir, Kiev, Tchernigov et Volin ont été plus particulièrement touchées par les retombées radioactives de l'accident de la centrale de Tchernobyl. C'est donc dans ces régions que la surveillance de la contamination des produits agricoles est la plus rigoureuse.

Si la situation dans les régions de Tchernigov, Rovno et Kiev est satisfaisante car 95% du lait produit ne dépasse pas la valeur de 50 Bq/l, le lait le plus contaminé est produit dans les régions de Volin et de Jitomir. Dans la région de Jitomir, 80% seulement des fermes produisent un lait dont la contamination en césium 37 est inférieure à 100 Bq/l, norme de commercialisation du lait en Ukraine. Dans cette même région, le lait produit par les fermes privées est sensiblement plus contaminé que celui produit dans les fermes collectives et peut atteindre un niveau de contamination de 800 Bq/l.

Le tableau suivant indique pour ces 5 régions la contamination moyenne due au césium 137 exprimée en Bq/kg dans la viande bovine et le lait.

Région		1996	1997	1998	1999	2000
Volin	Viande	56	62	52	61	77
	Lait	37	38	30	27	70
Jitomir	Viande		93	86	84	73
	Lait		45	45	50	52
Kiev	Viande			51	43	45
	Lait			17	25	28
Rovno	Viande			124	49	73
	Lait			32	34	24
Tchernigov	Viande	25	37	27	48	26
	Lait	22	22	22	25	18

Tableau des contaminations moyennes pour 5 régions ukrainiennes

(extrait de « The actual radioecological state on the agricultural territories of Ukrainian Polissya » – Lev T. et coll, Intitute of Agroecology and biotechnology UAAS, Ukraine, 2001).

On note également à l'examen du tableau que la contamination de la viande est supérieure à celle du lait, ce qui est conforme à ce qui est attendu compte tenu des facteurs de transfert aux bovins, mais reste en moyenne inférieure à la norme en vigueur (200 Bq/kg).

Il convient également de noter que dans les régions de Volin, Kiev, Rovno, une augmentation de la contamination soit du lait, soit de la viande bovine est observée en 2000 par rapport à 1999. Cette augmentation est le résultat de la diminution de l'amendement des prairies dans les fermes privées,

qui provoque une augmentation de la contamination de l'herbe (50 à 300 Bq/kg de césium 137 suivant la période de l'année), donc une augmentation de la contamination du lait et de la viande.

1.5. Les populations

La première décision concernant les populations prise par les autorités fut l'évacuation de la ville de Prypiat située à 3 km de la centrale, dans la nuit du 27 au 28 avril 1986, entre 2h00 et 5h00, alors que le débit de dose externe était de plusieurs millisieverts par heure. Cette décision fut prise parce que les autorités prévoyaient des doses supérieures à 250 mSv sur la période des rejets, valeur retenue par les autorités soviétiques pour l'évacuation des populations. Cette prévision de 250 mSv a été confirmée par les mesures de débit de dose faites dans les zones les plus contaminées, qui ont permis d'estimer que les doses reçues par les populations si elles n'avaient pas été évacuées, auraient été comprises entre 300 mSv et 400 mSv. Il faut cependant remarquer que ces doses ne prenaient en compte ni l'inhalation de particules radioactives, ni l'ingestion de produits alimentaires contaminés.



Photo©Patrick Landman

La ville abandonnée de Prypiat

Près de 48 heures après le début des rejets, alors qu'aucune mesure de protection des populations n'avait été prise et que les habitants continuaient à déambuler dans les rues et les jardins de Prypiat, 1 350 autocars, 2 trains et 3 bateaux furent mis à disposition des populations pour évacuer 49 614 personnes. Du 2 mai à 18h00 au 3 mai à 21h00, 10 000 personnes supplémentaires furent évacuées d'un cercle de 10 km de rayon centré sur la centrale accidentée.

Après que les limites de la zone d'exclusion furent fixées, 115 000 personnes ont été évacuées dans les semaines qui ont suivi l'accident, dont plus de 90 000 Ukrainiens.

En 1989, un plan de relogement des populations fut adopté par les autorités soviétiques sur la base des doses prévisionnelles calculées à partir des mesures de contamination des denrées alimentaires produites localement – principalement le lait et la viande.

Dans les zones qui ne furent pas évacuées, de nombreuses contre-mesures furent mises en œuvre : décontamination des sols, décontamination des façades, remplacement des toits, goudronnage des voies, cours, espaces de jeux, espaces de sport, creusement de puits pour l'approvisionnement en eau de boisson, défoliation... Le recul et le retour d'expérience de cette période ont montré que beaucoup de ces contre-mesures n'étaient pas utiles et que les bénéfices acquis ont été souvent plus psychologiques que dosimétriques.

Début 2001, en Ukraine, 2 217 agglomérations ont été classées en zone de contrôle radiologique (dépôts supérieurs à 1 Ci/km^2 ^{137}Cs) sur les bases de la réglementation en vigueur depuis 1991. Compte tenu des contrôles radiologiques effectués en 1997, 1 316 agglomérations devraient être incluses dans ces zones, 76 dans la zone d'exclusion, 66 dans la zone de relogement obligatoire, 497 dans la zone de relogement volontaire et 677 dans la zone de contrôle radiologique. A l'inverse, des 2 217 agglomérations, 901 devraient être libérées de tout contrôle ; 26 devraient passer du statut de relogement obligatoire à celui de relogement volontaire ; 364 devraient passer du statut de relogement volontaire à celui de statut de contrôle radiologique. Ces changements sont refusés par les habitants et les élus car ils s'accompagnent de la perte d'avantages sociaux et financiers.

2. Actions de l'IRSN en radioécologie : le « Site Pilote de Tchernobyl »

Depuis juin 1999, l'IRSN dispose d'une plate-forme expérimentale instrumentée à proximité du réacteur accidenté. Menés en collaboration avec les Instituts ukrainiens de Radioécologie Agricole (UIAR) et des Géosciences (IGS), les programmes poursuivis dans ce cadre abordent divers sujets :

- l'étude du comportement des radionucléides (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{129}I et ^{36}Cl) dans les sols et de leur transport en milieu insaturé et dans les nappes.
- la compréhension des mécanismes de lixiviation des particules de combustible (oxydes d'uranium à différents états d'oxydation).
- l'étude des transferts sol-plante pour différentes catégories de végétaux (céréales, légumes-feuilles, légumes-racines et légumes-fruits) et pour quelques types de sols agricoles.
- l'évaluation des transferts aux végétaux par voie foliaire.
- le développement de méthodes de caractérisation hydrogéologique et radiologique d'un site.

Cette plate-forme expérimentale, située à quelques kilomètres à l'ouest de la centrale accidentée de Tchernobyl, se compose d'une tranchée de stockage de déchets instrumentée et d'un jardin potager expérimental.

La tranchée de stockage de déchets mesure environ 70 m de long, 2,5 m de profondeur, et entre 8 et 10 m de largeur. Elle est remplie d'un mélange hétérogène de sol et de particules de combustible micrométriques. La concentration en césium 137 et en strontium 90 dans la tranchée est de l'ordre de 10^5 à 10^6 Bq.kg⁻¹.

Depuis 1987, date de réalisation de la tranchée, qui ne possède pas de dispositif d'étanchéité, les matériaux sont soumis à l'action des eaux de pluie et ont contaminé la nappe aquifère.

Une instrumentation hydrogéologique permet de suivre l'extension de cette contamination.



Les transferts sol-plante sont étudiés dans un enclos de 400 m², sur des parcelles de 16 m² de surface, réalisées à partir d'excavations sur 50 cm de profondeur. Elles contiennent chacune un type de sol différent et sont subdivisées en quatre parties destinées à recevoir la culture d'une espèce appartenant à chacune des quatre catégories de végétaux (céréales, légumes-feuilles, légumes-racines et légumes-fruits).



L'expérience acquise dans ce cadre permettra à l'IRSN d'améliorer sa capacité d'expertise concernant la caractérisation radiologique et hydrogéologique de l'environnement, ainsi que la compréhension des mécanismes de transfert des polluants dans l'environnement. Les mesures collectées sur ce site sont également destinées à la validation de modèles de transfert. Enfin, les résultats sont également très attendus par les instituts ukrainiens, afin de mieux d'apprécier l'extension autour de la centrale accidentée et le devenir de la radioactivité dans les chaînes alimentaires.



Chapitre 4 :

L'impact en France des retombées de l'accident de Tchernobyl

L'explosion de la centrale de Tchernobyl le 26 avril 1986 a provoqué le rejet dans l'atmosphère de particules et de gaz radioactifs qui se sont dispersés, principalement vers le nord et l'ouest de l'Europe. Au cours de ce transfert via l'atmosphère, une contamination du sol et des végétaux s'est produite avec une intensité qui dépend des conditions météorologiques et de la dilution dans l'air. Comme la plupart des pays d'Europe, la France a été affectée par ces retombées radioactives, de manière limitée en comparaison des pays plus proches du lieu de l'accident, mais néanmoins mesurable.

A la suite de cet accident, la contamination radioactive de l'environnement et des produits alimentaires en France a été surveillée et étudiée par divers organismes publics et privés, mais jusqu'en 1997 aucune synthèse globale sur l'impact des retombées atmosphériques de l'accident de Tchernobyl n'avait été produite.

Devant ce constat, la Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires (DSIN) et la Direction Générale de la Santé (DGS) ont demandé à l'IPSN de définir, avec l'aide des différents organismes concernés, notamment la Direction Générale de l'Alimentation (DGAL), une synthèse des informations disponibles pour le territoire national. L'objectif principal était de produire un document rassemblant et interprétant l'ensemble des données disponibles sur la contamination du sol et des produits alimentaires consécutive à l'accident de Tchernobyl, afin de proposer une évaluation de l'impact radiologique. Cette synthèse a été réalisée par l'IPSN en utilisant de nombreux résultats de mesures et de modélisation (logiciel de calcul ASTRAL, conçu et développé par l'IPSN pour évaluer et prévoir les conséquences radiologiques d'un accident). Cette synthèse a été présentée en décembre 1997 au Conseil Supérieur de la Sûreté et de l'Information Nucléaires (CSSIN) et publiée aux Editions de Physique¹.

L'étude a été poursuivie par l'IRSN, en tenant compte des recommandations faites en décembre 1997 par le CSSIN. En 1998, les résultats de calcul obtenus à l'aide du logiciel ASTRAL ont été comparés avec les données disponibles des analyses médicales effectuées de 1986 à 1989 sur les travailleurs des installations nucléaires françaises. Les conclusions de cette nouvelle étude ont été présentées au CSSIN le 23 mars 1999.

Depuis 1999, trois aspects particuliers ont donné lieu à des études plus approfondies :

- **L'évaluation des conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France**

En janvier 2000, la DGS a demandé à l'IPSN et à l'Institut national de Veille Sanitaire (InVS), de lui fournir un état des connaissances sur les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl ainsi qu'une analyse sur les investigations qu'il conviendrait de mener en France pour mettre en évidence

¹ « Conséquences Radioécologiques et Dosimétriques en France de l'accident de Tchernobyl », Rapport de IRSN n° 97-03 et livre paru aux Editions de Physique, avril 1999.

les éventuels effets de cet accident sur la santé, notamment en ce qui concerne les cancers de la thyroïde. Ce travail a donné lieu à un rapport² remis à la DGS et publié en décembre 2000.

- **L'établissement d'une cartographie des dépôts de ¹³⁷Cs sur l'ensemble de la France, comparable à celle produite dans les pays voisins : Italie, Suisse, Allemagne, Belgique, Royaume Uni, Autriche.**

Cette carte a permis notamment de localiser les zones du territoire français ayant reçu les dépôts les plus élevés. Cette étude qui a fait l'objet de plusieurs communications scientifiques³ et qui a été complétée par l'étude des retombées radioactives dues aux essais nucléaires atmosphériques permet de disposer d'une carte des activités cumulées de ¹³⁷Cs déposées sur les sols français. Par ailleurs, une étude a été engagée sur un bassin versant du massif du Mercantour pour analyser des processus d'accumulation particuliers des dépôts en altitude⁴. Cette étude a débouché sur la mise au point d'une méthode de cartographie des dépôts sur les bassins versants d'altitude.

- **L'amélioration de la compréhension des conséquences radioécologiques et radiologiques sur les zones du territoire français ayant reçu les dépôts les plus élevés.**

Ces études ont porté sur le quart Sud-Est de la France ; dans la vallée du Rhône, c'est l'évolution des activités en césium du vin qui a été étudiée ; dans le massif du Mercantour, c'est l'influence des points d'accumulation de la radioactivité sur la contamination de la chaîne alimentaire de ces montagnes (produits laitiers, baies et champignons, gibiers) et les doses associées qui ont été évaluées ; en Corse, c'est une reconstitution de la contamination des éléments sensibles de la chaîne alimentaire et la prise en compte des habitudes alimentaires locales qui ont permis une reconstitution dosimétrique adaptée.

Ces différents travaux permettent aujourd'hui de disposer d'une bonne connaissance d'ensemble de la contamination du territoire français provenant des retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl, ainsi que de l'impact radiologique sur la population.

1 Passage des masses d'air contaminées et dépôts

1.1 La contamination de l'air en mai 1986

Les rejets radioactifs du 26 avril 1986 ont été entraînés vers les pays baltes et scandinaves avant d'être rabattus sur l'Europe de l'Est. Ce sont les masses d'air contaminées par les rejets du 27 avril qui sont parvenus jusqu'en Europe de l'ouest et notamment en France à partir du 29 avril. Les rejets des jours ultérieurs n'ont pas concerné l'ouest de l'Europe (Figure 5).

La détection des aérosols radioactifs ayant survolé la France après l'accident a été rapide. Les mesures des activités β globale (mesure de l'activité de tous les radionucléides émetteurs bêta) des

² « *Evaluation des conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France : dispositif de surveillance épidémiologique, état des connaissances, évaluation des risques et perspectives* ». Rapport de l'IRSN et de l'InVS référencé IRSN/00-15. Décembre 2000.

³ *Entre autres* : « *mapping of ¹³⁷Cs deposition over eastern France 16 years after the Chernobyl accident* » *Science of Total Environment*, 2003, In Press ; réunion publique d'Ajaccio du 31 janvier 2002, DRASS Corse 2002.

⁴ « *Mechanism of formation of concentration spot soils radioactivity in mountain soils* », *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, In Press.

aérosols atmosphériques dans l'environnement des centres du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) ont été effectuées dans les 24 heures qui ont suivi leur détection (entre le 29 et 30 avril). Dès le 1^{er} mai, l'élévation anormale de l'activité de l'air les 29 et 30 avril était connue. Quelques heures après, des mesures plus précises ont permis d'identifier les radionucléides présents, notamment les radio-isotopes de l'iode, ^{131}I et ^{132}I (fils du ^{132}Te), et les radio-isotopes du césium (^{137}Cs et ^{134}Cs). Ainsi, de moins de $1\ \mu\text{Bq.m}^{-3}$ avant le 29 avril, l'activité en ^{137}Cs de l'air est montée à quelques dizaines, voire centaines de $\mu\text{Bq.m}^{-3}$ les 29 et 30 avril à Orsay, Verdun, Marcoule. Cette activité a ensuite dépassé $1\ \text{Bq.m}^{-3}$ entre le 1^{er} et le 2 mai sur la plupart des stations de l'est de la France (IPSN, 1986). L'iode 131, inexistant dans l'air avant le passage des masses atmosphériques contaminées, a atteint le 1^{er} mai, $10\ \text{Bq.m}^{-3}$ sur les stations de l'est de la France. Parallèlement, les débits de dose enregistrés par le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI), exprimés alors en microrad par heure, ont augmenté de 30 à 50 % dans l'est du pays (SCPRI, 1986). La figure 6 présente les activités moyennes de ^{137}Cs , ^{131}I et β global dans l'air entre le 1^{er} et le 3 mai 1986 en fonction de la longitude. Elle montre la décroissance d'est en ouest de ces activités⁵.

1.2 Les dépôts de ^{137}Cs

Ce sont les pluies survenues entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, durant le passage des masses d'air contaminées qui ont amené l'essentiel des dépôts radioactifs. Ces pluies, très hétérogènes, ont concerné le tiers est et le tiers ouest de la France.

Le lien entre les dépôts et les précipitations durant les cinq premiers jours de mai 1986 a été établi à partir de la mesure d'activité du ^{137}Cs dans plus de 140 échantillons de sols prélevés dans la basse vallée du Rhône, incluant une dizaine de mesures effectuées par la CRIIRAD.

Les dépôts augmentent avec les précipitations, passant de quelques milliers de Bq.m^{-2} , là où il n'a presque pas plu, à plus de $30\ 000\ \text{Bq.m}^{-2}$ (avec une large barre d'incertitude) là où les hauteurs de pluies ont dépassé de 50 mm. Ces dépôts pluvieux se sont ajoutés aux dépôts par temps sec de l'ordre de $1000\ \text{Bq.m}^{-2}$, et se sont superposés aux dépôts résiduels des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Cette relation obtenue dans la basse vallée du Rhône a été validée à partir des résultats de mesure des dépôts de ^{137}Cs disponibles sur le tiers est du pays (Figure 7).

La carte des dépôts du ^{137}Cs sur l'ensemble du territoire (Figure 8) a été réalisée à partir de la carte des précipitations sur la France entre le 1^{er} et le 5 mai 1986 sur laquelle la relation entre les hauteurs de pluie et les dépôts a été appliquée. Les résultats obtenus ont ensuite été pondérés par l'appauvrissement de la contamination des masses d'air d'est en ouest (Figure 6).

La méthode d'interpolation spatiale et la classification des couleurs sont différentes de celles utilisées pour la carte relative à l'est de la France reproduite dans le rapport IRSN «Tchernobyl 16 ans

⁵ « Les retombées de l'accident de Tchernobyl en France ; Analyse critique des mesures effectuées à l'époque sur le territoire national ; Enseignements pour la gestion de crise » Radioprotection, 2003, In Press.

après ». La méthode cartographique adoptée pour la figure 8 est celle utilisée par la Commission Européenne pour cartographier les dépôts de ^{137}Cs sur l'Europe⁶.

On observe une diminution d'est en ouest des activités de ^{137}Cs déposées, de moins de 1000 Bq.m^{-2} dans l'Ouest à plus de $20\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ dans l'Est. Les zones présentant les dépôts les plus importants, supérieurs à $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ sont celles où les hauteurs cumulées des pluies ont été supérieures à 20 mm ⁷. Sur approximativement 200 communes françaises les dépôts ont pu dépasser $20\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$. Vers l'ouest, les contreforts du Massif Central, qui ont reçu des précipitations supérieures à 10 mm durant la première semaine de mai 1986, se distinguent avec des dépôts compris entre $4\,000$ et $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$. Plus à l'ouest, les dépôts ont été le plus souvent inférieurs à 2000 Bq.m^{-2} et se répartissent entre les classes « inférieur à 1000 Bq.m^{-2} » et « 1000 à 2000 Bq.m^{-2} ». L'effet des variations des hauteurs de pluie est atténué par l'appauvrissement des masses d'air. C'est notamment le cas sur le Massif Armoricain, où malgré des précipitations supérieures à 20 mm et ponctuellement supérieures à 40 mm , les dépôts de ^{137}Cs sont restés en deçà de 1000 Bq.m^{-2} . En revanche, sur une zone orientée du nord au sud s'étendant du sud du Cotentin au pays Basque, la contamination de l'air était encore suffisante pour que des hauteurs de pluies supérieures à 20 mm entraînent des dépôts légèrement supérieurs, jusqu'à 2000 Bq.m^{-2} . Sur cette carte, les petits îlots de dépôt supérieur ou inférieur au voisinage et que l'on trouve sur une grande moitié ouest du pays n'ont pas de réelle signification, il s'agit d'artefacts liés au choix des classes de dépôts.

Les principales incertitudes attachées à la carte de la figure 8 sont associées aux incertitudes résultant de la cartographie des précipitations car il est possible qu'entre deux stations de Météo France, les hauteurs de pluies réelles aient été plus ou moins importantes que celles interpolées. De même, une pluie ou un autre phénomène d'accumulation des dépôts, ayant pu conduire localement à des dépôts différents de ceux estimés dans cette étude, a pu ne pas avoir été représenté. Des phénomènes locaux d'accumulation, impluvium naturel, pieds d'arbres ou de toitures, dépôts neigeux mises en évidence en montagne ont pu conduire également à des dépôts significativement plus élevés sur quelques mètres-carrés qui ne peuvent évidemment pas figurer sur cette carte. De même, à cette échelle, sur la côte orientale de la Corse, dans les environs de Solenzara, là où les pluies ont dépassé 60 mm , les dépôts qui ont pu excéder $40\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ sur quelques communes ne peuvent être représentées.

La contribution des dépôts par temps de brouillard n'a pas non plus été prise en compte pour la construction de la carte. Des études montrent que le brouillard concentre certains polluants atmosphériques mais la vitesse de dépôt au sol des polluants contenus dans ces brouillards est mal connue. Il est possible que les brouillards aient pu donner des dépôts radioactifs plus importants que des dépôts secs mais en revanche, une pluie de quelques millimètres suffit pour considérer comme négligeables les dépôts brumeux.

⁶ « *European Commission Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident* » EUR167-33, 1998.

⁷ *Tchernobyl +16*, 2002

L'incrustation de la carte obtenue dans celle d'Europe de l'Ouest publiée par la Commission Européenne en 1998 montre que les activités de ^{137}Cs déposées en France sont cohérentes avec celles des pays voisins (Figure 9). Dans l'est du pays, on retrouve des zones de dépôts croissants imbriquées les unes dans les autres à l'instar de celles qui caractérisent tout l'arc Alpin. Dans le nord de l'Italie, le sud de l'Allemagne où les précipitations ont été proches de celles enregistrées sur les zones les plus touchées de France, les cartes présentent des dépôts équivalents. Par exemple, dans les régions de Lecco et d'Ivrea ainsi qu'au nord d'Udine, à Lugano et dans le sud de la Bavière, où les précipitations ont dépassé 40 mm, les dépôts ont été supérieurs à $20\,000\text{ Bq.m}^{-2}$, comme dans les environs de Vaison-la-Romaine, de Lons-le-Saunier ou de la côte orientale corse. Toutefois, les dépôts supérieurs à $40\,000\text{ Bq.m}^{-2}$ qui apparaissent sur l'Arc Alpin ne figurent pas sur la carte de France. Les dépôts compris entre $10\,000$ et $20\,000\text{ Bq.m}^{-2}$ ont des surfaces moindres que celles de nos voisins de l'Est. Il est possible que ce marquage globalement plus faible soit en partie dû à l'appauvrissement des masses d'air par les pluies survenues sur l'Arc Alpin, avant qu'elles ne parviennent en France. Au nord de la France, les dépôts sont proches de ceux estimés en Belgique, au Luxembourg et en Allemagne. En revanche, s'il y a continuité entre la France et l'est de la Grande Bretagne, les fortes précipitations enregistrées dans l'est du Pays de Galles et de l'Ecosse ont amené des dépôts comparables à ceux de l'est de la France, alors qu'à la même longitude, les précipitations sur la Bretagne (Monts d'Arrée) ont conduit à de très faibles dépôts. Ceci s'explique par la trajectoire des masses d'air (Figure 5) qui, après avoir survolé l'est de la France, sont parvenues sur les Îles Britanniques, laissant la Bretagne sur leur flanc ouest. Comme la côte Atlantique française, l'Espagne a été épargnée par les retombées de l'accident de Tchernobyl. Les discontinuités transfrontalières sont dues au fait que la figure 9 est un montage cartographique. Ces discontinuités disparaîtraient si les données qui ont servi à l'établissement de la carte de France étaient prises en compte dans le traitement d'interpolation spatiale de l'ensemble des données européennes.

1.3 Evolution de la cartographie des dépôts depuis 1986

En 1986 une première carte des dépôts moyens régionaux de ^{137}Cs a été publiée par le SCPRI⁸. Cette carte avait été obtenue à partir d'un nombre restreint de mesures d'activités du sol et de sa couverture végétale. Elle faisait déjà apparaître une décroissance marquée d'est en ouest. Sur la moitié ouest du pays, la carte de 1986 est en bon accord avec celle proposée aujourd'hui. En revanche sur la moitié est, il existe des divergences très significatives entre les deux cartes. La principale cause de ces divergences est qu'un petit nombre de mesures moyennées sur toute une région ne permet pas de rendre compte des fortes hétérogénéités des dépôts. Dans une région comme le Languedoc-Roussillon où les zones les plus marquées par les dépôts représentent une faible proportion de la surface régionale, la moyenne établie en 1986 reste en accord avec la carte de la figure 8. En revanche sur la plupart des autres régions de l'Est, notamment en région Rhône-Alpes

⁸ « bulletin mensuel de résultats de mesures, mai 1986 » SCPRI, 1986

et dans le Jura, les moyennes régionales évaluées alors à respectivement 5400 Bq.m⁻² et 3600 Bq.m⁻², sous-estiment les dépôts effectifs.

La carte de France des dépôts de ¹³⁷Cs publiée en 1998 dans l'Atlas de la Commission Européenne, établie à partir de seulement 35 mesures pour tout le territoire a conduit pour les mêmes raisons à des dépôts sous-estimés.

En 1997, une carte des dépôts moyens départementaux de ¹³⁷Cs sur les surfaces agricoles a été publiée par l'IPSN⁹. Cette carte est le reflet de la contamination moyenne du lait produit en France dans les jours qui ont suivi les dépôts. Le logiciel ASTRAL de l'IRSN a été utilisé pour évaluer les dépôts de ¹³⁷Cs correspondant aux mesures d'activité du lait effectuées par le SCPRI. Les mesures de lait effectuées sur des échantillons prélevés dans les grands centres de collecte départementaux ne reflétaient pas l'hétérogénéité des dépôts dans l'est de la France, et surtout ne permettent pas de révéler ni de localiser les dépôts les plus importants. En effet, les connaissances en radioécologie montrent que l'augmentation de la contamination de la chaîne alimentaire n'est pas proportionnelle à l'augmentation des dépôts radioactifs : la contamination d'une herbe soumise à un dépôt par temps sec ne sera que 2 à 3 fois inférieure à celle d'une herbe soumise à un dépôt par temps pluvieux dix fois supérieur au dépôt par temps sec, car l'herbe ne peut retenir qu'une faible partie de l'eau donc du dépôt radioactif. L'étude de 1997 a tenu compte de ce fait mais, en l'absence de données sur la contribution réelle des dépôts pluvieux au dépôt total et donc à la contamination du lait, les dépôts moyens départementaux sur les départements les plus arrosés en 1986 ont été sous-estimés d'un facteur 2 à 3. Notons que dans cette même étude, l'existence de dépôts très supérieurs aux moyennes départementales calculées avait été signalée sur les surfaces très arrosées.

Pour confronter la carte de la figure 8 et les données cartographiques publiées par la CRIIRAD¹⁰ en 2001, différents éléments doivent être pris en compte. Tout d'abord, les résultats des mesures effectuées par la CRIIRAD sont des activités de ¹³⁷Cs dans les sols qui ne différencient pas le ¹³⁷Cs provenant de l'accident de Tchernobyl de celui provenant des retombées anciennes des essais atmosphériques d'armes nucléaires (voir encadré 1). Par ailleurs, une partie des activités de ¹³⁷Cs déposées lors des retombées de ces essais a aujourd'hui disparu, notamment par décroissance radioactive. L'essentiel de ces retombées ayant eu lieu avant 1963, plus de 60 % du césium déposé alors a disparu par la seule décroissance radioactive. Il en est de même des activités déposées en mai 1986 : en 17 ans 30 % du ¹³⁷Cs déposé à la suite de l'accident de Tchernobyl a disparu par décroissance radioactive. D'autres processus plus difficilement quantifiables ont contribué à l'élimination du césium des sols (migration horizontale vers les cours d'eau et migration verticale vers la profondeur).

⁹ « Conséquences Radioécologiques et Dosimétriques en France de l'accident de Tchernobyl », Rapport de IRSN n° 97-03 et livre paru aux Editions de Physique, avril 1999.

¹⁰ « Contaminations radioactives : Atlas France et Europe », CRIIRAD et André Paris, Editions Yves Michel, 2002.

La sommation des dépôts de ^{137}Cs des deux origines, l'accident de Tchernobyl (Figure 8) et les essais atmosphériques d'armes nucléaires (carte de l'encadré 1), ainsi que la prise en compte de la décroissance radioactive, permettent d'établir une carte des dépôts cumulés de ^{137}Cs sur les sols français (Figure 10). Pour construire cette carte, l'élimination du césium par les phénomènes de migrations horizontale et verticale a été négligée. Cette carte des dépôts cumulés de ^{137}Cs est cohérente avec les mesures publiées par la CRIIRAD en 2001. La figure 11 montre les intervalles des mesures publiées par la CRIIRAD dans son Atlas, superposés à la carte IRSN des dépôts cumulés. Les évaluations de dépôts de ^{137}Cs des retombées des essais d'armes nucléaires d'une part, et de l'accident de Tchernobyl d'autre part, permettent d'expliquer les activités actuelles de ce radionucléide dans les sols français. Par ailleurs, le fait que les dépôts les plus faibles mesurés par la CRIIRAD ne soient pas systématiquement inférieurs à ceux évalués par l'IRSN, montre que les pertes liées au lessivage des sols sont négligeables à cette échelle.

1.4 Radioactivité des sols de montagne

Une étude spécifique a été menée pour expliquer l'existence de « points chauds », c'est-à-dire de taches de césium 137 d'activité supérieure à $100\,000\text{ Bq.m}^{-2}$ sur quelques dm^2 à quelques m^2 en montagne¹¹. Elle a montré qu'il s'agissait de points d'accumulation provenant de dépôts neigeux en mai 1986, et de la fonte des névés à la fin du printemps. Sur ces taches, d'autres polluants atmosphériques s'accumulent également par le même processus : le plomb provenant des carburants, l'antimoine issu des systèmes de freinage des véhicules, le cuivre, le nickel, le cadmium...(Figure 12). Cette étude a permis d'établir une méthode de localisation des zones propices à l'existence de points d'accumulation sur les bassins versants d'altitude¹².

2 Atteinte de la chaîne alimentaire

2.1 Niveaux moyens d'activités dans l'ensemble du pays

En 1986, compte tenu de la date des dépôts, la plupart des productions agricoles, fruitières et céréalières se trouvaient à un stade de développement très précoce et donc peu exposées aux dépôts radioactifs. Seuls deux groupes de produits étaient susceptibles de voir leur activité augmenter de manière significative : les produits d'élevage (lait et produits laitiers, viandes) car les troupeaux étaient en libre pâture sur des prairies contaminées, et les légumes de saison cultivés en plein champ, notamment les légumes feuilles (salades, épinards,...).

C'est sur ces deux types de produit que les mesures d'activité ont été les plus nombreuses. Les premiers prélèvements de lait ont été effectués par le SCPRI, dès le 2 mai sur une dizaine de stations et dès le 5 mai sur les autres stations et dans les centres de collecte départementaux.

¹¹ « Mechanism of formation of concentration spot soils radioactivity in mountain soils », *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, In Press.

¹² « modélisation spatiale des activités surfacique des sols du Mercantour » rapport IPSN/SERNAT 2001-25

Les nombreuses mesures d'activités d' ^{131}I et de ^{137}Cs effectuées dans les produits agricoles et d'élevage en 1986 par le SCPRI témoignent que la contamination a atteint son maximum immédiatement après les dépôts, puis a décru avec des cinétiques variables. La figure 13 montre que les activités mesurées dans le lait ont rapidement traduit les activités déposées sur les sols et la décroissance d'est en ouest de ces dépôts. L'évolution de l'activité du lait dans les mois qui ont suivi les dépôts s'accorde avec la diminution de l'activité de l'herbe durant l'été, puis avec l'activité des fourrages consommé durant la période de stabulation mais récoltés au début de l'été. Dans l'est de la France, les activités du ^{137}Cs dans le lait de vache publiées par le SCPRI et le Centre National d'Etudes Vétérinaires et Alimentaires (CNEVA) ont toujours été inférieures à 220 Bq.l^{-1} . Aujourd'hui l'activité du ^{137}Cs dans le lait produit en France métropolitaine ne dépasse pas quelques dizaines de mBq.l^{-1} en dehors de certaines zones de pâturage extensif de montagne (Auvergne, Alpes) où elle avoisine 1 Bq.l^{-1} .

Pour la viande, les activités massiques moyennes de ^{137}Cs mesurées début mai 1986 étaient de l'ordre de la centaine de Bq.kg^{-1} dans tout l'est du pays. Les valeurs maximales observées pendant l'été 1986, environ 1000 Bq.kg^{-1} , sont redescendues à une dizaine de Bq.kg^{-1} pour la viande comme pour le lait, à l'entrée de l'hiver. Pour l'iode 131, dans la même zone, les concentrations moyennes ont atteint plusieurs centaines de Bq.kg^{-1} mais la décroissance a été bien plus rapide, avec une période effective d'environ 5 jours (diminution d'un facteur 2 tous les 5 jours).

Les légumes-feuilles ont été les plus contaminés. Les concentrations de ^{137}Cs ont atteint quelques centaines de Bq.kg^{-1} dans les jours qui ont suivi les dépôts, notamment dans le Nord-Est, et pour l' ^{131}I , les contaminations ont atteint quelques milliers de Bq.kg^{-1} . Dans les deux cas, la décroissance a été très rapide (quelques Bq.kg^{-1} en ^{137}Cs et disparition de l' ^{131}I dès juillet 1986).

Pour les autres types de végétaux, les concentrations ont été plus faibles en raison de la date des dépôts. Une étude sur le vin des Côtes du Rhône effectuée par l'IRSN¹³ à la demande des viticulteurs a montré que la production de vin en 1986 a été très faiblement contaminée avec des activités qui sont restées inférieures à 1 Bq.l^{-1} . La raison en est qu'au début du mois de mai 1986, les vignes n'avaient développé que quelques feuilles qui ont très peu intercepté les dépôts. Ces activités ont ensuite rapidement diminué pour être aujourd'hui revenues au niveau antérieur à l'accident de Tchernobyl (Figure 14).

Les produits forestiers, tels que le gibier et les champignons ont présenté une contamination plus élevée que celle des produits agricoles. En 1986, l'activité mesurée dans les champignons était 5 à 10 fois plus forte que celle enregistrée dans le lait ou les céréales. Mais surtout, la diminution de la contamination a été beaucoup plus lente et les activités du ^{137}Cs dans les champignons et le gibier ont peu varié depuis 1986. Ponctuellement, elles peuvent encore dépasser la limite de commercialisation

¹³ « Influence des retombées de l'accident de Tchernobyl sur l'activité en ^{137}Cs des vins des côtes du Rhône » Radioprotection In Press, 2003.

de 600 Bq.kg^{-1} , fixée par la réglementation européenne concernant la contamination des produits alimentaires.

2.2 Cas des zones les plus marquées par les retombées : l'exemple de la Corse

Avec les Alpes-Maritimes, la Drôme et le Jura, les deux départements de Corse font partie des départements français les plus touchés par les retombées de l'accident de Tchernobyl (Figure 8). C'est ce que montre l'étude des précipitations enregistrées par Météo-France durant la première semaine de 1986 (supérieures à 60 mm) et ce que confirment les résultats des trois campagnes de prélèvements de sol effectuées en Corse en 2001 par l'IPSN et l'OPRI. L'hétérogénéité des activités de ^{137}Cs dans les sols aujourd'hui est cependant extrêmement forte, liée à la distribution des précipitations en mai 1986 et surtout aux caractéristiques des sols qui ont plus ou moins retenu les dépôts. Dans certains cas plus de la moitié du ^{137}Cs a disparu par drainage des sols et a rejoint la mer via les nappes phréatiques et les cours d'eau.

L'utilisation du logiciel ASTRAL permet, à partir des mesures d' ^{131}I et de ^{137}Cs effectuées en 1986, de rendre compte des niveaux de dépôt et de contamination de la chaîne alimentaire.

La figure 15 montre, par exemple, que les activités d' ^{131}I mesurées dans les 5 échantillons de lait de chèvre prélevés en Balagne sont cohérentes entre elles et témoignent d'un dépôt de ^{131}I de l'ordre de $30\,000$ à $70\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ en accord avec des dépôts estimés, sur la Balagne, à moins de $75\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$. De même, les activités de ^{137}Cs mesurées dans les échantillons de lait de brebis provenant de Balagne et les échantillons de lait de vache de la région d'Ajaccio sont cohérentes avec celles de ^{131}I . Celles de Balagne sont associées à des dépôts de l'ordre de $10\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ de ^{137}Cs .

De la même manière les mesures effectuées par l'IPSN sur des échantillons de salade, de chou, de persil, d'orge et de maïs prélevés fin juin 1986 près d'Aléria (Domaine de Casabianda) témoignent d'un dépôt initial de césium 137 de l'ordre de $25\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$. Cette valeur de dépôt est compatible avec :

- le dépôt théorique de césium évalué entre $20\,000$ et $40\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ à partir de la hauteur de pluies mesurée en mai 1986.
- les mesures réalisées dans les sols de cette partie de l'île, $32\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ à Ghisonaccia-Gare (mesure CRII-Rad) et $16\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$ à Casabianda (mesure IPSN).

Cet ensemble de mesures effectuées dans la région d'Aléria-Solenzara permet d'évaluer le dépôt d' ^{131}I dans cette région entre $100\,000$ et $350\,000 \text{ Bq.m}^{-2}$.

2.3 Cas des bassins versants de montagne

Entre 1999 et 2002, l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire a étudié l'influence des points d'accumulation de ^{137}Cs dans les prairies d'altitude du Mercantour sur la contamination des produits de la chaîne alimentaire alpine (lait, fromage, champignons, baies et gibiers). Les prélèvements et les mesures de baies réalisés dans le but de comprendre l'influence des points d'accumulation sur les produits de la cueillette, font apparaître une forte variabilité de l'activité des échantillons de champignons ($273\text{-}1165 \text{ Bq.kg}^{-1}$) et des myrtilles ($5\text{-}140 \text{ Bq.kg}^{-1}$) (Figure 16).

Les prairies d'altitude du Mercantour constituent également des zones de pâturage extensif des troupeaux. Aussi, entre 1999 et 2002, le lait et le fromage produits par les troupeaux en pâturage libre sur les prairies comportant des points d'accumulation de ^{137}Cs ont été analysés. Les activités mesurées dans le lait de vache (1,3 à 6,2 Bq.l⁻¹), parmi les plus élevées de France, s'expliquent par la forte activité moyenne de l'herbe ($^{137}\text{Cs} = 50 \text{ Bq.kg}^{-1}$). L'influence des points d'accumulation dans l'activité de ce lait a été évaluée. La cartographie des activités de ^{137}Cs déposées sur la zone de pâturage considérée montre que la totalité de l'herbe poussant sur les points d'accumulation équivaut à la consommation quotidienne d'une vache, 50 kg d'herbe. L'activité du lait produit par cet animal qui brouterait cette herbe en une journée serait de l'ordre de 80 Bq.l⁻¹. Après mélange, l'activité du lait du troupeau pourrait atteindre 10 Bq.l⁻¹ et diminuerait progressivement pour atteindre 5 Bq.l⁻¹ après une dizaine de jours. Ce calcul montre que les points d'accumulation sont en partie à l'origine de la variabilité de l'activité du lait produit en montagne.

Ces régions d'altitude sont également des zones de chasse aux gibiers de montagne : cerfs, chamois, mouflons et sangliers. Quinze échantillons fournis par la fédération de chasse des Alpes-Maritimes ont été analysés. Les activités mesurées dans les muscles de ces gibiers sont faibles (quelques Bq.kg⁻¹ en général et jusqu'à 56 Bq.kg⁻¹, pour un échantillon de sanglier) en regard de la contamination du milieu. En effet, dans les Vosges qui à l'instar du Mercantour, constituent une zone de montagne significativement marquée, l'activité du muscle de sanglier atteint 1000 Bq.kg⁻¹.

Même si les activités des productions agricoles locales (lait, fromage) sont plus élevées que les moyennes françaises, les points d'accumulation des prairies alpines du Mercantour ont un impact limité sur l'activité de ces produits. Cette observation est à mettre en relation avec les faibles surfaces occupées par les points d'accumulation, de l'ordre de 0,6 % de l'ensemble d'un bassin versant.

3 Conséquences dosimétriques

L'ensemble des mesures effectuées dans l'air a permis d'évaluer les doses reçues par la population lors du passage du nuage. Ces doses efficaces ont été estimées à moins de 0,5 µSv pour l'irradiation externe et à moins de 20 µSv pour l'inhalation. Elle ne nécessitent pas de dispositions particulières de protection de la population (mise à l'abri ou distribution d'iode stable). En effet, en 1986, les niveaux d'intervention recommandés par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), étaient de 5 à 50 mSv pour la dose efficace et de 50 à 500 mSv pour la dose à la thyroïde.

3.1 Doses moyennes dues à l'ingestion de denrées contaminées

L'est de la France

Aux faibles doses reçues par la population lors du passage des masses d'air contaminées, il faut ajouter les doses dues à la consommation de produits alimentaires et à l'exposition aux dépôts. L'étude de la chaîne alimentaire a montré que les produits laitiers et les légumes ont été les plus marqués par les dépôts de radioactivité. C'est donc sur ces produits sensibles qu'a été basée l'étude dosimétrique.

En 1986, la dose moyenne efficace engagée pour un individu résidant dans l'est de la France a été estimée entre 0,1 et 0,4 mSv. L'ingestion y contribue pour 60 à 70 % et l'exposition externe pour 20 à 35 %. Cette dose interne résulte à 50 % de l'ingestion de lait et de viande. Parmi les radionucléides en cause, l' ^{131}I compte pour 20 à 25 % du total, le reste étant essentiellement imputable aux ^{137}Cs et ^{134}Cs . Le cas de personnes vivant sur les zones les plus touchées par les dépôts et se nourrissant principalement de leurs productions ou de produits locaux a été étudié. La dose efficace engagée en 1986 pour ces personnes a pu atteindre 1,5 mSv. La consommation d'eau n'a jamais pu conduire à une dose significative au regard de celle due aux autres aliments.

L'étude des quelque 60 000 mesures faites au cours des trois ans qui ont suivi l'accident de Tchernobyl sur les personnels travaillant sur les sites du CEA, de COGEMA et d'EDF, confirment globalement les estimations de l'IPSN relatives à l'incorporation de césium 137 qui constitue l'essentiel de la dose en 1986. Toutefois, en raison de la circulation des denrées, certains habitants de l'ouest de la France ont pu recevoir des doses proches de celles reçues par les habitants de l'est du pays, plus touchés par les dépôts. Une telle vérification n'a pas été possible pour l'iode 131, car les mesures de la charge thyroïdienne en iode 131 sont rares en raison de la décroissance radioactive rapide de ce radionucléide.

De 1987 à 1996, la dose efficace moyenne engagée pour les populations de l'est de la France peut être estimée entre 0,2 et 0,7 mSv. L'irradiation externe compte pour 65 à 80 % de ce total, le reste étant imputable à l'ingestion. Le ^{137}Cs est responsable de près de 80 % des doses, le complément étant dû au ^{134}Cs .

La dose efficace engagée moyenne de mai 1986 à aujourd'hui est estimée entre 0,3 et 1,2 mSv dans l'est de la France. Actuellement, la dose efficace moyenne engagée chaque année est d'environ 0,010 à 0,015 mSv. Sa diminution au cours des années à venir sera très lente.

3.2 Doses à la thyroïde

Dans le but d'évaluer les doses et les risques de cancer de la thyroïde dans l'est de la France, une enquête a été effectuée en 2000 afin de recueillir des données précises concernant la quantité de produits frais consommés, la provenance des aliments et les délais de consommation. A partir de ces informations et des résultats de mesure de la contamination par l' ^{131}I rassemblées en 1997, des estimations de doses à la thyroïde ont été effectuées pour les enfants qui résidaient dans l'est de la France et âgés de 3 mois, 1 an, 5 ans et 10 ans en 1986. Les doses résultant de ces estimations sont : 1,9 mSv pour le nourrisson, 9,8 mSv pour l'enfant de 1 an, 5,9 mSv pour l'enfant de 5 ans et 3,0 mSv pour l'enfant de 10 ans (une dose équivalente de 20 mSv engagée à la thyroïde correspond à une dose efficace au corps entier de 1 mSv). Ces doses ont été calculées sur la base d'une valeur moyenne du dépôt de ^{131}I dans l'est de 45 000 Bq.m⁻². Des individus d'une même tranche d'âge ont pu recevoir des doses plus faibles et d'autres des doses plus fortes, selon leur mode de vie. En effet, les résultats sont influencés principalement par le type de lait et son délai de consommation, ainsi que par l'origine géographique des produits alimentaires.

La Corse

Afin de vérifier la pertinence de ces estimations, une étude spécifique a été menée pour évaluer les doses à la thyroïde reçues par les enfants présents en Corse dans les trois mois qui ont suivi les dépôts radioactifs. La Corse présente en effet plusieurs particularités du point de vue des doses à la thyroïdes : les dépôts radioactifs y ont été parmi les plus importants de France, c'est une zone de production de lait de chèvre et de lait de brebis qui sont des produits parmi les plus radioécologiquement sensibles, et il existe en Corse des habitudes alimentaires spécifiques incluant la consommation de lait et de fromage de chèvre et de brebis. Cette étude a montré que pour la majorité des enfants présents en Corse entre mai et juillet 1986, les doses à la thyroïde n'ont pas dû dépasser de manière importante la dose moyenne des enfants de l'est de la France, soit 10 mSv. En Balagne, où les dépôts ont été similaires à ceux de l'est de la France, la charge thyroïdienne en iode d'un jeune garçon âgé de 13 ans en 1986 ayant ce type de régime alimentaire particulier, a été mesurée début juillet 1986. Cette mesure d'activité thyroïdienne correspond bien à une consommation modérée mais régulière de produits locaux parmi lesquels du lait (200 g/j) ou du fromage de chèvre (50g/j), produits ayant fait l'objet de mesures. Cette mesure fournit également un élément de validation des évaluations dosimétriques. La dose à la thyroïde du jeune garçon de Balagne a été estimée à $18,5 \pm 8,5$ mSv. Cette dose est cohérente avec les résultats des mesures de la contamination de la chaîne alimentaire effectuées en mai 1986 et avec les dépôts radioactifs en Balagne estimés par l'IRSN.

Une reconstitution de la dose à la thyroïde reçue par un enfant ayant les mêmes habitudes alimentaires que celui de Balagne mais résidant dans la partie orientale de la Corse, la plus marquée par les dépôts de radioactivité montre que les doses à la thyroïde ont pu dépasser 50 mSv et atteindre 150 mSv en prenant en compte une consommation quotidienne de produits laitiers (lait de chèvre et de brebis) plus importante. Ce sont des valeurs calculées avec des hypothèses pessimistes que l'absence de mesure de la contamination de la chaîne alimentaire dans cette région de Corse, l'absence de mesure *in vivo* ainsi que l'absence d'étude détaillée des habitudes alimentaires locales en 1986 ne permettent pas de conforter davantage.

Cette estimation de dose est en adéquation avec la dose de 214 mSv publiée dans le rapport IPSN-InVS et dans le rapport IRSN « Tchernobyl 16 ans après » pour un enfant de 1 an, âge où la thyroïde est très sensible aux rayonnements, qui aurait consommé régulièrement 200g /j de lait de brebis ou de chèvre produit dans les zones les plus contaminées de l'est de la France. Comme pour la Corse, l'absence de mesure de la contamination de la chaîne alimentaire, l'absence de mesure *in vivo*, ne permettent cependant pas d'affirmer qu'une telle dose à la thyroïde ait pu être délivrée. La consommation de lait de chèvre ou de brebis par un enfant de 1 an ne peut être qu'occasionnelle.

3.3 Les doses d'aujourd'hui

Depuis 1986, les doses reçues annuellement par la population française n'ont cessé de diminuer. Ainsi, les doses efficaces moyennes cumulées sur les dix années qui ont suivi l'accident (1987-1996)

ne représentent que le double de celles de l'année 1986. Aujourd'hui, c'est l'exposition externe au ^{137}Cs encore présent dans les sols qui constitue la principale contribution aux doses efficaces reçues par la population. Toutefois, la consommation de produits naturels (champignons, baies, gibiers) peut constituer une seconde voie d'atteinte. En France, c'est sur les bassins versants d'altitude que ces deux voies d'atteinte peuvent être les plus importantes.

Sur les points d'accumulation étudiés par l'IPSN dans le Mercantour, les mesures *in situ* du débit de dose montrent que la contribution du ^{137}Cs au débit de dose ambiant est de 40%. Néanmoins, la dose associée à un passage ou un séjour de quelques heures sur les points de concentration est faible (quelques micro-sieverts). Aussi, la principale source de contamination qui pourrait atteindre un individu résulterait de la consommation d'une cueillette comportant les quelques champignons prélevés sur des points d'accumulation. Un tel scénario conduit à une dose efficace de l'ordre de 10 à 100 μSv ¹⁴.

4 Estimation du risque

Afin d'argumenter, sur des bases chiffrées, la pertinence et la faisabilité des investigations qu'il pourrait convenir de mener en France pour mettre en évidence d'éventuels effets de l'accident de Tchernobyl sur la santé, une estimation théorique du risque a été menée par l'IPSN et l'InVS en 2000. Cette estimation porte spécifiquement sur les cancers de la thyroïde.

4.1 L'augmentation des cancers de la thyroïde en France

L'augmentation des cancers de la thyroïde en France depuis 1975 a été mise en évidence au travers d'estimations, réalisées par le réseau FRANCIM des registres du cancer, de l'incidence annuelle des cancers pour la France entière sur la période 1975-1995 (Figure 17). Les estimations nationales sont produites par modélisation à partir des données nationales de mortalité et des données d'incidence observées dans huit départements métropolitains couverts par des registres de cancers. Dans le cas des cancers thyroïdiens, la mortalité est faible et relativement constante sur la période étudiée ; il en résulte que la méthode utilisée peut amplifier l'augmentation de l'incidence.

Selon ces estimations, l'incidence du cancer de la thyroïde dans la population générale est passée, entre 1975 et 1995, de 0,6 à 3,1 pour 100 000 habitants chez les hommes et de 2,1 à 5,7 pour 100 000 habitants chez les femmes. L'augmentation des cancers thyroïdiens est observée avant l'accident de Tchernobyl et se poursuit après l'accident ; malgré cela, elle est souvent perçue par le public et les médecins comme une conséquence de l'accident. On constate également une grande variabilité de l'incidence entre départements français ; les taux les plus bas sont observés dans la Somme et le Doubs et les plus élevés dans le Tarn et le Calvados.

4.2 Les facteurs de risque du cancer de la thyroïde

Il existe de multiples facteurs de risque du cancer de la thyroïde ; parmi ceux-ci, l'exposition aux rayonnements ionisants est celui qui est le mieux étudié. Plus précisément :

- un excès de risque significatif de cancer de la thyroïde a été observé après irradiation externe de la tête et du cou à des fins médicales à partir de doses à la thyroïde de l'ordre de 100 mGy. Les

¹⁴ « influence des points de concentration de césium 137 dans les sols d'altitude sur la contamination des chaînes alimentaires locales et doses associées », *Environnement Risques et Santé*, accepté pour publication.

risques sont d'autant plus élevés que l'exposition a eu lieu à un plus jeune âge ; un excès de risque significatif n'a pas été observé lors d'une irradiation externe à l'âge adulte, notamment chez les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki ;

- aucune augmentation significative du risque de cancer de la thyroïde n'a été observée après irradiation médicale par injection d'iode 131 (irradiation interne) chez l'adulte comme chez l'enfant ;
- un excès de risque a été observé à la suite d'un essai nucléaire atmosphérique américain en 1954 (îles Marshall), au cours duquel la population a été simultanément exposée à une irradiation externe et une irradiation interne par des iodures radioactifs, avec une dose moyenne à la thyroïde de 12,4 Gy.

Il faut souligner que les conditions d'exposition (nature de l'irradiation, type de radionucléides, débit de dose,...) sont différentes d'une situation à l'autre et ne sont pas facilement transposables au cas de l'accident de Tchernobyl. Ainsi, en dehors de cet accident, aucun excès de cancers thyroïdiens imputable à une contamination interne résultant majoritairement de l'iode 131, n'avait été mis en évidence avant l'accident de Tchernobyl. La constatation d'une épidémie de cancers de la thyroïde chez l'enfant en Biélorussie, en Ukraine et en Russie (Oblast de Briansk) après l'accident de Tchernobyl, dont le lien avec une irradiation interne par l'iode 131 est établi, a apporté un élément nouveau dans l'appréciation du risque lié à l'exposition à l'iode 131.

D'autres facteurs de risque du cancer de la thyroïde sont établis ou suspectés, notamment :

- la fréquence du cancer de la thyroïde augmente avec l'âge ;
- les antécédents de goitre ou de nodules bénins de la thyroïde ;
- les facteurs nutritionnels (carence ou excès d'apport en iode dans les aliments) ;
- les facteurs hormonaux (par exemple, la fréquence est 2 à 3 fois plus élevée chez la femme que chez l'homme).

4.3 L'évaluation du risque causé par les retombées de l'accident de Tchernobyl en France

La population retenue pour évaluer le risque de cancers thyroïdiens qui pourraient être induits par l'exposition aux retombées de l'accident de Tchernobyl est constituée par les enfants de moins de 15 ans qui résidaient dans l'est de la France en 1986. Ce groupe comporte 2,27 millions d'enfants.

Les doses moyennes à la thyroïde estimées pour les enfants en France sont faibles, environ 100 fois moindres que celles estimées pour les enfants de Biélorussie parmi lesquels une épidémie de cancers thyroïdiens a été décelée. Pour ces niveaux de dose, on ne dispose pas d'observations épidémiologiques montrant un excès de cancers de la thyroïde dans des conditions d'exposition équivalentes, mais on ne peut pas exclure la possibilité d'un tel excès, en particulier chez les enfants. En effet, la thyroïde des enfants est beaucoup plus radiosensible que celle des adultes, et c'est dans ce groupe que les doses à la thyroïde estimées sont les plus élevées, en comparaison des doses moyennes des enfants des autres régions ou des adultes. Les enfants nés dans l'est de la France après juin 1986 n'ont pas été inclus dans cette évaluation de risque car ils n'ont pas été exposés à l'iode 131 en raison de sa courte durée de vie (période radioactive de 8 jours).

Le calcul du risque aux faibles doses se heurte à deux difficultés méthodologiques importantes :

- les risques ont été calculés par extrapolation à partir des connaissances sur les effets aux doses plus fortes selon l'hypothèse d'une relation dose-effet linéaire sans seuil;

- la plupart des coefficients de risque¹⁵ disponibles pour le cancer de la thyroïde ont été établis à partir d'études épidémiologiques sur des populations qui ont été exposées à une irradiation externe seule ou à une irradiation mixte (irradiation externe et iodes radioactifs), qui ne correspondent pas précisément aux expositions des populations affectées par l'accident de Tchernobyl dues majoritairement aux iodes radioactifs.

Au total, 6 modèles de risque ont été utilisés pour faire les calculs afin de connaître l'influence des modèles sur les résultats d'excès de risque.

En raison du délai de latence entre l'exposition de la thyroïde aux rayonnements ionisants et l'apparition d'un cancer de cet organe (au moins 5 ans), les retombées de l'accident de Tchernobyl en France ne peuvent pas être à l'origine d'un excès de cancers de la thyroïde sur la période antérieure à 1991. Le calcul de risque est donc fait à partir de 1991, sur deux périodes : 1991-2000 et 1991-2015.

Pour ces deux périodes, le nombre de cancers de la thyroïde spontanés dans ce groupe d'enfants a également été estimé à l'aide des données sur la fréquence de ces cancers par tranche d'âge, disponibles à partir des registres des cancers pour la période 1982-1992 ; ces estimations sont elles-mêmes entachées d'une incertitude qui a été évaluée. Les résultats de ces calculs sont rassemblés dans le tableau ci-après.

Période	Nombre de cancers de la thyroïde spontanés	Nombre de cancers de la thyroïde en excès	Pourcentage en excès par rapport au nombre de cancers spontanés
1991-2000	97 ± 20	Entre 0,5 et 22,0	0,5 à 22,7 %
1991-2015	899 ± 60	Entre 6,8 et 54,9	0,8 à 6,1 %

Estimation des cancers de la thyroïde spontanés et des excès de cancers chez les personnes âgées de moins de 15 ans en 1986 qui résidaient dans la zone I, selon les modèles retenus

Ces résultats montrent que, selon le modèle choisi, les excès de cas estimés sont inférieurs ou comparables aux incertitudes sur l'estimation du nombre de cancers spontanés : ces excès devraient dès lors être difficilement détectables du point de vue épidémiologique. Compte tenu des limites méthodologiques indiquées ci-dessus et des incertitudes sur l'existence d'un risque aux faibles doses, il est aussi possible que l'excès réel de cancers thyroïdiens soit nul aux niveaux de doses considérés ici.

Ces résultats ont conduit l'IPSN et l'InVS à formuler des conclusions présentées dans l'encadré 2, sur le risque induit par l'accident de Tchernobyl en France et sur la faisabilité d'études épidémiologiques sur le cancer thyroïdien.

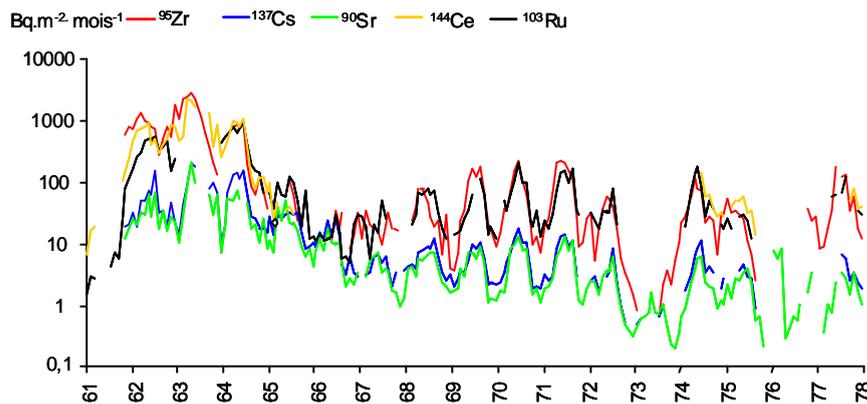
¹⁵ Coefficient permettant de calculer un excès de cancers en fonction de la dose reçue par une population exposée

Encadré n°1 : Les retombées radioactives en France des essais d'armes nucléaires

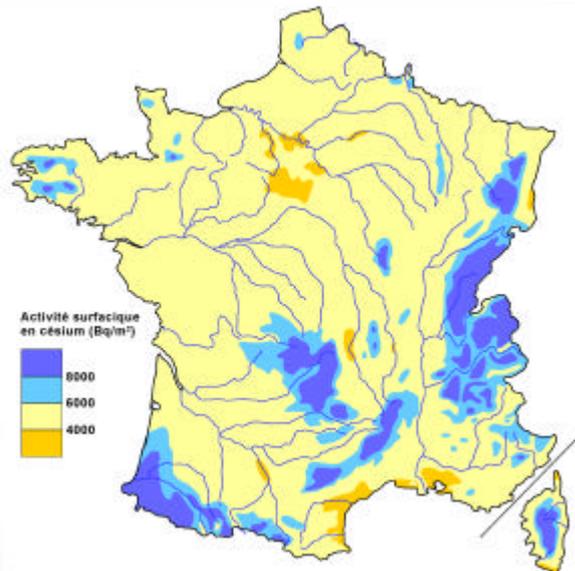
De 1945 à 1980, plus de 500 essais nucléaires atmosphériques ont été réalisés par les Etats-Unis, la Russie, la Grande Bretagne, la France et la Chine. Ils constituent à ce jour le seul apport de radionucléides à l'échelle planétaire, et la principale source de radioactivité artificielle dans l'environnement.

La plupart des explosions, notamment les explosions russes et américaines ayant eu lieu dans l'hémisphère Nord, c'est dans cet hémisphère que les retombées cumulées depuis 1945 ont été les plus fortes. La bande comprise entre 40° et 50° de latitude Nord, où se trouve la France, a été la plus touchée. Une vingtaine de radionucléides ont été mesurés en France dans des échantillons d'air, d'eau de pluie, dans les principaux aliments, et jusque dans les plateaux repas des établissements scolaires, depuis 1961. La figure ci-dessous présente les dépôts radioactifs mensuels en région parisienne pour 5 de ces 20 radionucléides, entre 1961 et 1978. Comme les dépôts de ^{95}Zr , ^{103}Ru ou ^{144}Ce , les dépôts de ^{131}I , ^{106}Ru , ^{141}Ce ont été 5 à 10 fois plus importants que ceux de ^{137}Cs et ^{90}Sr , mais ils ont aujourd'hui disparu en raison de leur courtes périodes radioactives (de 8 jours à 2 ans). Les dépôts de plutonium ont été beaucoup plus faibles.

Comme pour les retombées de l'accident de Tchernobyl, l'essentiel de ces dépôts s'est effectué lors des pluies. C'est pourquoi, bien que les retombées des essais aériens d'armes nucléaires aient été assez homogènes sur l'ensemble du territoire, les dépôts ont été plus importants sur les régions où les précipitations annuelles sont les plus élevées.



La carte ci-jointe présente les dépôts cumulés de ^{137}Cs de 1945 à 1981. Elle correspond à la carte des précipitations moyennes annuelles en France. De l'ordre de 5000 Bq/m² en moyenne, les dépôts de ^{137}Cs ont pu dépasser 8000 Bq/m² et jusqu'à 13000 Bq/m² sur les zones les plus arrosées des Alpes, du Jura, des Vosges, du Massif Central et notamment de la Montagne Noire, des Pyrénées Atlantiques et de Bretagne.



Seuls les radionucléides de longue période subsistent encore aujourd'hui : ^{137}Cs , ^{90}Sr , plutonium (238, 239, 240 et 241 et son descendant ^{241}Am). L'essentiel des retombées de ces essais ayant eu lieu avant 1963, il reste aujourd'hui moins de 40% des dépôts cumulés présentés dans cette carte. Sur les zones les plus touchées, cette rémanence peut donc atteindre 5000 Bq/m² de ^{137}Cs .

Encadré n° 2 : Evaluation du risque de cancer de la thyroïde en France

Une augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde dans la population générale française est constatée depuis plus de vingt ans suscitant les interrogations du public quant au lien avec l'accident de Tchernobyl. A la demande de la direction Générale de la Santé, une étude a été effectuée en 2000 pour quantifier le risque de cancers de la thyroïde lié aux retombées de l'accident de Tchernobyl en France. L'objectif était d'apprécier si une étude épidémiologique permettrait de mettre en évidence une augmentation de la fréquence de ces cancers due aux retombées de l'accident de Tchernobyl*. L'étude a porté sur la population jugée la plus sensible : les sujets âgés de moins de 15 ans et résidant dans l'Est de la France au moment de l'accident de Tchernobyl. Les risques spontanés de cancer de la thyroïde dans cette population ont été estimés à partir des données des registres de cancer en France. Les doses à la thyroïde pour cette population ont été estimées à partir de l'ensemble des données de contamination disponibles et le calcul de risque a été réalisé à partir de différents modèles disponibles dans la littérature internationale, en faisant l'hypothèse d'une relation dose-effet linéaire sans seuil. Quel que soit le modèle de risque choisi, l'augmentation de la fréquence de ces cancers due aux retombées de l'accident de Tchernobyl est trop faible pour être mise en évidence par une étude épidémiologique. Certains modèles aboutissent même à une absence totale d'excès. Bien que des incertitudes entourent ces résultats, ils fournissent un ordre de grandeur de l'excès de cancers de la thyroïde qui pourrait être observé dans cette population suivie sur une vingtaine d'années.

Le laboratoire d'épidémiologie de l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a entrepris une recherche permettant de réduire les sources d'incertitude dans l'évaluation des risques de cancer de la thyroïde après une exposition aux rayonnements ionisants. Il s'agit, dans le cadre d'une thèse, de proposer une approche intégrée du calcul des risques de cancer pour des situations variées d'exposition, pour des groupes de population et des périodes de temps différents, en utilisant les connaissances et les données disponibles telle que l'incidence des cancers en France, les relations dose-effet ou encore certains facteurs dont les interactions avec les rayonnements sont connues. Dans le développement de cette approche intégrée, deux aspects particuliers seront approfondis : la projection dans le temps des cancers spontanés et des cancers en excès et la quantification des incertitudes attachées aux estimations de risque. Les hypothèses sous-jacentes, les conditions et les limites d'application des modèles seront discutées afin de fournir des éléments d'interprétation des résultats.

L'amélioration du système d'enregistrement des cancers de la thyroïde en France a été discutée dans le cadre d'un groupe de travail, coordonné par l'InVS (institut national de veille sanitaire); il a été décidé de mettre en place un registre national des cancers de la thyroïde chez l'enfant, parallèlement à celui des autres tumeurs solides.

* « Évaluation des conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France : dispositif de surveillance épidémiologique, état des connaissances, évaluation des risques et perspectives ». Rapport (75 pages) et synthèse (20 pages) sur <http://www.IRSN.fr> et <http://www.invs.sante.fr>.

Encadré n°3 : Présentation de l'étude sur l'incidence des cancers de la thyroïde en Franche Comté

Cette étude compare l'incidence des cancers de la thyroïde chez les enfants de moins de 15 ans au moment du diagnostic dans les 4 départements (Doubs, Jura, Haute-Saône, et Territoire de Belfort) de la région Franche-Comté avant et après l'accident de Tchernobyl.

Une période de latence de trois ans entre l'exposition (l'accident de Tchernobyl) et l'apparition du cancer a été retenue. La période 1980-89 a donc servi de période de référence alors que la période 1990-98 est celle où une augmentation de l'incidence a été recherchée. Les données médicales ont été collectées auprès de l'ensemble des médecins généralistes et spécialistes libéraux par le biais de l'Union Régionale de Médecins Libéraux (URML) de Franche-Comté, des services hospitaliers, des centres de Protection Maternelle et Infantile (PMI) et du registre des cancers du Doubs.

Les résultats ont montré un doublement non significatif du taux d'incidence des cancers de la thyroïde dans la deuxième période ($p=0,48$) et l'absence de variation de l'incidence des cancers de la thyroïde entre les quatre départements. Ces résultats ne permettent pas de trancher entre une absence totale d'augmentation et l'impossibilité de mettre en évidence une augmentation faible. Par contre, les auteurs rejettent la possibilité d'une augmentation importante de l'incidence des cancers de la thyroïde dans cette région.

Ce type d'étude ne peut pas aboutir à un jugement de causalité entre une exposition et la survenue d'une maladie même lorsqu'une association statistiquement significative est observée. De plus, cette étude présente certaines limites :

- Au vu de l'incidence faible des cancers de la thyroïde (de l'ordre de 1 pour 1 million d'enfants par an), de la taille de la zone d'étude et de la période d'étude, peu de cas ont été recensés. Ceci rend très difficile la mise en évidence d'une augmentation faible de l'incidence des cancers de la thyroïde.
- Le suivi longitudinal est incomplet car
 - les enfants qui ont résidé dans la région au moment de l'exposition et qui ont quitté depuis, ne sont pas intégrés dans ce suivi
 - les enfants de moins de 15 ans au moment de l'accident, restés dans la région mais ayant dépassé l'âge de 15 ans lors de la survenue éventuelle d'un cancer ne sont pas pris en compte.

Cette étude montre cependant qu'il est possible de réaliser le recueil de certaines pathologies au niveau régional en s'appuyant sur des réseaux existants. Elle milite pour la mise en place d'un registre national des cancers de la thyroïde qui viendrait compléter le registre national des cancers de l'enfant mis en place récemment et dont les premiers résultats ne seront pas disponibles avant 3 ans.

Encadré n°4: Le Groupe de réflexion de l'IRSN

Faisant suite à la catastrophe de Tchernobyl et aux débats sur la gestion de la crise en France, des livres, des articles de presse ainsi que diverses publications ont mis en cause plusieurs organismes dont l'IRSN sur des points précis de cette gestion. L'IRSN a mis en place un groupe de réflexion formé de personnes de sensibilités différentes afin que soient présentés de la façon la plus pédagogique possible les points controversés et les réponses apportées. A la suite de ces présentations, les membres de ce groupe exprimeront leur opinion et leur avis sur la qualité des réponses apportées. Ils pourront demander des précisions sur des points particuliers.

La composition du groupe a été choisie afin de répondre au souci de produire un rapport final aussi pédagogique que possible. Le groupe comprend des membres de Commissions Locales d'Information, des journalistes, des universitaires, des experts de l'IRSN.

L'objectif est d'apporter des réponses claires aux questions récurrentes concernant :

- la qualité et la pertinence des mesures de radioactivité effectuées en 1986,
- les différentes cartographies de la contamination des sols proposées depuis 1986 par le SCPRI, l'IRSN, la Communauté européenne,
- la cohérence des calculs de dose présentés depuis 1986,
- l'état des connaissances concernant les effets de la contamination de la thyroïde par les radio-isotopes à vie courte de l'iode, sur les apports dans ce domaine de la microdosimétrie et de l'épidémiologie,
- les recommandations et réglementations concernant la protection des populations en cas de contamination radioactive de l'environnement.

Tous ces points ont été présentés au cours des premières réunions du groupe, et la phase de réflexion proprement dite a maintenant débuté.

D'ores et déjà, les discussions du groupe ont amené l'IRSN à établir une cartographie de la contamination des sols français par le césium 137 à l'échelle de tout le territoire métropolitain. Cette carte a été juxtaposée à celles des autres pays européens limitrophes de la France. Ce sont ces cartes qui sont présentées dans ce chapitre 4.

Encadré n°5 : Le Groupe du Professeur Aurengo

Par une lettre signée du Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable et du Ministre de la Santé, de la Famille et des Personnes handicapées, datée d'août 2002, le Professeur Aurengo a été chargé d'établir à partir des données existantes une cartographie de la contamination du territoire français à la suite de l'accident de Tchernobyl. Cette lettre demande également au Pr Aurengo de s'attacher à étudier la cohérence des différentes sources de données existantes, à modéliser la contamination du territoire en 1986 et en déduire les doses et les risques correspondants pour la population française. Les Ministres ont également demandé de porter une appréciation sur les incertitudes de l'étude.

Pour ce faire, une commission formée d'universitaires, d'experts, de journalistes, de médecins a été créée. L'IRSN participe activement à cette commission en lui fournissant toutes les informations nécessaires à son fonctionnement. A la demande du Professeur Aurengo, l'IRSN a fourni au groupe sous la forme de CD-ROM, l'ensemble des résultats des mesures effectuées par l'OPRI et l'IPSN de 1980 à 1999 ainsi que la copie de tous les rapports publiés depuis 1986 par l'IPSN sur les conséquences de l'accident de Tchernobyl en France.



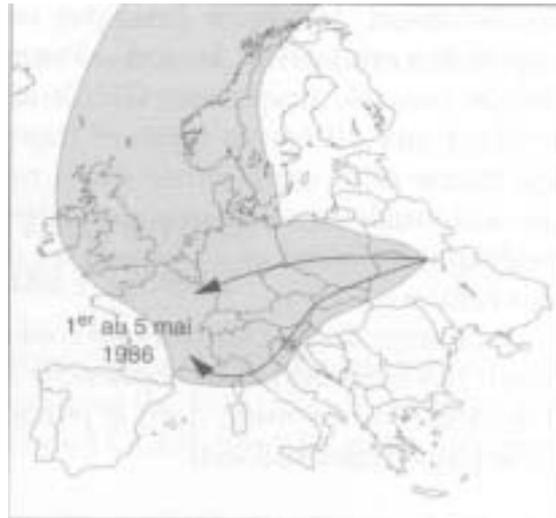


Figure 5 : trajectoire des masses d'air contaminées correspondant aux rejets du 27 avril 1986

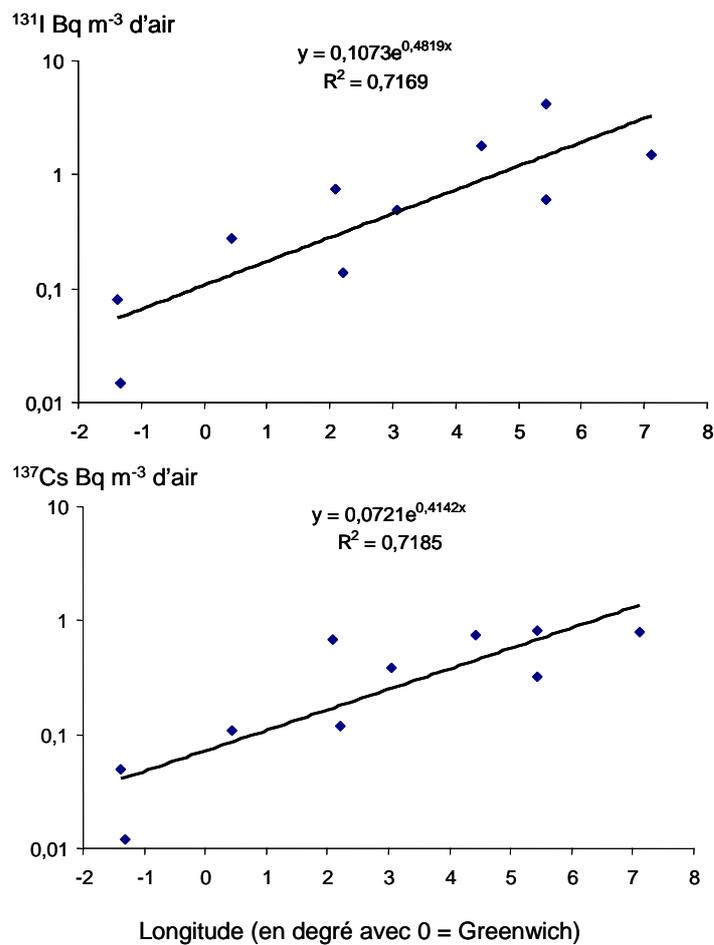


Figure 6 : Diminution des activités moyennes de ¹³¹I et ¹³⁷Cs dans l'air en France au niveau du sol en fonction de la longitude entre le 1^{er} et le 3 mai 1986

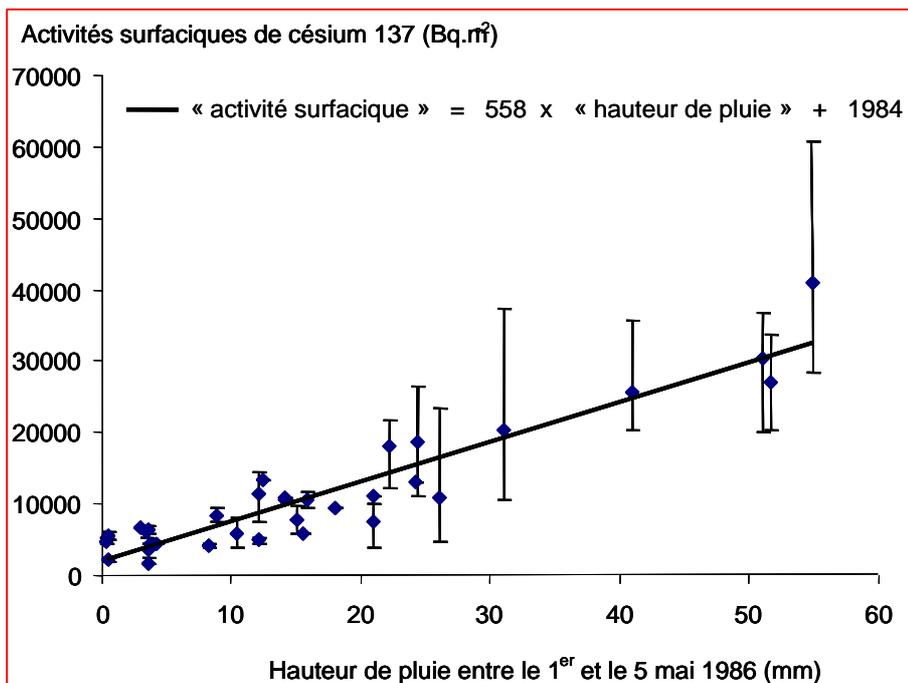


Figure 7 : relation obtenue dans la basse vallée du Rhône entre les activités de césium dans les sols et les précipitations enregistrées par Météo-France entre le 1^{er} et le 5 mai.

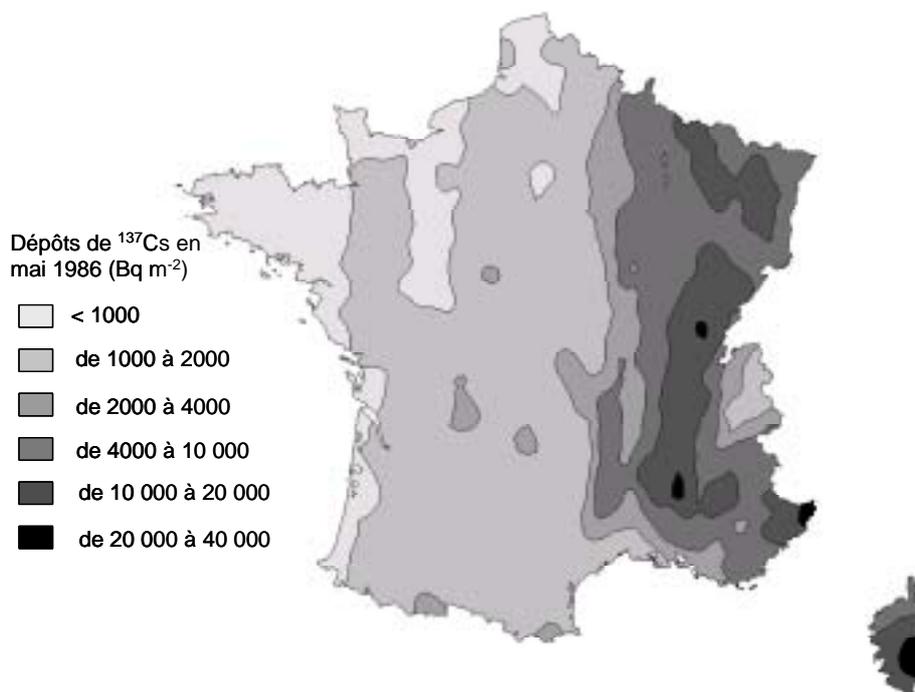


Figure 8 : carte des activités de ¹³⁷Cs déposées durant la 1^{ère} semaine de mai 1986 obtenue par le couplage de la relation entre pluies et dépôts avec les 3700 enregistrements des stations de Météo-France pour cette période.

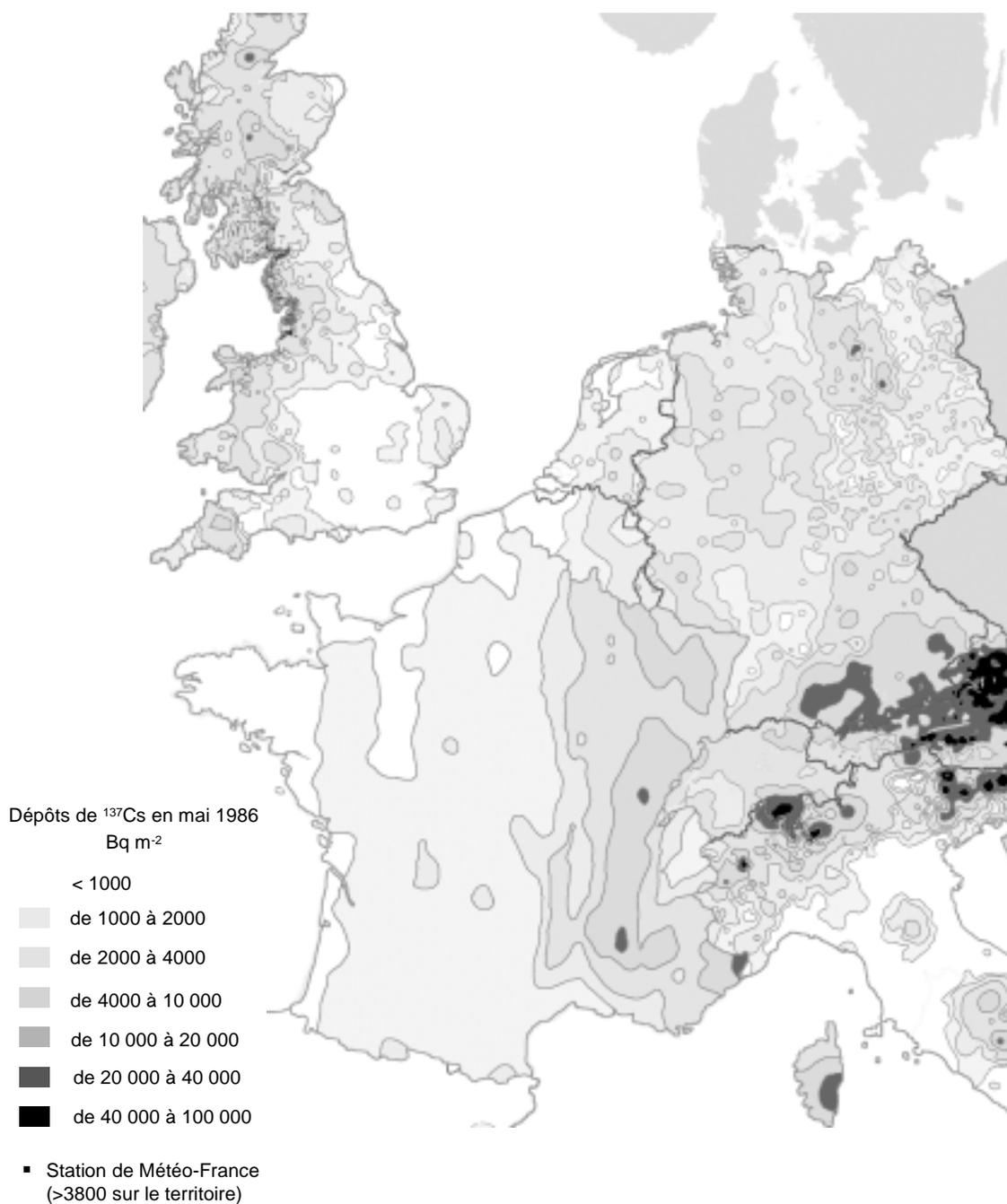


Figure 9 : Incrustation de la carte de la Figure 8 sur le fond de carte de l'ATLAS européen présentant les dépôts de ^{137}Cs consécutifs à l'accident de Tchernobyl.

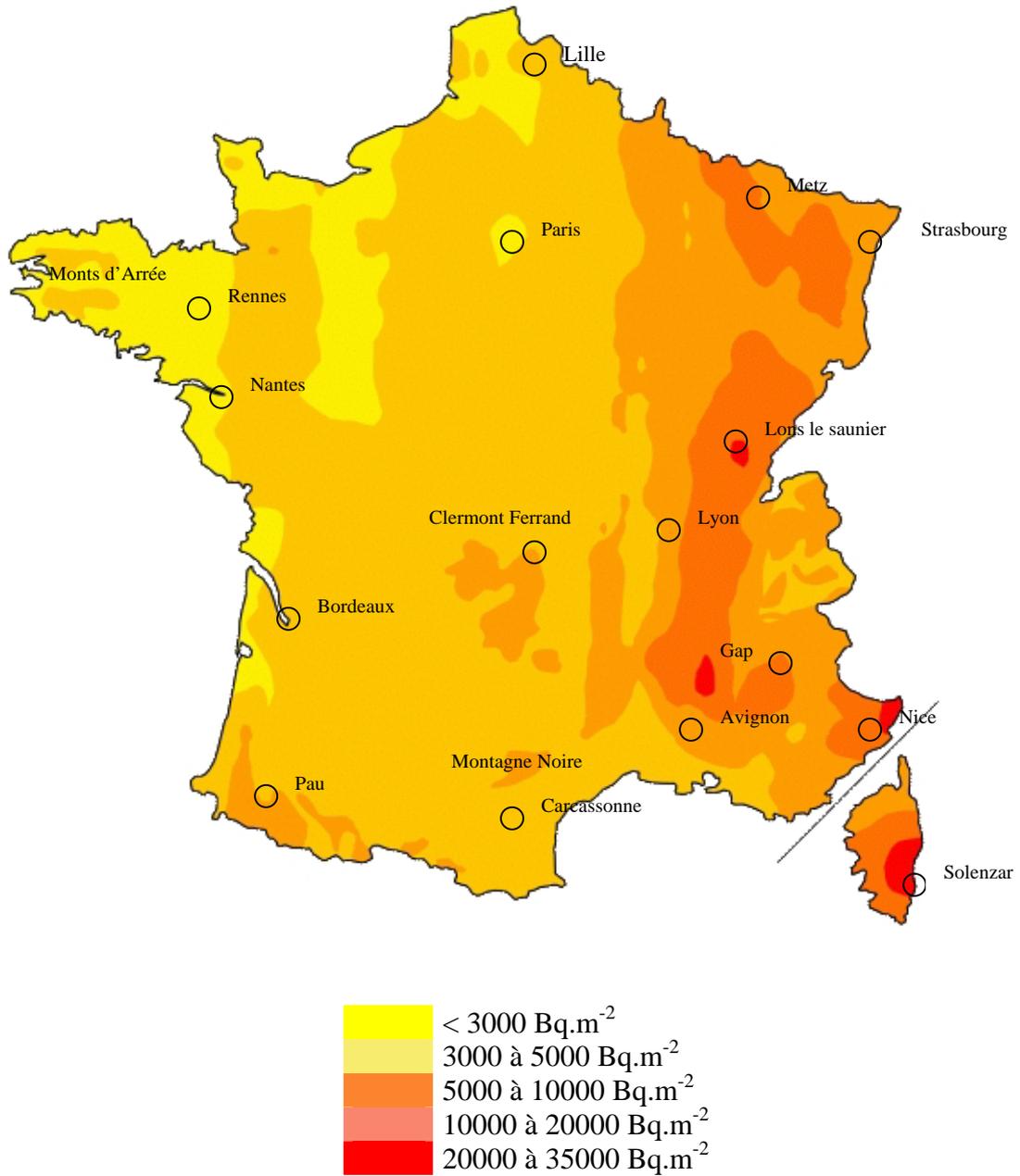


Figure 10 : Carte des dépôts cumulés de ^{137}Cs dans les sols français en 2003

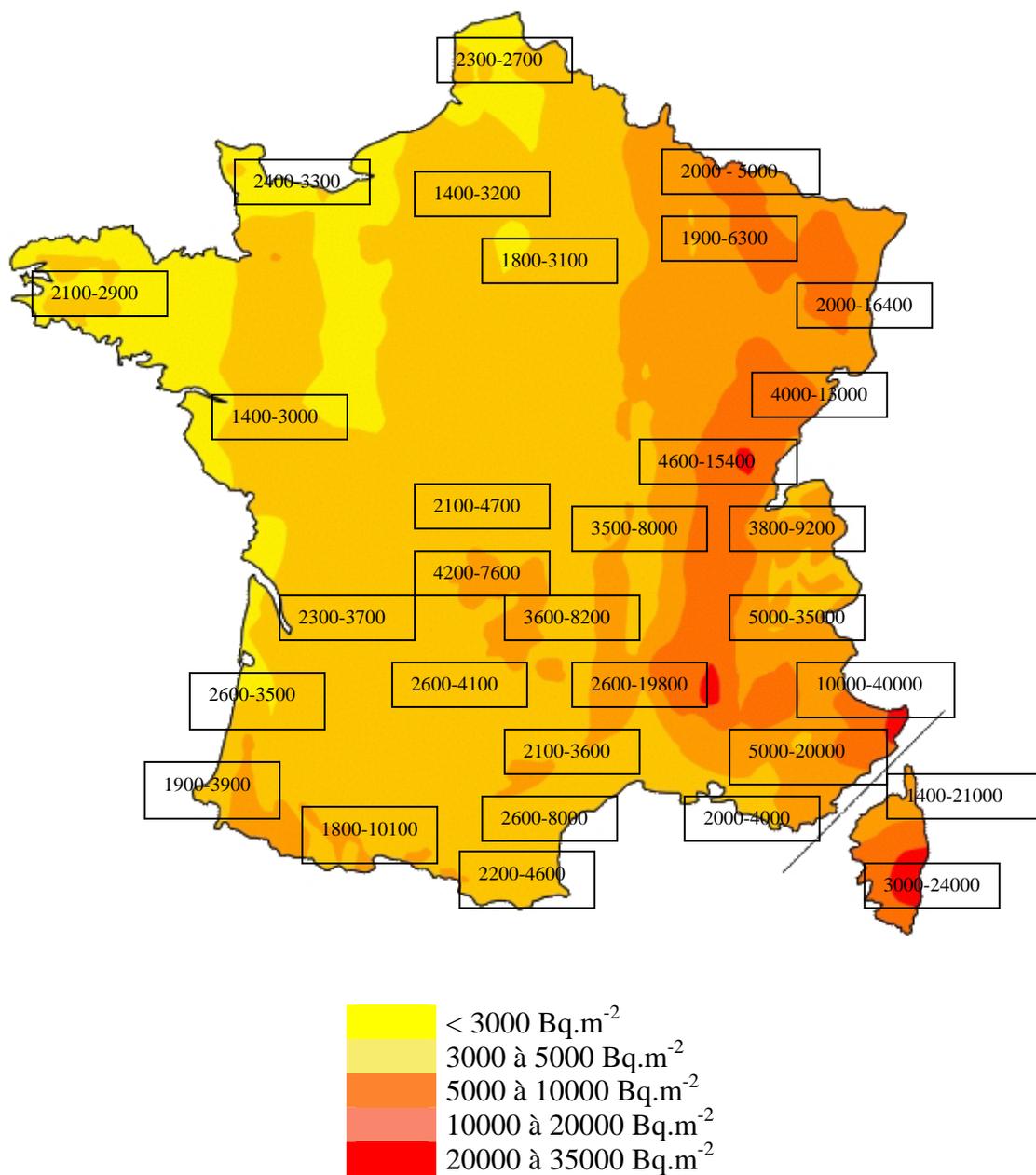


Figure 11 : Carte des dépôts cumulés de ¹³⁷Cs dans les sols français en 2003 et comparaison avec les mesures présentées dans l'ATLAS publié par la CRIIRAD

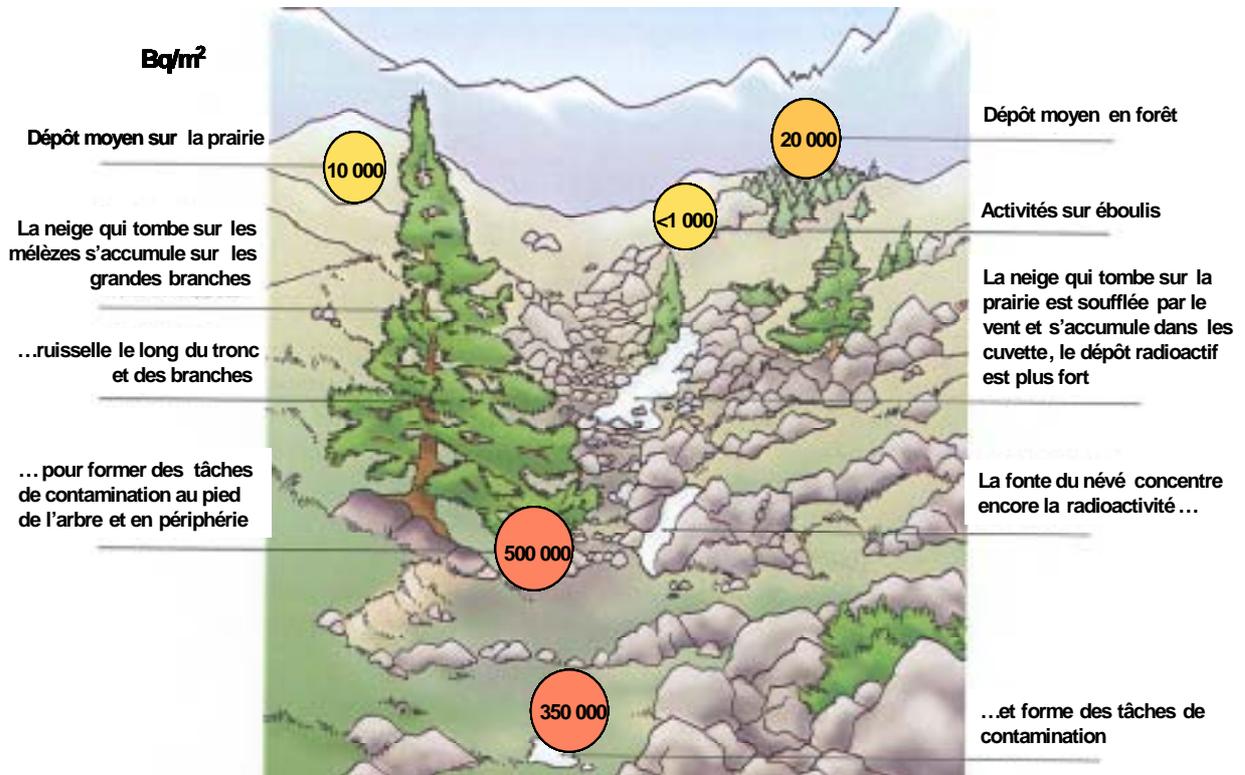


Figure 12: Localisation et origine des taches de contamination en montagne

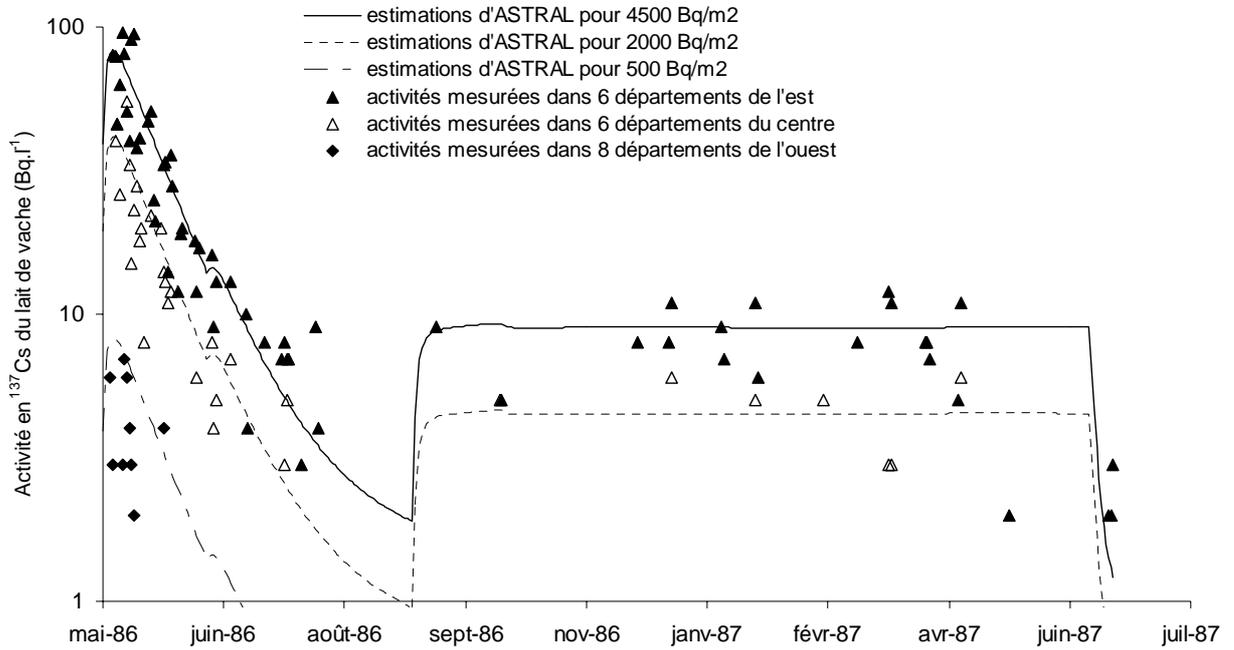


Figure 13 : Evolution de l'activité du lait produit dans les départements de l'Est, du centre et de l'ouest de la France de mai 1986 à juillet 1987

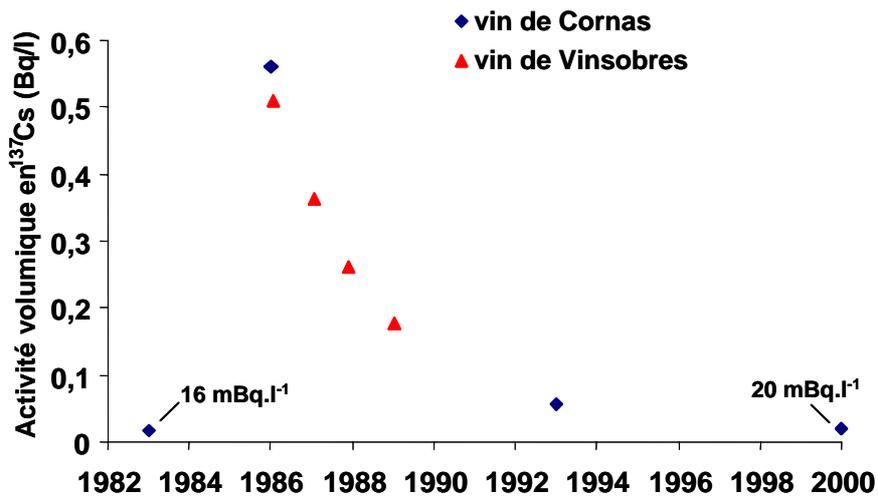


Figure 14 : Evolution des activités en ^{137}Cs des vins des côtes du Rhône

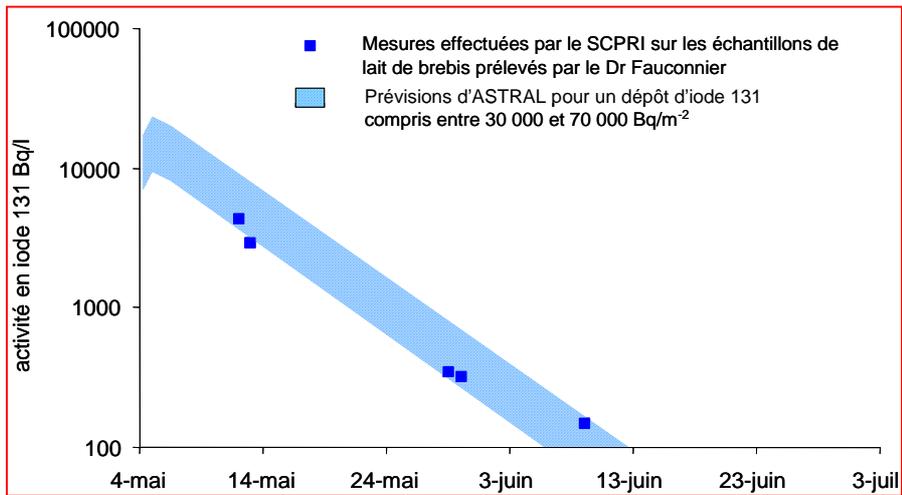


Figure 15 : Evolution des activités en iode 131 mesurées dans des échantillons de lait de brebis de Balagne et dépôt théorique correspondant estimé par le modèle ASTRAL

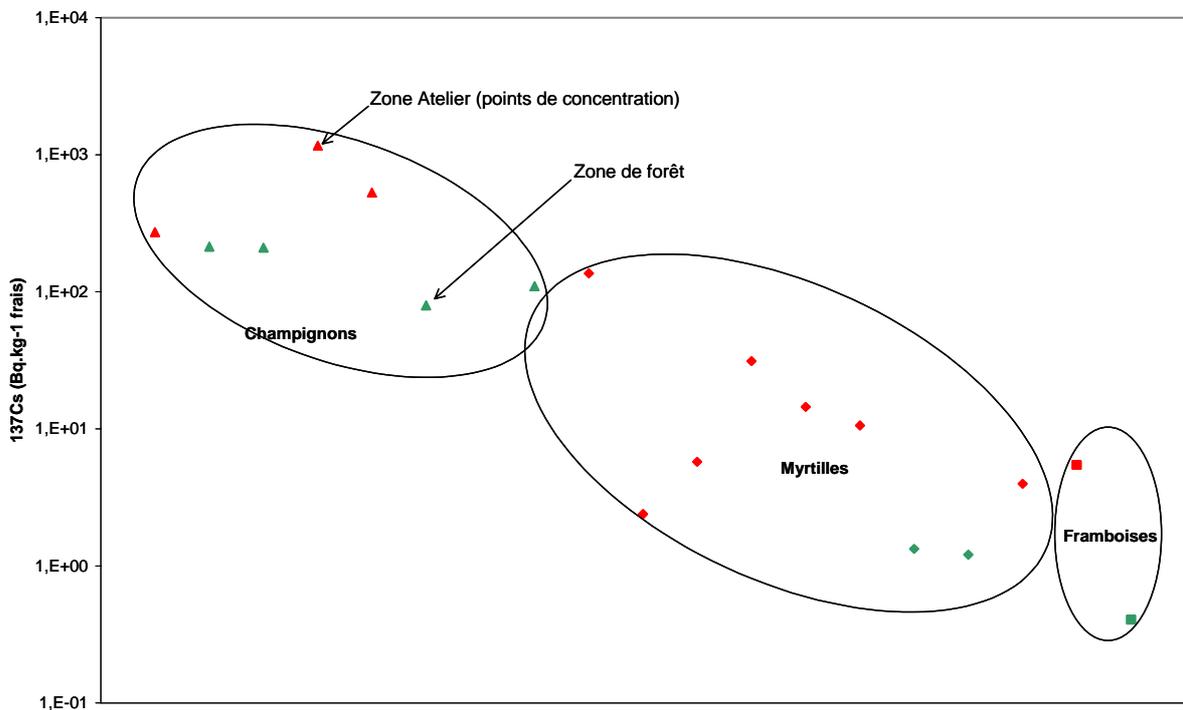


Figure 16: Activité en ¹³⁷Cs des champignons, des myrtilles et des framboises cueillies sur la zone atelier de la Lombarde et dans la zone de forêt

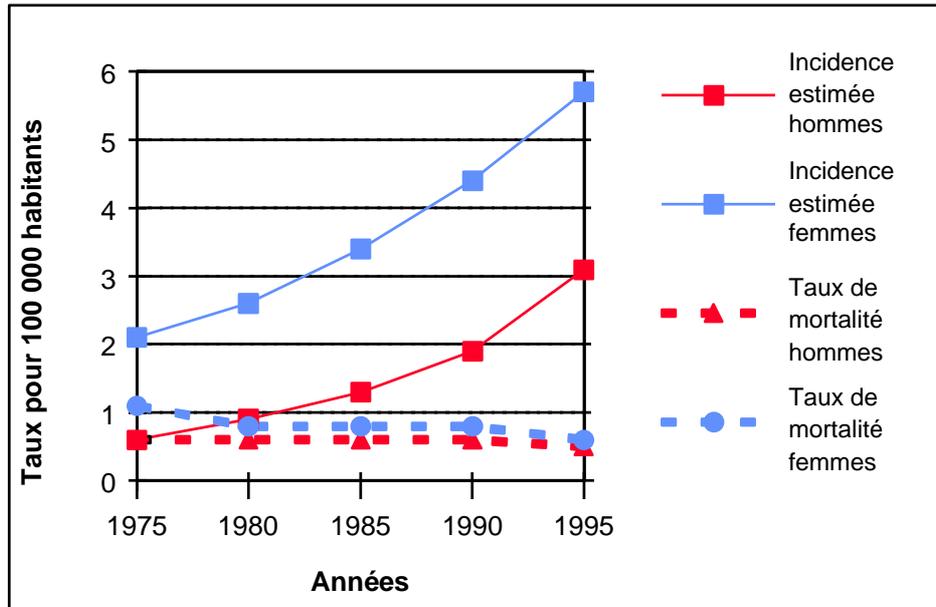


Figure 17 : incidence et mortalité du cancer de la thyroïde dans la population générale française sur la période 1975-1995 séparément chez les femmes et les hommes [rapport DGS-FRANCIM, 1999]

Annexe 1 :

Tchernobyl en quelques chiffres

L'accident du réacteur numéro 4

Le 26 avril 1986, l'explosion du réacteur numéro 4 de type RBMK du site ukrainien de Tchernobyl, puis l'incendie du cœur du réacteur ont entraîné des rejets considérables de matières radioactives dans l'environnement ainsi que la projection de débris de combustible aux alentours de la centrale.

- La radioactivité totale rejetée dans l'atmosphère a été de l'ordre de 12 exabecquerels (milliards de milliards de becquerels) sur une durée de 10 jours.
- Le déplacement du panache radioactif a disséminé sur la plupart des pays d'Europe des radionucléides tels que l'iode 131, le césium 134 et le césium 137.
- Des milliers de tonnes de matériaux, sable, argile, plomb ont été déversés à partir d'hélicoptères pour recouvrir le réacteur ; les rejets radioactifs s'arrêtent le 5 mai.
- En 1986, les autorités russes ont fait construire en quelques mois un bâtiment appelé « sarcophage » au-dessus du réacteur accidenté.

Les personnes affectées par l'accident

- Les personnels de l'installation et les équipes de secours présents sur le site pendant les premières heures de l'accident ont subi une irradiation aiguë provenant des fragments du réacteur éparpillés sur le site, ainsi que du nuage et des dépôts radioactifs. Un syndrome d'irradiation aiguë a été confirmé chez 134 des 237 personnes hospitalisées en raison de doses élevées : 28 d'entre elles sont décédées dans de brefs délais ; 3 autres sauveteurs sont morts des suites de traumatismes. Les doses externes reçues par les travailleurs s'échelonnent entre quelques centaines de mGy et plus de 10 Gy.
- Environ 600 000 «liquidateurs » (dont 240 000 militaires) sont intervenus dans les premières années qui ont suivi l'accident pour effectuer diverses tâches : travaux auprès du réacteur, décontamination du site, construction du sarcophage. Ils ont reçu des doses importantes, pas toujours bien connues mais estimées en moyenne à 100 mGy (irradiation externe).
- Parmi les 135 000 habitants de la zone des 30 km autour de la centrale, interdite depuis l'accident, environ 115 000 ont été évacués dès la première semaine. Ils ont subi une irradiation externe estimée à 20 mSv environ en moyenne et allant jusqu'à 380 mSv pour les plus exposés. Ils ont également subi une irradiation par inhalation de poussières radioactives, représentant une dose efficace interne (corps entier) estimée à environ 10 mSv et une dose moyenne à la thyroïde estimée à 0,5 Gy.
- Environ 220 000 personnes de Biélorussie, de Russie et d'Ukraine ont été déplacées des zones contaminées après 1986, pour être relogées ailleurs.

Les habitants actuels des territoires contaminés

En tout, environ 150 000 km² de territoire de l'ex-Union Soviétique ont été contaminés par des dépôts de césium 137 dépassant 37 000 Bq/m².

Les habitants actuels des zones contaminées sont continuellement soumis à une exposition externe et à une exposition par ingestion d'aliments contaminés.

- Ils sont environ 1,4 million dans les zones à plus de 185 000 becquerels/m² (zone où les entreprises industrielles ou agricoles existantes ne peuvent pas être étendues et où de nouvelles entreprises ne peuvent pas être créées).
- Ils sont près de 5,5 millions dans les régions où la contamination des sols est comprise entre 37 000 Bq/m² et 185 000 Bq/m² (zone où une surveillance radiologique doit toujours être assurée).

Le reste de la population générale de l'ancienne URSS, environ 280 millions de personnes, vit sur des territoires dont le niveau de contamination en césium 137 est inférieur à 37 000 Bq/m².

Les conséquences sanitaires de l'accident

Dans les Républiques d'Ukraine, de Biélorussie et de Russie, environ 1 800 cas de cancers de la thyroïde ont été observés entre 1986 et 1998, chez les personnes qui avaient moins de 18 ans en 1986. Chez les adultes, l'augmentation relative observée de cette maladie depuis l'accident de Tchernobyl est plus modérée ; les causes de cette augmentation qui pourrait s'expliquer par une amélioration du dépistage des petites tumeurs cancéreuses, sont en cours d'étude dans le cadre de l'Initiative Franco-Allemande.

Le nombre théorique de décès par cancer causés par l'accident au sein des populations exposées est estimé entre quelques milliers et quelques dizaines de milliers sur la vie entière des personnes concernées. En pratique, il est impossible de déterminer, par des études épidémiologiques, le nombre réel de décès provoqués par l'accident au sein de la population, en raison des autres facteurs de risque de cancer et du nombre important de décès par cancers survenant dans la population générale indépendamment de l'exposition aux retombées de l'accident de Tchernobyl.

Les conséquences de l'accident en France

L'Est de la France a été la région la plus touchée par les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl.

Les enfants qui résidaient dans l'Est de la France en 1986 ont été les plus touchés par les retombées de l'accident, en recevant une dose à la thyroïde estimée, en moyenne, à environ 10 mSv (enfants d'un an). Bien que le risque ne soit pas connu à ce niveau de dose, le nombre de cancers de la thyroïde théoriquement induits au sein de cette population se situe entre 0,5 et 22 cas sur la période 1991-2000, à comparer au nombre spontané de cancers de la thyroïde dans la même population sur la même période, estimé à 97 ± 20 .

L'arrêt définitif de la centrale de Tchernobyl

Afin de renforcer durablement la tenue du sarcophage, un projet a été lancé en 1998 pour 8 ans par un groupe de travail d'experts en sûreté nucléaire du G7 et par le gouvernement ukrainien. Ce projet, d'un montant actuel d'environ 760 millions de dollars, est financé majoritairement par la BERD (plus de 710 millions) et par le gouvernement ukrainien (50 millions).

Afin de préparer une stratégie de déclassement de la centrale et définir les premiers projets d'investissement sur le site de Tchernobyl et dans le secteur énergétique ukrainien, les pays du G7, la Commission européenne et l'Ukraine ont conclu le 20 décembre 1995 un protocole d'accord en faveur de la fermeture de la centrale de Tchernobyl. Sur les 1,4 milliard de dollars investis à ce jour par les pays occidentaux et les organismes internationaux dans les projets relevant du protocole d'accord, les trois quarts correspondent à des dons, issus pour près de 60 % des pays de l'Union européenne et de la Commission européenne. La majeure partie de ces dons, *plus de 910 millions de dollars*, a été consacrée au financement de modifications techniques du réacteur numéro 3, d'installations entrant dans le cadre du déclassement de la centrale¹ et du projet d'amélioration de la sécurité du « sarcophage » recouvrant les ruines du réacteur numéro 4, qui a explosé en 1986.



¹ Il s'agit notamment de la construction d'une installation de conditionnement et d'entreposage des combustibles usés, d'ateliers de traitement des déchets solides et liquides issus de l'exploitation de la centrale et d'une unité de production de chaleur pour les installations du site.

Annexe 2 :

Coopération internationale pour Tchernobyl

L'Initiative Franco-Allemande

1. Le contexte

En 1995, après plusieurs années de négociations avec le G7 et la Commission européenne, l'Ukraine a pris l'engagement d'arrêter les réacteurs de la centrale de Tchernobyl au plus tard en l'an 2000. A la suite de cet engagement, le G7, la Commission européenne et l'Ukraine ont signé un accord en décembre 1995, pour accompagner la fermeture de la centrale.

L'aide financière et technique occidentale apportée dans ce cadre, s'organise autour de quatre axes prioritaires

- réformes économiques et restructuration du secteur énergétique ;
- investissements dans le secteur énergétique ;
- sûreté nucléaire (sûreté du sarcophage de la tranche 4 accidentée et préparation de l'arrêt définitif des tranches 1, 2 et 3 de la centrale de Tchernobyl) ;
- gestion sociale de la fermeture de la centrale (reconversion d'un bassin de plusieurs dizaines de milliers d'emplois directs et indirects).

En septembre 1995, quelques mois avant la signature de l'accord du G7, le Ministre ukrainien de la Protection de l'Environnement et de la Sûreté Nucléaire, Youri Kostenko, lançait un appel à tous les gouvernements, afin d'obtenir un soutien scientifique, technique et financier pour la création d'un centre international de recherche et de technologie sur les problèmes résultant d'accidents nucléaires et d'irradiation. Premier objectif : trouver des solutions aux conséquences de l'accident de Tchernobyl.

2. L'organisation de l'Initiative Franco-Allemande

En réponse à l'appel du gouvernement ukrainien, les Ministres français et allemand de l'Environnement ont annoncé conjointement, à Vienne, le 12 avril 1996, une initiative de coopération avec l'Ukraine, la Biélorussie et la Russie sur des projets scientifiques relatifs aux conséquences de l'accident de Tchernobyl. Trois thèmes d'étude ont été retenus : la sûreté du sarcophage, l'impact de l'accident sur l'environnement (radioécologie) et la santé des populations affectées.

En juillet 1997, la France, l'Allemagne et l'Ukraine ont formalisé l'Initiative Franco-Allemande par la signature d'un accord entre l'IPSN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire), son homologue allemand la GRS (Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit) et le Centre de Tchernobyl (Chernobyl Centre *for Nuclear Safety, Radioactive Waste and Radioecology*, créé par décret du gouvernement ukrainien en 1996).

L'Initiative Franco-Allemande est financée par les gouvernements et les électriciens français (EDF) et allemands (groupement VdEW). Les trois programmes de coopération, dotés d'un budget de l'ordre de 6 millions d'Euros, ont été mis en œuvre entre 1997 et 2003.

Dans le cadre de cet accord, l'IPSN et la GRS ont organisé un soutien méthodologique auprès de laboratoires ukrainiens, russes et biélorusses pour la réalisation de projets scientifiques s'inscrivant de façon complémentaire dans chacun des trois axes de collaboration.

Un accord intergouvernemental signé le jour de la fermeture de la centrale de Tchernobyl, le 15 décembre 2000, par la France, l'Allemagne et l'Ukraine est venu renforcer le soutien des trois pays à l'Initiative Franco-Allemande. Il prévoit la participation de la France et de l'Allemagne au Centre international de Tchernobyl sur la sûreté nucléaire, les déchets radioactifs et la radioécologie.

3. Les enjeux

Depuis dix-sept ans, de nombreuses études ont été menées sur les conséquences de l'accident de Tchernobyl dans les républiques concernées de l'ex-URSS. Elles ont été réalisées avec ou sans la participation d'instances internationales et d'experts scientifiques de pays occidentaux, sans réelle coordination. Certaines n'ont jamais été diffusées, d'autres ont fait émerger des résultats épars, hétérogènes, voire contradictoires quant à la portée écologique et sanitaire de l'accident du 26 avril 1986.

L'objectif essentiel de l'initiative franco-allemande est donc d'aider à collecter et valider des données existantes afin de constituer une base d'informations sûre et objective, utile à la planification de contre-mesures, à l'information du public et aux travaux scientifiques ultérieurs.

Depuis 1997, 38 projets ont été signés : 7 sur la sûreté du sarcophage de Tchernobyl, 9 sur les conséquences radiologiques de l'accident et 20 sur l'impact sanitaire sur les populations des zones contaminées, 1 sur l'intégration des bases de données et 2 avec le Centre de Tchernobyl.

Des résultats concrets ont été maintenant obtenus. Ainsi la totalité des informations a été collectée dans le projet concernant la sûreté du sarcophage, les bases de données radioécologiques thématiques ont été complétées pour chacun des neuf sous-projets et sont réunies et intégrées dans la base de données commune REDAC (RadioEcological Database After Chernobyl). Cette base de données contient des dizaines de milliers de valeurs de transferts des radionucléides dans l'environnement, d'efficacité des contremesures, des exemples de validation et de développement de modèles à l'aide des données ainsi rassemblés. Le travail se poursuit pour le projet santé sur le suivi des effets à long terme sur les populations exposées à différents niveaux de contamination, en particulier les effets cancéreux ; les effets liés à une exposition in utero ; les facteurs alimentaires et leurs conséquences sur le statut nutritionnel et les effets psychologiques chez les liquidateurs. Le renforcement des liens entre les trois projets permet d'harmoniser, dans la mesure du possible, les outils et le référencement géographique utilisés en Biélorussie, Russie, Ukraine. L'introduction des données dans la base de données implantée au Centre de Tchernobyl est en cours, voire achevée pour certains des sous-projets. La conception du site internet du Centre de Tchernobyl, présentant les résultats généraux des trois projets, se poursuit. Le site sera opérationnel courant 2003.

4. Santé

→L'initiative franco-allemande

Dans le cadre de l'Initiative franco-allemande pour Tchernobyl, l'IPSN et la GRS ont établi des collaborations scientifiques dans quatre domaines : les malformations congénitales, la nutrition, les cancers, la dosimétrie.

→Étude des malformations congénitales en Biélorussie

Une collaboration avec l'Institut des Maladies Héréditaires à Minsk (Biélorussie) a débuté en 1998 associant l'IPSN, EUROCAT (*European Registration of Congenital Anomalies*) et l'Institut Européen des Génomutations (Lyon). La collaboration a pour objectifs de valider les données sur les anomalies congénitales enregistrées en Biélorussie avant et après l'accident de Tchernobyl et de mettre en place d'autres études pour vérifier si des augmentations de divers types d'anomalies congénitales peuvent être ou non détectées.

→Etude des habitudes alimentaires et du statut nutritionnel en Ukraine

Une collaboration entre l'IRSN, l'Institut Scientifique et Technique de l'Alimentation et de la Nutrition (Paris) et l'Institut National de Nutrition de Kiev (Ukraine) a débuté en 1999. L'objectif de cette étude est d'une part de décrire les habitudes alimentaires après l'accident afin de disposer des informations nécessaires à une estimation de la dose interne et d'autre part de rechercher des problèmes relevant de la santé publique.

→Les cancers

L'initiative franco-allemande a choisi de soutenir conjointement l'ensemble des registres de cancers (tumeurs solides et leucémies) en Biélorussie, en Ukraine et dans les régions contaminées de Russie, afin de décrire l'évolution de ces cancers dans le temps. Cette étude permettra également de vérifier si l'excès observé chez les personnes, âgées de moins de 10 ans au moment de l'accident, persiste quand elles atteignent l'âge adulte.

→La dosimétrie

Dans le domaine de la dosimétrie, une collaboration a débuté avec l'Institut Scientifique de Médecine Radiologique de Kiev (Ukraine) pour décrire les pratiques de surveillance dosimétrique des « liquidateurs » entre 1986 et 1990, et fournir une description détaillée des résultats de l'évaluation des doses reçues par ce groupe.

5. Radioécologie

L'un des trois volets de l'Initiative Franco-Allemande pour Tchernobyl est un programme de coopération sur l'étude des conséquences radioécologiques de l'accident, essentiellement dans la zone des 30 km, ainsi que dans les régions particulièrement contaminées de Gomel (Biélorussie) et de Briansk (Russie) (cf. figure 18).



Figure 18 : carte des territoires étudiés

Dans ce cadre, l'IRSN et la GRS coordonnent différents projets menés par des laboratoires ukrainiens, russes et biélorusses.

→ Les principaux résultats obtenus à ce jour

- Projets « généraux » : ces projets relatifs à la description écologique (géographique, démographique, etc) et radioécologique (évolution au cours du temps de la contamination) ont permis d'établir des cartes thématiques ou de contamination pour les deux tiers des oblasts (régions administratives des pays de la CEI) choisis.
- Projet « déchets » : ce projet a pour objectif de recenser toutes les tranchées ou stockages provisoires de déchets radioactifs, de caractériser ces dépôts et de quantifier les déchets qui y sont présents. Il existe environ 1 000 entreposages en Ukraine (dont 800 créés entre 1986 et 1987), 80 en Biélorussie et 19 en Russie.

Pour mener à bien ce projet, il a été nécessaire d'établir une classification commune des déchets pour les trois pays en cause, qui avaient des pratiques différentes depuis l'indépendance en 1991. Cette classification qui tient compte des spécificités des réglementations nationales, est fondée sur les activités présentes.

De la même façon, une classification commune pour les entreposages a été adoptée par les organismes des trois pays en fonction de critères de conception, de profondeur, de présence ou d'absence de structure ouvragée, de présence ou d'absence d'une couverture, de conditionnement ou non du déchet.

Seul le tiers des entreposages d'Ukraine a pu être étudié et la base de données comporte la caractérisation de 429 stockages ou « tranchées ».

- Quatre projets concernant les transferts de radionucléides des sols vers le milieu biologique (plantes et animaux), vers les eaux de surface par ruissellement et dans le milieu aquatique ont nécessité une unification dans les trois pays de la classification employée pour caractériser les sols. 6574 données concernant la migration des radionucléides dans les sols et les transferts en milieu agricole et milieu forestier sont rassemblées et validées dans la base de données correspondante, pour 50 espèces de plantes différentes. Ces résultats mettent en évidence la variation des facteurs de transferts en fonction des caractéristiques agrochimiques des sols et du temps (cf fig. 19).

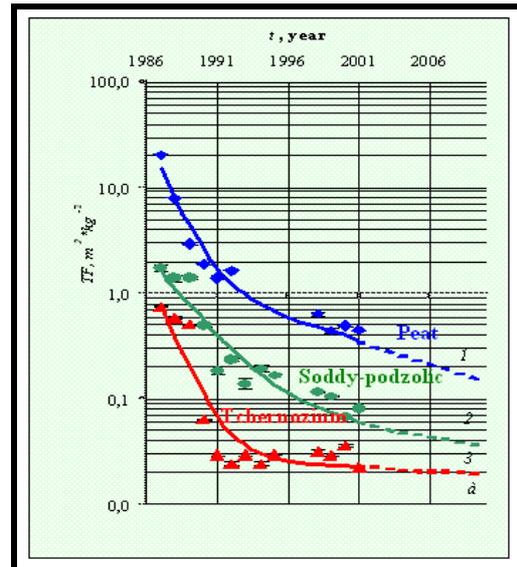


Fig 19 : Evolution du facteur de transfert du ¹³⁷Cs au maïs

Les facteurs de transferts aux animaux (13574 valeurs) sont réunis dans la base de données avec, pour paramètres principaux, les espèces animales y compris les animaux sauvages, les pratiques en matière de nourrissage et le temps. (cf figure 20)

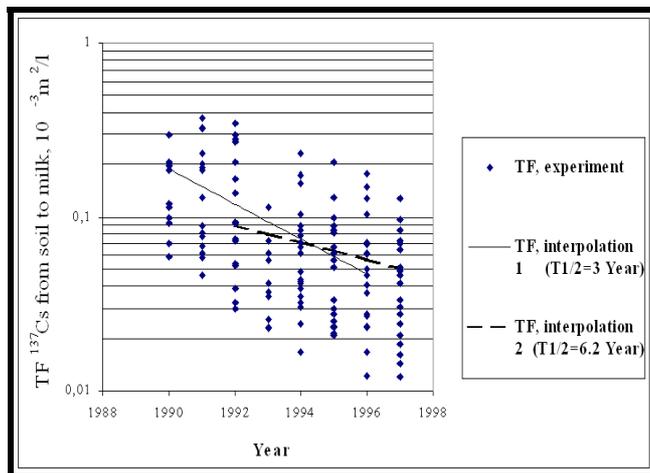


Fig 20: Evolution du facteur de transfert du ¹³⁷Cs au lait

- Pour les projets traitant des transferts par ruissellement depuis les sols contaminés vers le milieu aquatique, puis dans celui-ci, différents modèles ont été testés à l'aide des données expérimentales rassemblées (2126 valeurs relatives au ruissellement) et les paramètres principaux (biotiques, abiotiques et cinétiques) influant sur les transferts en dans les eaux douces ont été étudiés. (cf fig. 21)

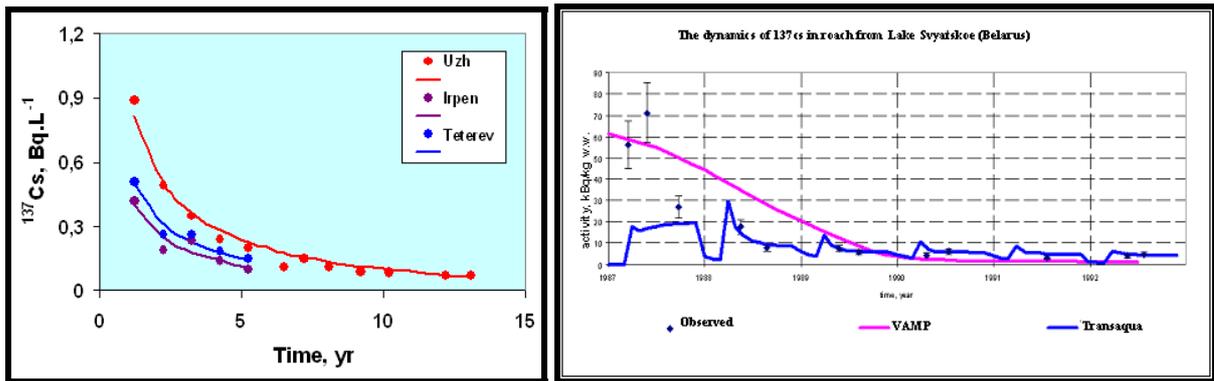


Fig 21: validation des modèles à l'aide des données expérimentales de Tchernobyl

- Projets relatifs aux contre-mesures : il s'agit de deux projets traitant des contre-mesures appliquées après l'accident respectivement en milieu urbain et en milieu agricole. Une synthèse des modèles concernant les transferts en milieu urbain, a été effectuée, le modèle choisi (EXPURT) a été testé avec les données expérimentales.

Concernant les contre-mesures en milieu agricole ou naturel, l'ensemble des méthodes employées, classées en 6 grandes familles, a été répertorié en fonction des domaines d'application et des techniques mises en œuvre.

L'efficacité des contre-mesures en milieu agricole a été évaluée. On dispose ainsi dans la base de données de 5261 valeurs d'efficacité, exprimées en terme facteur de réduction de contamination et de dose. Les changements de type ou variété de culture et de transformation agroalimentaires des produits sont parmi les moyens les plus efficaces (cf. figure 22)

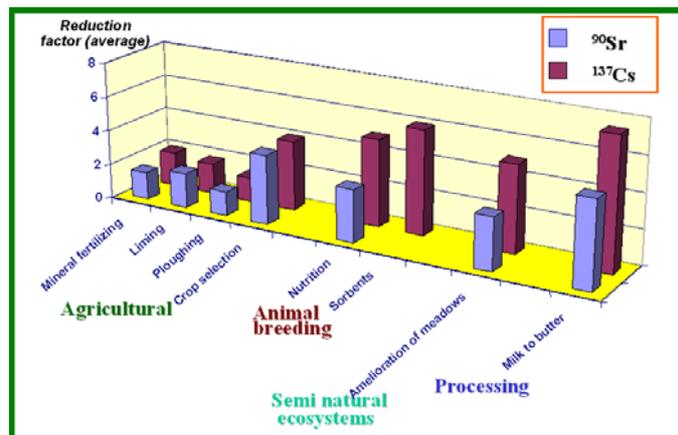


Fig 22 : efficacité des contremesures en milieu agricole et semi-naturel (exemples)

L'ensemble de ces résultats pourront être utilisés par les spécialistes pour le développement de modèles et fournira aux décideurs des outils pour la gestion de crise des situations post accidentelles.

6. La base de données « sarcophage »

Dans le cadre de « l'Initiative Franco-Allemande pour Tchernobyl », l'IPSN et son homologue allemand la GRS travaillent avec le Centre de Tchernobyl, l'exploitant de la centrale (ChNPP), l'ISTC (Centre Interdisciplinaire Scientifique et Technique « sarcophage » de l'Académie des Sciences d'Ukraine), le NIISK (Académie ukrainienne des sciences de l'ingénierie) et l'Institut Kurchatov de Moscou à réaliser une base de données sur l'état et la sûreté du « sarcophage ».

Les contrats relatifs à ce projet ont été signés en 1998 entre l'IPSN et la GRS d'une part, les Instituts russes et ukrainiens d'autre part. Depuis, la totalité des informations ont été collectées auprès des différents participants, puis introduites dans la base de données après validation et mise en forme ; l'ensemble a été achevé en mai 2002.

Ainsi constituée, la base de données est consultable à l'aide d'un logiciel 3D qui permettra, à terme, une « visite virtuelle » du sarcophage et de ses abords afin de faciliter la localisation et la recherche d'informations. Celles-ci sont disponibles, suivant les cas, sous forme de tableaux de données, de graphes, de textes, de plans, de photographies ou de films.

Plus précisément, cette base de données s'articule autour des quatre projets placés sous la responsabilité des différents instituts, décrits ci-après :

- La construction et les équipements du « sarcophage » ainsi que les infrastructures annexes (NIISK) : ce projet a permis de rassembler les documents techniques relatifs à la construction du réacteur numéro 4 et aux constructions édifiées sur ce réacteur après l'accident, ainsi qu'à établir un inventaire des équipements présents dans cette structure.
- La situation radiologique à l'intérieur du « sarcophage » (Institut Kurchatov). Ce projet a permis de rassembler les résultats des mesures effectuées par cet Institut dans les différentes zones du bâtiment pour déterminer les débits de dose, les niveaux de contamination et la localisation des émissions radioactives.
- L'évaluation de la situation radiologique à proximité du « sarcophage » (ISTC) tient compte des évolutions dues à la décroissance de la radioactivité mais aussi au transport de radioéléments par l'air ou par l'eau.
- Le rassemblement des données relatives aux quantités, activités et caractéristiques des matières radioactives présentes à l'intérieur du « sarcophage » (Institut Kurchatov). Ces matières sont constituées des débris du cœur du réacteur qui ont été recouverts de sable et de matériaux déversés par hélicoptère juste après l'accident, et du magma radioactif qui s'est écoulé vers le fond du bâtiment où il s'est solidifié.

Fin 2002, la dernière version validée de la base de données a été transmise au Centre de Tchernobyl, à GRS et à l'IRSN. La version finale de cette base est également disponible pour chacun des organismes ayant participé à son édification.



Annexe 3 :

Les réacteurs RBMK

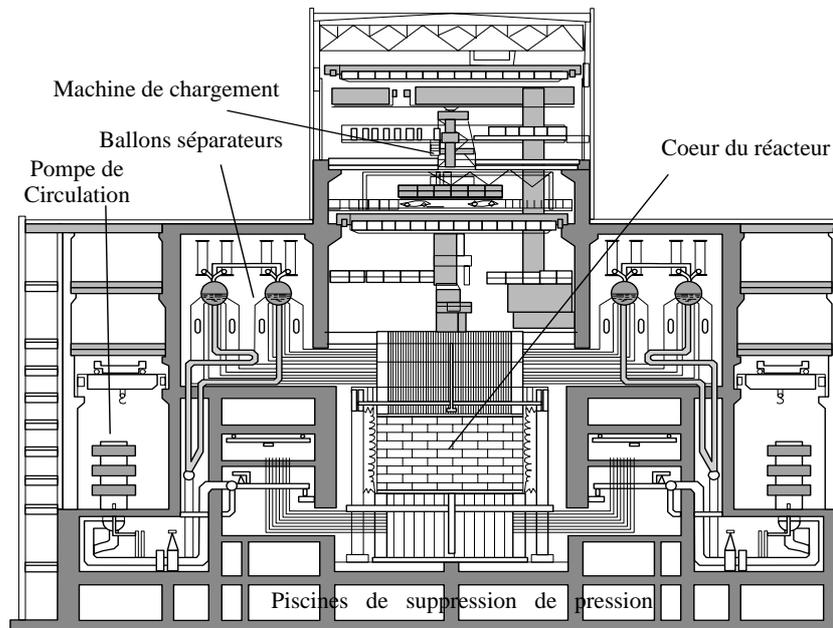


Figure 23 : coupe simplifiée d'un réacteur RBMK de puissance 1000 MW

1. Les caractéristiques des réacteurs RBMK

Les réacteurs RBMK sont des réacteurs à neutrons thermiques utilisant le graphite comme modérateur et l'eau légère bouillante comme fluide caloporteur. Le combustible est de l'oxyde d'uranium enrichi à environ 2 % en uranium 235.

Chaque assemblage combustible est contenu dans un « tube de force » à l'intérieur duquel circule le fluide de refroidissement. Les tubes de force, environ 1700, sont placés verticalement dans l'empilement de graphite. L'ensemble repose sur une structure mécano-soudée contenue dans une cavité en béton. Au-dessus du réacteur, une « machine de chargement » permet le déchargement et le chargement, en marche, du combustible dans les tubes de force.

Le contrôle de la réactivité est assuré par environ 200 barres absorbantes réparties dans tout le cœur du réacteur. Les barres sont placées dans des tubes de force analogues aux précédents.

Deux boucles indépendantes assurent le refroidissement du réacteur. Chaque boucle comprend deux ballons séparateurs et quatre pompes de recirculation (3 en fonctionnement et 1 en réserve). Le mélange d'eau et de vapeur qui sort de chaque tube de force après passage dans le réacteur arrive directement par une tuyauterie dans un des ballons séparateurs. Depuis ces ballons séparateurs, la vapeur est envoyée à la turbine alors que l'eau retourne vers les collecteurs et les pompes de recirculation, qui alimentent les tubes de force par un système de sous-collecteurs et de tuyauteries.

Un circuit de refroidissement de secours permet de refroidir le cœur en cas de brèche du circuit principal de refroidissement (rupture d'une tuyauterie du circuit de circulation, rupture d'un conduit de vapeur ou rupture d'une tuyauterie d'alimentation en eau).

→ **Les avantages en faveur de ce type de réacteur sont, d'après le concepteur :** l'absence de cuve sous pression, l'absence de générateur de vapeur, le renouvellement du combustible de manière continue et donc la souplesse du cycle du combustible, la possibilité de régler le débit de refroidissement canal par canal et, par conséquent, de contrôler chacun d'entre eux tant du point de vue thermique que du point de vue de l'intégrité des gaines du combustible.

→ **Les inconvénients sont :** la complexité du système de distribution et de collecte du fluide de refroidissement, la forte accumulation d'énergie thermique dans les structures métalliques et le graphite, l'absence d'enceinte de confinement, la difficulté du contrôle du cœur.

Trois générations de réacteurs RBMK ont été développées ; à ce jour 13 réacteurs de ce type sont encore en service en Russie et en Lituanie¹.

Les RBMK souffrent d'abord de défauts génériques liés à leur conception, à leur qualité de réalisation, et à leur sûreté en exploitation. Depuis l'accident de Tchernobyl, et l'identification des principaux défauts de conception des réacteurs RBMK, des programmes d'amélioration de la sûreté ont été entrepris sur les différents réacteurs de ce type. Ils ont conduit à des améliorations sensibles de leur niveau de sûreté en général, même si des écarts notables sont à souligner entre les réalisations de certains réacteurs par rapport à d'autres.

2. Les améliorations entreprises sur les réacteurs RBMK

Les principales améliorations génériques apportées à tous les réacteurs RBMK pour remédier aux défauts de conception sont les suivantes :

→ **Réduction du coefficient (effet) positif de température :** un coefficient positif de température signifie qu'une augmentation de la température du cœur du réacteur se traduit par une augmentation de la réactivité.

La perturbation initiale se trouve ainsi amplifiée. Il s'agit donc d'un effet « déstabilisant » qui rend difficile le contrôle du réacteur. Dans les réacteurs à eau sous pression, qui constituent le parc français, le coefficient de température est négatif.

Pour réduire l'effet déstabilisant du coefficient positif des RBMK, les principales mesures mises en œuvre par les exploitants depuis 1986 ont été l'augmentation du nombre de barres de contrôle² dans le cœur et l'accroissement de l'enrichissement du combustible. Sans rendre le coefficient négatif, ces mesures ont contribué à le réduire sensiblement.

¹ Les autorités lituanienes se sont engagées à arrêter définitivement le réacteur numéro 1 en 2005, et de prendre une décision concernant le réacteur numéro 2 en 2004.

² Les barres de contrôle permettent de réguler la puissance d'un réacteur nucléaire et d'arrêter le réacteur en cas d'évolution dangereuse de certains paramètres.

→ **Modification du système d'arrêt d'urgence** : ce système, le plus important des systèmes de sûreté du réacteur, présentait des carences significatives :

- temps d'insertion des barres trop long ;
- mauvaise conception des crayons absorbants, qui provoquait une augmentation de la réactivité au début de leur insertion ;
- fiabilité insuffisante.

Les mesures d'amélioration ont été les suivantes :

- installation d'un système d'arrêt rapide (24 nouvelles barres) ;
- modification de la conception des crayons absorbants ;
- installation de nouveaux signaux d'alarme pour le déclenchement de l'arrêt d'urgence.

→ **Inspection en service des tuyauteries importantes** :

La prévention contre les pertes de réfrigérant primaire constitue un élément essentiel dans la prévention des risques associés à un réacteur nucléaire. Après l'accident de Tchernobyl, des programmes d'inspection plus détaillés, visant à assurer un suivi des tuyauteries primaires et des défauts pouvant les affecter, ont été mis en place. La qualité des inspections (méthodes, outils,...) a été améliorée et une base de données des défauts détectés a été constituée pour suivre l'évolution des défauts. Des critères ont été établis par les experts pour décider de la nécessité de réparations des défauts observés. Au cours des dernières années, la presque totalité des tuyauteries concernées ont été contrôlées dans tous les réacteurs RBMK.

→ **Amélioration de la capacité de dépressurisation du système de confinement** :

Les RBMK sont conçus avec plusieurs compartiments étanches permettant le confinement de différentes zones à l'égard des accidents qui y sont considérés (en particulier la pression engendrée par une brèche). Les analyses de sûreté menées après l'accident de Tchernobyl ont conclu à l'insuffisance de la capacité de ce système à évacuer la pression résultant de certains scénarios accidentels (en particulier les ruptures multiples de tubes de force). Des modifications ont été alors apportées à ce système pour en augmenter la capacité d'évacuation et de dépressurisation lors de telles situations accidentelles.

Il faut souligner enfin les efforts importants qui ont été accomplis au cours des 15 dernières années, notamment par les pays occidentaux, pour sensibiliser les exploitants de ces réacteurs à l'importance de la "culture de sûreté" et du comportement de l'homme à tous les stades de l'exploitation de l'énergie nucléaire. Rappelons que, au-delà de la mauvaise conception des réacteurs RBMK, l'un des facteurs lors de la catastrophe de Tchernobyl a été la mauvaise gestion de la situation pré-accidentelle par les opérateurs.



LEXIQUE

Aérosol : dispersion, en particules très fines, d'un liquide dans un gaz (air ou oxygène).

Atome : constituant de base de la matière, composé d'un noyau (neutrons et protons) autour duquel gravitent des électrons.

Barre de contrôle : tube composé de matériaux absorbant les neutrons, introduit verticalement au sein d'un réacteur dans le but de moduler la puissance.

Becquerel : unité légale de mesure internationale utilisée en radioactivité. Le Becquerel (Bq) est égal à une désintégration par seconde ; le MBq (Méga ou million de Bq), le GBq (Giga ou milliard de Bq) sont couramment utilisés.

Césium (Cs, numéro atomique 55) : métal alcalin rare et toxique, dont les caractéristiques sont comparables à celles du potassium. L'isotope 137 est un produit de fission radioactif que l'on trouve dans les différents circuits de la zone nucléaire. Sa période radioactive est de 30,17 ans.

Combustible nucléaire : matière fissile utilisée dans un réacteur pour y développer une réaction nucléaire en chaîne. Le combustible neuf est constitué d'oxyde d'uranium enrichi en uranium 235 (entre 3 et 4 % dans le cas des réacteurs à eau sous pression). Après utilisation dans un réacteur nucléaire, on parle de **combustible irradié**.

Criticité : état d'un milieu dans lequel s'entretient à niveau constant une réaction nucléaire en chaîne. Le risque résulte de phénomènes de fission incontrôlés dans les matériaux fissiles (dans le cas du cœur du réacteur accidenté de Tchernobyl notamment).

Curie (Ci) : ancienne unité d'activité radioactive ; 1 Ci = 37 milliards de Becquerels.

Dosimétrie : détermination, par évaluation ou par mesure, de la dose de rayonnement absorbée par une substance ou un individu.

Gamma (g) : rayonnement électromagnétique, très pénétrant mais faiblement ionisant, émis par la désintégration d'éléments radioactifs. Des écrans de béton ou de plomb permettent de s'en protéger.

Gaz rares : gaz dépourvus d'affinité chimique et ne donnant aucun composé ; il s'agit de l'argon, de l'hélium, du krypton, du néon, du xénon et du radon.

Globules blancs (ou leucocytes) : cellules du sang assurant la défense contre les micro-organismes. Les personnes atteintes d'irradiation aiguë présentent un taux de globules blancs inférieur à la normale et leur système immunitaire est donc affaibli.

Gray : unité de dose d'irradiation absorbée par un corps (par exemple un organe ou un tissu vivant) exposé à des rayonnements ionisants, correspondant à l'énergie absorbée par unité de masse.

G7 : regroupe les sept pays les plus industrialisés au monde : les Etats-Unis, la France, la Grande-Bretagne, l'Italie, l'Allemagne, le Japon et le Canada.

Iode (I, numéro atomique 53) : élément dont les isotopes radioactifs sont présents dans les produits de fission. L'isotope 131 a une période radioactive de 8,02 jours.

Incidence : rapport entre le nombre de nouveaux cas d'une maladie survenus dans une population exposée, pendant une période donnée, et l'effectif de cette population.

Irradiation externe : exposition à des rayonnements ionisants émis par une source (par exemple des matières radioactives) située à l'extérieur du corps humain. L'irradiation externe diminue en s'éloignant de la source ou en plaçant un écran absorbant entre la source et la personne exposée, et disparaît si on supprime la source ou si on place un écran efficace.

Irradiation interne : exposition à des rayonnements ionisants émis par des radionucléides présents dans le corps humain (on parle également de contamination interne). L'incorporation des radionucléides peut se faire par inhalation ou ingestion de substances radioactives, ou par pénétration à partir d'une contamination cutanée, notamment en cas de blessure. L'irradiation interne dure pendant toute la période de présence des radionucléides dans le corps, qui dépend à la fois de la période radioactive du radionucléide (décroissance radioactive) et de sa période biologique (décroissance par élimination par les voies naturelles).

Isotopes : éléments dont les atomes possèdent le même nombre d'électrons et de protons, mais un nombre différent de neutrons. Il existe par exemple trois isotopes d'uranium naturel : l'uranium 234 (92 protons et 142 neutrons), l'uranium 235 (92 protons et 143 neutrons) et l'uranium 238 (92 protons et 146 neutrons). On connaît actuellement environ 325 isotopes naturels et 1200 isotopes créés artificiellement.

Leucémie : maladie se manifestant par la prolifération de globules blancs dans le sang et de cellules anormales révélant une altération de la moelle osseuse, de la rate ou des ganglions.

Période radioactive : temps nécessaire pour que la quantité d'atomes d'un élément radioactif ait diminué de moitié. La période radioactive varie d'un radioélément à un autre : 110 minutes pour l'argon 41, 8 jours pour l'iode 131 et 4,5 milliards d'années pour l'uranium 238. A ce jour, aucune technologie ne permet de modifier la période radioactive d'un radioélément.

Produits de fission : fragments de noyaux lourds produits par la fission nucléaire ou la désintégration radioactive ultérieure de nucléides formés selon ce processus.

Plutonium (Pu, numéro atomique 94) : métal obtenu par irradiation de l'uranium avec des neutrons. L'isotope 239 a une période de 24 110 ans.

RBMK (*Reactor Bolshoi Mochnosti Kanalnyj*) : réacteur atomique à tubes de force, refroidi par un mélange eau-vapeur et modéré par du graphite. De tels réacteurs sont en service dans trois centrales russes (Leningrad, Koursk, Smolenk) et une lituanienne (Ignalina).

REP (Réacteur à Eau sous Pression) : réacteur atomique dans lequel l'eau du circuit primaire est maintenue sous pression (155 bars) pour éviter sa vaporisation. Le parc électronucléaire français repose sur l'utilisation de cette filière, qui compte le plus grand nombre d'unités en service dans le monde.

Sievert : unité légale de la dose équivalente (reçue par un tissu ou un organe – ex. : la thyroïde) et de la dose efficace (reçue par le corps entier) qui permet de rendre compte de l'effet biologique produit par une dose absorbée donnée (voir définition du Gray). La dose équivalente et la dose efficace ne sont pas des quantités physiques mesurables ; on les obtient par le calcul. On calcule la dose équivalente à un organe donné en multipliant la dose absorbée par cet organe (exprimée en Gray) par un facteur de pondération radiologique dont la valeur dépend de la nature et de l'énergie du rayonnement. On calcule la dose efficace en faisant la somme des doses équivalentes, chacune étant multipliée par un facteur de pondération tissulaire propre au tissu ou à l'organe considéré.

Strontium (Sr, numéro atomique 38) : métal alcalino-terreux analogue au calcium, dont certains isotopes sont très abondants dans les produits de fission, en particulier l'isotope 90 (période radioactive de 28,15 ans), qui se fixe dans les tissus osseux.

Thyroïde : glande endocrine située dans le cou, en dessous de la pomme d'Adam. Elle fixe naturellement l'iode contenu dans les aliments pour sécréter plusieurs hormones intervenant dans la croissance des enfants et le métabolisme général.

Tranche : unité de production électrique comportant une chaudière et un groupe turbo-alternateur. Une tranche nucléaire se caractérise essentiellement par le type du réacteur et la puissance du groupe turbo-alternateur.

Tubes de force : cylindres (88 mm de diamètre, 4 mm d'épaisseur) qui traversent le graphite composant le cœur des réacteurs de type RBMK. Ils sont destinés à contenir les assemblages de combustible et le fluide de refroidissement qui extrait la chaleur aux assemblages de combustible et la transmet à la turbine sous forme d'énergie mécanique. Le fluide de refroidissement (eau ordinaire) circule à l'intérieur des tubes de force, de bas en haut, sous une pression d'environ 70 bars.

Uranium (U, numéro atomique 92) : l'isotope 238 de l'uranium a une période radioactive de 4,46 milliards d'années.

VVER (*Vodno-Vodianoï Energetitcheski Reactor*) : réacteur atomique à eau sous pression de conception soviétique ; son principe de fonctionnement ressemble à celui des réacteurs à eau sous pression occidentaux (REP).

