

RAPPORT 2016

LES PLANS PARTICULIERS D'INTERVENTION

EN SITUATION D'URGENCE NUCLÉAIRE

Mesures de protection
Rayons d'intervention
Distribution préventive d'iode stable

Suzanne Gazal

avec la contribution de
Yves Baron, Paul Chambon,
Albert Collignon, Jacques-Édouard Levasseur
pilote du groupe de travail
Michel Cartier

RAPPORT 2016

LES PLANS PARTICULIERS D'INTERVENTION EN SITUATION D'URGENCE NUCLÉAIRE

Mesures de protection

Rayons d'intervention

Distribution préventive d'iode stable

Suzanne Gazal

avec la contribution de

Yves Baron, Paul Chambon,

Albert Collignon, Jacques-Édouard Levasseur

pilote du groupe de travail

Michel Cartier

PRÉFACE

Le 28 mars 1979, l'accident de Three Mile Island révélait aux experts la réalité du risque de fusion du cœur dans un réacteur nucléaire. Le 26 avril 1986, une excursion de puissance dans le cœur d'un réacteur de la centrale Tchernobyl conduisait à sa destruction et à des dégâts écologiques considérables. Cet événement révélait aux responsables et au public la réalité du risque d'accident majeur dans un réacteur nucléaire et les difficultés extrêmes auxquelles sont confrontés les pouvoirs publics dans de telles circonstances pour protéger les populations, tant à court qu'à moyen et long termes. L'accident survenu à Fukushima le 11 mars 2011 révélait la plausibilité d'un accident majeur de fusion du cœur dans un réacteur de technologie occidentale, confirmait l'ampleur de la contamination à laquelle un tel accident pouvait donner lieu et témoignait de l'inadéquation des plans d'urgence et de la confusion que peut engendrer une telle situation.

La question de la protection des populations en cas d'accident avec rejets à l'extérieur du site a fait en France l'objet de la Loi du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs au titre de la préparation et de l'organisation des secours en cas d'urgence, loi qui pose le principe des plans d'urgence et singulièrement des plans particuliers d'intervention auprès des installations nucléaires de base (PPI). Ces plans n'ont véritablement attiré l'attention du public qu'à l'occasion de la catastrophe de Fukushima. En effet, si cet événement a notamment conduit les autorités de sûreté, tant au niveau français qu'au niveau international, à renforcer la sûreté des installations nucléaires, il a également conduit la société civile à s'interroger sur l'organisation de la gestion d'un accident nucléaire avec rejets radioactifs dans l'environnement.

Par ailleurs, la Loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire a confirmé et précisé le principe du droit à l'information du public en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection. Elle a confirmé la mission générale des commissions locales d'information auprès des installations nucléaires de base : assurer le suivi, l'information et la concertation en matière de sûreté nucléaire, de radioprotection et d'impact des activités nucléaires sur les personnes et sur l'environnement concernant les installations du site, missions qui supposent le développement de capacités d'expertise indépendantes des acteurs du nucléaire. Elle a donné à la fédération des commissions locales d'information (l'ANCCLI) un statut juridique.

C'est dans ce contexte, à la fois de libération de l'information, de sensibilité croissante de la société civile ainsi que de montée en puissance des commissions locales d'information et de l'ANCCLI, qu'ont émergé notamment des interrogations sur le contenu et la fiabilité en France des Plans particuliers d'intervention (PPI) : quelles sont les procédures et les périmètres de mise en sécurité des personnes et des biens en cas d'accident avec rejets radioactifs dans l'environnement ? Quel est le fondement et la justification de ces périmètres qui, au regard par exemple d'un accident comme celui de Fukushima, s'avèrent totalement inappropriés à l'ampleur des zones qui se sont trouvées impactées – comme ce fut d'ailleurs le cas dans l'ex-URSS en 1986 ? Les Plans particuliers d'intervention prévoient la mise en œuvre d'un certain nombre de mesures de protection des populations. Ces mesures sont-elles suffisantes ? Leurs modalités de mise en œuvre satisfaisantes ? Comment en particulier l'iode stable qui a vocation à protéger contre les rejets d'iode radioactif serait-il mis à la disposition du public et comment serait-il administré ?

L'ANCCLI a sollicité son Comité scientifique pour essayer de répondre avec précision à toutes ces questions et faire à leur sujet les propositions et recommandations qui lui paraîtraient opportunes – tant sur les orientations de fond des PPI que sur leur rédaction, avec pour objectif de contribuer à une meilleure protection des populations et de leur environnement en cas d'accident.

L'étude remarquable conduite par le Comité scientifique est à la mesure de la mission qui lui a été confiée.

Jean-Claude DELALONDE

*Président de l'Association nationale
des comités et commissions locales d'information (ANCCLI)*

AVANT-PROPOS

La gestion d'un accident nucléaire avec rejets à l'extérieur du site, et singulièrement la gestion de la situation d'urgence, est aujourd'hui source d'interrogations.

Ces interrogations portent en premier lieu sur les plans particuliers d'intervention (PPI), la définition de leur contenu et leur harmonisation au niveau territorial. Elles portent également sur d'autres aspects de la préparation à la gestion accidentelle, tels que la distribution préventive d'iode stable ou la réalisation d'exercices de crise.

Sollicité pour apporter une réponse à ces interrogations, le Comité scientifique de l'ANCCLI a centré sa réflexion sur les plans particuliers d'intervention (PPI), leur organisation, leurs bases techniques et méthodologiques et leurs limites, ainsi que sur les modalités de leur mise en œuvre en situation accidentelle.

Le Comité scientifique s'est particulièrement attaché à examiner les mesures de protection des populations prévues dans les PPI, les niveaux d'exposition qui déclencheraient leur mise en œuvre, leur périmètre d'application et ses fondements en termes de sûreté et de radioprotection, leur adaptation aux réalités locales.

Il a également porté une attention particulière à l'administration d'iode stable, ainsi qu'à sa distribution préventive dans et hors de la zone PPI.

Cette réflexion a conduit le Comité scientifique à proposer sur ces différents sujets des recommandations, afin de participer à l'amélioration de la protection des populations en cas d'accident - tout en insistant sur la nécessité de privilégier la concertation avec les parties prenantes.

Suzanne GAZAL

*Présidente du Comité scientifique
de l'ANCCLI*

INTRODUCTION	P.08
<hr/>	
1 LES NIVEAUX DE L'ÉCHELLE /NES DE GRAVITÉ DES INCIDENTS ET ACCIDENTS NUCLÉAIRES CORRESPONDANT À UNE ACTIVATION DU PPI	P.10
<hr/>	
2 LES NIVEAUX D'INTERVENTION ET LA MISE EN ŒUVRE DES MESURES DE PROTECTION (OU « CONTRE-MESURES ») PRÉVUES DANS LES PPI	P.13
<hr/>	
2.1- La notion de dose prévisionnelle	P.14
2.2- L'évolution des niveaux d'intervention dans le cas des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE)	P.14
2.3- Les effets sanitaires associés aux niveaux d'intervention	P.15
2.4- Le niveau d'intervention retenu dans les PPI pour l'administration d'iodure de potassium	P.17
2.5- La question des restrictions de consommation	P.17
<hr/>	
3 LES SCÉNARIOS ACCIDENTELS SUSCEPTIBLES DE CONDUIRE À L'ACTIVATION DU PPI	P.20
<hr/>	
3.1- Éléments de compréhension en matière de sûreté nucléaire : défense en profondeur et procédures de conduite	P.21
3.1.1- <i>Le concept de défense en profondeur</i>	P.21
3.1.2- <i>Approches et procédures de conduite</i>	P.22
3.2- Les scénarios accidentels à l'origine des premiers PPI	P.23
3.2.1- <i>L'accident de fusion du cœur ou « accident grave »</i>	P.23
3.2.2- <i>Cinétique des accidents et importance du rejet dans le cas de l'accident grave : la notion de terme-source</i>	P.25
3.2.3- <i>Les termes-sources initialement retenus pour l'élaboration des PPI</i>	P.25
<hr/>	
4 LE « ZONAGE » RETENU POUR LA MISE EN ŒUVRE DU PPI	P.27
<hr/>	
4.1- Les termes-sources initialement retenus en situation de fusion du cœur et la prise en compte d'accidents sans fusion du cœur	P.27
4.2- Sur la pertinence du zonage	P.28
4.2.1- <i>Les calculs de doses prévisionnelles et les niveaux d'intervention pris en compte dans la définition des périmètres du PPI</i>	P.28
4.2.2- <i>Les incertitudes relatives à l'étude des risques et aux études probabilistes de sûreté (EPS 1, EPS 2)</i>	P.30
4.2.3- <i>Le retour d'expérience des catastrophes nucléaires récentes</i>	P.34
4.2.4- <i>Conclusion</i>	P.35
4.3- Perspectives	P.36
<hr/>	
5 L'ADMINISTRATION D'IODE STABLE	P.41
<hr/>	
5.1- Pourquoi administrer de l'iode stable aux populations en cas d'accident ?	P.41
5.2- Précautions d'emploi et effets secondaires liés à l'administration d'iode stable	P.42
5.3- Les conditions de l'efficacité de l'administration d'iode stable	P.44
5.3.1- <i>Sur la dose administrée</i>	P.44
5.3.2- <i>Moment de l'administration et degré de protection</i>	P.45
5.4- La durée de la protection	P.47
5.5- La question de l'administration répétée d'iode stable	P.47

5.6- Sur la composition des rejets en iode	P.48
5.7- Les limites de l'administration d'iode stable	P.48
5.7.1- Sur le rôle des restrictions alimentaires dans la réduction de l'incorporation d'iode radioactif	P.49
5.7.2- Le rôle des radionucléides autres que l'iode dans l'exposition des populations en cas d'accident	P.49

6 CAMPAGNES DE DISTRIBUTION DES COMPRIMÉS D'IODE STABLE : LES MODALITÉS DE LA MISE À DISPOSITION DES COMPRIMÉS D'IODURE DE POTASSIUM DANS ET HORS DE LA ZONE PPI P.51

Dans la zone PPI

6.1- Historique de la distribution des comprimés d'iode stable en zone PPI des CNPE	P.51
6.2- Modalités et bilan des différentes campagnes	P.52
6.2.1- Les modalités	P.52
6.2.2- Le bilan	P.53
6.3- Observations sur les taux de couverture obtenus par retrait des boîtes en pharmacie, avant campagnes complémentaires	P.53
6.4- Les motivations des populations vis à vis du retrait des comprimés d'iode stable en pharmacie	P.53

Hors de la zone PPI

6.5- La procédure de mise à disposition	P.54
6.5.1- Aux niveaux zonal et départemental	P.54
6.5.2- Au niveau infra-départemental	P.55
6.6- Observations relatives à la circulaire interministérielle du 11 juillet 2011 et sa mise en œuvre	P.55
6.6.1- Observations relatives aux termes de la circulaire	P.55
6.6.2- Observations relatives à la mise en œuvre de la circulaire	P.56
6.7- Questions complémentaires	P.59

Par delà le clivage zone PPI/hors zone PPI

6.8- La question de l'administration répétée d'iode stable	P.59
6.9- La question du rayon du PPI et de la zone hors PPI retenus pour la distribution d'iode stable	P.59
6.10- Les installations autres que les centres nucléaires de production d'électricité (CNPE)	P.61
6.10.1- Les installations nucléaires de base (INB) autres que les CNPE peuvent être concernées par d'éventuels rejets en iode justifiant l'administration d'iode stable	P.61
6.10.2- Les sites de production d'iode radioactif à usage médical	P.61

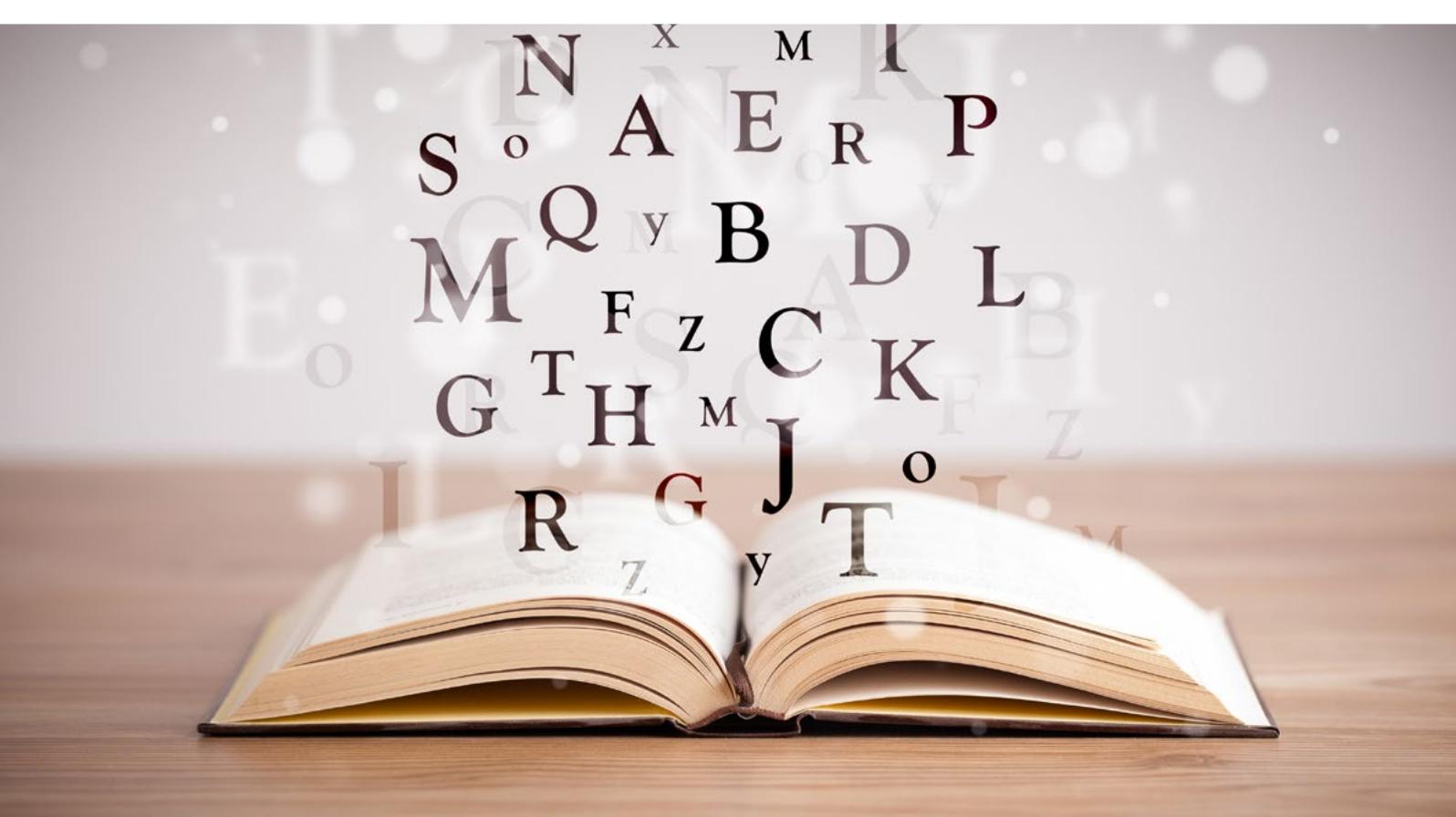
7 OBSERVATIONS D'ORDRE GÉNÉRAL RELATIVES AUX PPI P.63

7.1- La question de l'alerte	P.63
7.2- Les acteurs sanitaires de la gestion de crise	P.64
7.3- La question du post-accident	P.65
7.4- La co-construction par les parties prenantes et l'information du public, conditions de la faisabilité et de l'efficacité des PPII	P.65

CONCLUSION P.66

BIBLIOGRAPHIE P.68

ANNEXES P.77



INTRODUCTION

Le Plan national interministériel de réponse à un accident nucléaire ou radiologique majeur (SGDSN, 2014) considère trois étapes dans la phase d'urgence :

- **une période de menace de rejet**, qui résulte de défaillances ou d'aléas (naturel, technologique ou malveillant) sur une installation ou d'un problème important rencontré lors d'un transport de substances radioactives. Pendant cette période, des actions sont mises en œuvre par l'exploitant (ou les intervenants dédiés pour le cas d'un transport) pour rétablir un niveau de sûreté satisfaisant et essayer d'éviter des rejets ;
- **une période de rejets radioactifs** dans l'environnement ;
- **une période de sortie de phase d'urgence** qui intervient avec le retour de l'installation à un état maîtrisé et stable.

En France, les plans d'urgence visent à protéger les populations et sont susceptibles d'être activés lors de ces trois étapes. Ils comprennent les Plans Particuliers d'Intervention (PPI), complétés des dispositions départementales ou zonales spécifiques (déclinaison territoriale du plan national, plan ORSEC-Iode, ORSEC-Transports de matières radioactives (TMR)), ou générales (ORSEC, plans blancs élargis, etc.).

Ces plans concernent également la préparation de la phase post-accidentelle. Selon le type d'accident, la cinétique de la crise peut varier de quelques heures à plusieurs semaines.

Pour le CODIRPA (2012)¹, la période de sortie de phase d'urgence (quelques jours) commence également après la fin des rejets, l'installation ayant été ramenée dans un état maîtrisé et stable sous le contrôle de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ou de l'Autorité de sûreté nucléaire de défense (ASND). Cette phase permet de lever certaines consignes (mise à l'abri par exemple) et de préparer la phase post-accidentelle qui peut, selon les cas, durer jusqu'à plusieurs années. Elle peut être marquée par des incertitudes concernant la contamination de l'environnement et le niveau d'exposition des populations. Des mesures de protection de la

population peuvent être mises en place sur un périmètre plus large que celui du PPI (cf. le retour d'expérience de l'accident de Fukushima). Les principes et actions de la gestion post-accidentelle sont inscrits dans la doctrine « CODIRPA ».

Les mesures de protection seraient mises en œuvre à partir d'un seuil d'exposition prévisionnel des populations.

Les plans particuliers d'intervention (PPI) prévoient les mesures à prendre et les moyens susceptibles d'être mis en œuvre en cas d'accident survenant dans certains types d'installations à risque, notamment dans les installations nucléaires, et pouvant avoir un impact sur la population et l'environnement. Le principe en a été posé par la loi du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs, au titre de la préparation et de l'organisation des secours en cas d'urgence. Le décret du 6 mai 1988 relatif aux plans d'urgence précise les risques pour lesquels ceux-ci sont établis, ainsi que les mesures à prendre et les moyens susceptibles d'être mis en œuvre. Concernant les plans particuliers d'intervention, il définit les missions des services de l'État et de l'exploitant en matière d'information, d'alerte et de protection des populations. Il précise également que les communes concernées par les dispositions du plan doivent être définies et que leurs maires, ainsi que l'exploitant, doivent être consultés pour l'établissement des plans, ceux-ci devant être réactualisés tous les 5 ans. Ces indications sont succinctes et seule l'évacuation est évoquée au titre des mesures de protection des populations. Néanmoins, les trois mesures retenues par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) en 1984 que sont la mise à l'abri, l'évacuation et l'administration d'iode stable, fondent les premiers plans particuliers d'intervention qui ont été établis en France dès 1989 (cf. PPI CNPE de Golfech).

Elles sont clairement exposées dans le document DGS (1999).

Les mesures de protection seraient mises en œuvre à partir d'un seuil d'exposition prévisionnel des populations (« niveau d'intervention ») fixé réglementairement (Arrêté ministériel, 2009). Les doses prévisionnelles auxquelles sont susceptibles d'être exposées les populations en situation accidentelle sont elles-mêmes fonction des rejets prévisionnels et donc des scénarios accidentels en cause et de leur évolution possible ou attendue. La zone d'application des mesures de protection (les « périmètres » du PPI) sera donc déterminée à la fois par les niveaux d'intervention et par les caractéristiques des rejets attendus.

Une réflexion sur la mise en œuvre des contre-mesures prévues dans le PPI, et notamment sur leur rayon d'application, doit donc porter d'une part sur les niveaux d'intervention, d'autre part sur les scénarios accidentels susceptibles de conduire à des rejets à l'extérieur du site et sur l'évaluation de ces rejets. La question est de savoir, pour un scénario accidentel donné, jusqu'à quelle distance du site de l'accident les doses prévisionnelles sont susceptibles d'atteindre les niveaux d'intervention définis dans la réglementation pour l'application des contre-mesures prévues dans le PPI.

Les développements qui suivent s'inscrivent dans cette démarche. Seront étudiés :

- les niveaux d'intervention et la mise en œuvre des contre-mesures ;
- les accidents donnant lieu à activation du PPI ;
- la zone d'application des PPI.

Une attention particulière sera consacrée à une contre-mesure : l'administration d'iode stable, et la question de la distribution préventive d'iode stable sera précisément étudiée.

À l'exception des considérations relatives à l'administration d'iode stable, la présente étude est essentiellement consacrée aux PPI des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) français – la démarche pouvant être transposée à d'autres types d'installations nucléaires.



1- CODIRPA : Comité Directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation radiologique.



1. LES NIVEAUX DE L'ÉCHELLE INES DE GRAVITÉ DES INCIDENTS ET ACCIDENTS NUCLÉAIRES CORRESPONDANT À UNE ACTIVATION DU PPI

L'échelle INES de classement des incidents et accidents nucléaires est une échelle de communication. Elle comporte huit niveaux de gravité croissante, que l'on peut répartir en trois catégories ([annexe 1](#)) :

- **le niveau 0**, qui concerne des **écarts** sortant du régime de fonctionnement autorisé et des événements n'ayant **aucune importance du point de vue de la sûreté**² ;
- **les niveaux 1 à 3**, qui concernent de simples **anomalies** (niveau 1) ou des **incidents** (niveaux 2 et 3), le niveau 3 pouvant donner lieu à une **très faible exposition du public** de l'ordre d'une fraction des limites autorisées en situation normale ;
- **les niveaux 4 à 7**, qui concernent des **accidents** caractérisés par des **rejets de niveaux croissants** (rejet « mineur » < « limité » < « important » < « majeur ») qui sont à l'origine d'une exposition du public de l'ordre des limites admissibles en situation normale (1 millisievert/an) (niveau 4) jusqu'à une exposition susceptible d'avoir « des effets considérables sur la santé » (niveau 7).

L'activation du PPI interviendrait « probablement » à partir du niveau 5, le niveau 4 se limitant à la surveillance des aliments d'origine locale. Un accident de niveau 5 serait susceptible d'exiger l'application de certaines des contre-mesures prévues dans le PPI, les niveaux 6 et 7 leur application intégrale (voire au-delà pour le niveau 7, cf. catastrophe de Tchernobyl).

Comme indiqué précédemment, il convient dans un premier temps de préciser les niveaux d'exposition des populations qui conduiraient à l'activation des mesures de protection prévues dans le PPI, et de se pencher dans un second temps sur les scénarios accidentels susceptibles de conduire à l'activation du PPI, leurs conséquences en termes de rejets et de doses prévisionnelles, pour conclure sur la pertinence des zones d'application des contre-mesures retenues dans les plans particuliers d'intervention.

2- Il convient cependant de garder en mémoire qu'un accident résulte souvent d'une série d'événements qualifiés d'« écarts » sur l'échelle INES.



2. LES NIVEAUX D'INTERVENTION ET LA MISE EN ŒUVRE DES MESURES DE PROTECTION (OU « CONTRE-MESURES ») PRÉVUES DANS LES PPI

Les PPI prévoient la mise en œuvre de mesures de protection des populations : mise à l'abri, évacuation, ingestion de comprimés d'iodure de potassium (iode stable).

Ces mesures seraient mises en œuvre sur décision du Préfet et pour des doses prévisionnelles d'irradiation interne (inhalation) et/ou externe définies au plan national : 10 millisieverts (mSv) reçus par le corps entier pour la mise à l'abri, 50 millisieverts (mSv) reçus par le corps entier pour l'évacuation et 50 millisieverts (mSv) reçus par la glande thyroïde pour la prise d'iodure de potassium (Arrêté du 20 novembre 2009). Ces doses prévisionnelles sont appelées « niveaux d'intervention ».

On s'arrêtera sur les points suivants :

- la notion de dose prévisionnelle ;
- l'évolution des niveaux d'intervention ;
- les effets sanitaires associés aux niveaux d'intervention ;
- le niveau d'intervention retenu pour l'administration d'iodure de potassium ;
- les restrictions de consommation.



2.1- LA NOTION DE DOSE PRÉVISIONNELLE

La dose prévisionnelle est la dose qui serait reçue par la population exposée en l'absence de la mise en œuvre de contre-mesures. Il s'agit soit de la dose susceptible d'être reçue par le corps entier (cas de la mise à l'abri et de l'évacuation), soit de la dose susceptible d'être reçue par la glande thyroïde (cas de l'administration d'iode stable). Pour la dose au corps entier, on parlera de *dose efficace* (pour une irradiation externe) ou de *dose efficace engagée* (pour une contamination interne). Dans le cas de l'administration d'iode stable, il s'agit de la dose reçue par la glande thyroïde, dite *dose équivalente* (ou *dose équivalente engagée*) à la thyroïde. Le calcul de la dose prévisionnelle tient compte non seulement de la dose absorbée (de la quantité d'énergie cédée à la matière), mais également de certaines caractéristiques du rayonnement, et pour la dose efficace, de la cible. Elle constitue une évaluation du potentiel de nuisance

La dose prévisionnelle est la dose qui serait reçue par la population exposée en l'absence de la mise en œuvre de contre-mesures.

d'une dose de rayonnement donné sur un organisme donné (son « efficacité biologique »). Elle est exprimée en sievert (Sv) ([annexe 2](#)).

2.2- L'ÉVOLUTION DES NIVEAUX D'INTERVENTION DANS LE CAS DES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE)

S'agissant des CNPE, le PPI comportait initialement six niveaux calqués sur les niveaux du plan d'urgence interne du site (PUI), dont les niveaux 2 et 3 étaient seuls susceptibles de présenter une composante radiologique ([annexe 3](#)). L'application des contre-mesures du PPI n'était envisagée que « dans le cours » du niveau 3, *sans indication de niveaux d'intervention*.

Des niveaux d'intervention étaient cependant recommandés par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR 40, 1984, puis CIPR 63, 1992), formulés en termes de *dose efficace* et de *dose à la thyroïde*, contrairement aux niveaux des PUI formulés eux en termes d'activités rejetées. De plus, les niveaux de la CIPR consistaient en des *fourchettes de doses*.

Les valeurs hautes de ces fourchettes correspondant à des doses prévisionnelles³ au-dessus desquelles les contre-mesures étaient soit fortement conseillées (CIPR 40) soit impératives (CIPR 63) (niveaux « justifiés ») et les valeurs basses à des doses prévisionnelles au-dessous desquelles leur mise en œuvre ne présentait pas d'intérêt (CIPR 40). Celle-ci étant laissée à l'appréciation des autorités en charge de la situation d'urgence pour les doses intermédiaires (niveaux « optimisés ») ([annexe 4](#)).

À compter de 2000, les PPI ne sont plus calés sur les PUI et sont strictement dédiés à la mise en œuvre des contre-mesures. Les *niveaux d'intervention* sont clairement explicités (DGS, 1999 ; Arrêté du 13 octobre 2003). Ils sont significativement moins élevés que les niveaux « justifiés » recommandés par la CIPR 63 (d'un facteur 5 à 10 selon les contre-mesures).

Enfin, l'arrêté du 20 novembre 2009 abaisse de 100 mSv à 50 mSv le niveau d'intervention fixé en 2003 pour l'administration d'iode stable.

2.3- LES EFFETS SANITAIRES ASSOCIÉS AUX NIVEAUX D'INTERVENTION

Les niveaux d'intervention sont des niveaux de doses prévisionnelles à partir desquels seraient mises en œuvre des contre-mesures⁴. Ce ne sont pas des seuils d'innocuité mais des niveaux de risque acceptés par les pouvoirs publics.

La CIPR a proposé en 2007 une nouvelle estimation du risque après exposition du corps entier à faible débit de dose (risque de survenue d'effets aléatoires : cancers, effets héréditaires et détriment total, par sievert reçu) (**annexe 5**).

Les effets aléatoires correspondant aux niveaux d'intervention retenus dans les PPI sont indiqués tableau 1.

Tableau 1 - Risque de survenue d'effets aléatoires correspondant aux niveaux d'intervention retenus dans les PPI (exposition à de faibles doses et faibles débits de dose)

Niveau d'intervention \ Effet aléatoire	Cancers	Effets héréditaires	Détriment total
<u>10 millisieverts (mise à l'abri)</u>	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$
<u>50 millisieverts (évacuation)</u>	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-3}$
<u>50 millisieverts (thyroïde)</u>	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$

REMARQUES 1/2

- ◆ Les effets aléatoires actuellement retenus par la communauté internationale sont les cancers, et les effets héréditaires susceptibles d'apparaître sur les deux premières générations. Cette définition des effets aléatoires est considérée comme trop restrictive par de nombreuses études (**annexe 6**).
- ◆ Le risque associé à de faibles doses et faibles débits de dose fait actuellement débat au sein de la communauté internationale (Gazal et Amiard, 2010⁵ ; Gazal, 2014) ; or les niveaux d'intervention prévus dans les PPI se situent dans le registre des faibles doses (**annexe 7**).
- ◆ Les effets d'une exposition de la glande thyroïde inférieure au niveau d'intervention de 50 millisieverts (50 mSv) sont acceptés, de même que les effets d'une exposition du corps entier à une dose inférieure à 10 millisieverts (10 mSv) (niveau d'intervention pour mise à l'abri).
- ◆ Une évacuation n'est à envisager qu'à partir d'une dose prévisionnelle de 50 millisieverts, la seule mise à l'abri étant donc mise en œuvre pour la plage de dose prévisionnelle comprise entre 10 et 50 millisieverts ; la justification de cette stratégie ne va pas de soi. Selon le projet de PPI Golfech (2014), une mise à l'abri réduirait « en première approximation » d'un facteur 2 la dose efficace par inhalation et d'un facteur 8 à 10 l'exposition externe, toutes choses étant égales par ailleurs.

3- Doses *projetées* ou *évitées* selon le cas.

4- Ils sont « associés » à la mise en œuvre des contre-mesures (ASN, 2003, 2009).

5- Chap. 6.2.3.4.

REMARQUES 2/2

- ◆ Il n'est pas précisé dans les PPI sur quelle durée d'exposition sont estimées les doses prévisionnelles conduisant à l'activation de la mise à l'abri et de l'évacuation, sachant qu'elles sont respectivement dix et cinquante fois plus élevées que les limites annuelles admissibles en situation non accidentelle. La question se pose de la même manière pour l'exposition de la glande thyroïde. Les doses projetées à l'organisme entier donnant lieu à évacuation étaient établies dans la CIPR 63 (1992) sur la base d'une exposition de 24 heures. Selon la circulaire interministérielle du 10 mars 2000, ces doses sont celles qui sont supposées devoir être reçues (irradiation externe) et engagées (contamination interne) jusqu'à la maîtrise des rejets dans l'environnement – la durée retenue pour le calcul ne pouvant excéder une semaine en cas de doute sur la durée des rejets. On considère aujourd'hui que le délai retenu pour le calcul des doses prévisionnelles peut durer jusqu'à une semaine⁶ (ASN, 2015b). Au-delà de cette période, l'évaluation des doses prévisionnelles et leur gestion relèvera de la phase post-accidentelle. *À priori*, ces dernières ne prennent pas en compte les doses reçues lors de la situation d'urgence radiologique.
- ◆ Les niveaux d'intervention pour la mise à l'abri et l'évacuation n'auraient pas un caractère contraignant⁷. Cela pose la question des critères susceptibles d'intervenir dans de telles décisions et de la participation de la société civile à la prise de décision.
- ◆ Pour une même activité inhalée, la dose engagée par un radionucléide donné varie avec l'âge des sujets (cf. [annexe 2](#)), les sujets les plus jeunes étant les plus sensibles. Le niveau de contamination environnemental conduisant à une dose engagée de 10 ou de 50 millisieverts (niveaux d'intervention) sera globalement moins élevé pour les sujets les plus jeunes que pour les sujets plus âgés. Cela influera sur la définition des rayons d'intervention, qui devront être définis en fonction des populations les plus sensibles. Cette question est donc centrale dans l'élaboration et la mise en œuvre d'un PPI. Selon l'IPSN (2000), « les niveaux d'intervention retenus par le Ministère de la Santé pour l'élaboration des PPI sont établis pour la catégorie la plus sensible (les enfants) (...) ». Ces indications ne figurent pas dans les textes réglementaires ultérieurs.

Recommandations du Comité scientifique

Le Comité scientifique recommande

- ◆ **que les effets sanitaires associés aux niveaux d'intervention retenus soient indiqués dans le PPI, tout en étant mis en perspective avec les effets sanitaires associés à d'autres pratiques sociales et à leur réglementation ;**
- ◆ **que les incertitudes associées à ces évaluations y soient clairement mentionnées – incluant les incertitudes associées aux effets sanitaires retenus et à l'évaluation du risque des faibles doses ;**
- ◆ **que soit indiquée la durée d'exposition qui sert de base à la fixation des niveaux d'intervention et donc à l'évaluation des doses prévisionnelles, et que l'exposition à un environnement contaminé après l'arrêt des rejets soit intégrée à cette évaluation ;**
- ◆ **que les doses éventuellement reçues par les populations lors de la situation d'urgence soient prises en compte dans la gestion de la phase post-accidentelle ;**
- ◆ **que soient justifiés les niveaux d'intervention retenus pour la mise à l'abri et pour l'évacuation ;**
- ◆ **que ces niveaux d'intervention soient établis en fonction de la catégorie de population la plus sensible (enfants de 1 an), et que cela soit précisé dans les PPI.**

2.4- LE NIVEAU D'INTERVENTION RETENU DANS LES PPI POUR L'ADMINISTRATION D'IODURE DE POTASSIUM

Il est aujourd'hui en France de 50 millisieverts (50 mSv), quels que soient les groupes de populations exposés.

Or le niveau d'intervention recommandé par l'OMS (1999) diffère selon les tranches d'âge : il est de 10 millisieverts pour les enfants, les adolescents de moins de 19 ans et les femmes enceintes et allaitantes, de 100 millisieverts pour les adultes entre 18 et 40 ans et de 5 sieverts pour les 40 ans et plus ([annexe 8](#)).

Par ailleurs et paradoxalement, l'administration d'iode stable supposant également une mise à l'abri, l'IRSN (2009) s'interroge sur la faisabilité d'une mise à l'abri sur des distances importantes associée à un niveau d'intervention de 50 mSv à la thyroïde, dans le cas de rejets de longue durée (cf. 4.2.1).



Recommandations du Comité scientifique

- ♦ **Le Comité scientifique recommande que le niveau d'intervention actuellement retenu dans les PPI soit explicitement justifié au plan sanitaire, notamment pour les enfants et les adolescents, pour les femmes enceintes et allaitantes, ainsi que pour les populations de 40 ans et plus.**
- ♦ **Il souhaite connaître les résultats des réflexions complémentaires préconisées par l'IRSN pour la gestion des rejets de longue durée avec mise à l'abri et administration d'iode stable au niveau d'intervention retenu de 50 mSv à la thyroïde.**

2.5- LA QUESTION DES RESTRICTIONS DE CONSOMMATION

Si la notion de restriction de consommation en phase d'urgence figure dans les documents d'information de la population sous forme de quelques consignes d'ordre général relatives au seul moment de l'alerte, elle ne fait pas pour autant l'objet de niveaux d'intervention à l'instar des CIPR 40 (1984) et 63 (1992) ([annexe 4](#)), ceux-ci étant réservés dans les PPI à l'irradiation externe et à l'inhalation. Pourtant, les autres contre-mesures sont systématiquement accompagnées d'une restriction ou d'une interdiction de la consommation de l'eau et des aliments produits à l'intérieur du périmètre où elles sont mises en œuvre (DGS, 1999). Restriction ou interdiction de consommation seraient par ailleurs susceptibles d'être activées au-delà du périmètre de mise à l'abri (cf. 4.2.1), et seraient les seules à être mises en œuvre dans le cas d'un accident de niveau 4 (cf. section 1). Elles revêtent une signification particulière dans le cas de l'administration d'iode stable (cf. 5.7.1). Il serait donc justifié d'en connaître les niveaux d'intervention, à l'origine de la définition de leur périmètre et de leur durée d'application.



6- « Les doses prévisionnelles sont celles supposées reçues jusqu'à la maîtrise des rejets dans l'environnement calculées généralement sur une période de 24 heures. En cas de doute sur la durée des rejets, la durée retenue pour le calcul n'excède pas une semaine ».

7- « Dans des situations tout à fait particulières, l'autorité administrative pourra décider de mettre en œuvre certaines interventions à partir de valeurs de doses prévisionnelles supérieures aux niveaux recommandés dans ce document. Ceci est parfois nécessaire pour éviter que le préjudice associé à la réalisation de l'intervention ne soit disproportionné par rapport au bénéfice attendu. (...) Cette considération ne concerne pas la prise d'iode » (Circulaire interministérielle du 10 mars 2000 - Annexe).

Les restrictions éventuelles de consommation ou de commercialisation des aliments sont aujourd'hui réglementées au niveau communautaire (Règlement EURATOM, 2016) (**annexe 9**), avec un double objectif, sanitaire et économique. Elles consistent en des *limites de contamination* massique ou volumique, les préfets étant amenés à prendre si nécessaire des arrêtés provisoires d'interdiction. Elles font par ailleurs l'objet de critiques qui concernent : l'impact dosimétrique des valeurs adoptées, les niveaux de contamination donnant lieu au déclenchement de mesures de restriction (les limites de contamination sont-elles cumulatives ou exclusives ?) et donc le niveau de risque jugé acceptable, les hypothèses retenues pour les calculs de doses efficaces (groupes d'âge pris en compte, rations alimentaires, distance au site accidenté, pourcentages d'aliments contaminés et niveaux de contamination...) ainsi que la présence d'erreurs voire d'incohérences dans la réalisation de ces évaluations.

Recommandations du Comité scientifique

Il convient de faire figurer dans les PPI

- ◆ ***les limites de consommation ou de commercialisation des aliments ;***
- ◆ ***leur impact dosimétrique pour les populations les plus sensibles ;***
- ◆ ***leur justification ;***
- ◆ ***les modalités de leur mise en œuvre.***



3. LES SCÉNARIOS ACCIDENTELS SUSCEPTIBLES DE CONDUIRE À L'ACTIVATION DU PPI

Les scénarios susceptibles de conduire à l'activation du PPI se caractérisent par :

- leur **probabilité de survenue** ;
- la **nature**, la **forme physico-chimique** et l'**activité des radionucléides rejetés** ;
- le **délai prévisible** entre le début de l'événement et les rejets (la « cinétique » des rejets) ;
- le **caractère ponctuel ou prolongé** des rejets.

Les caractéristiques environnementales (caractéristiques physionomiques et physiographiques du site, évolution des conditions météorologiques...) permettant d'évaluer la dispersion des rejets, en lien avec l'évolution de la situation au sein de l'installation en difficulté.

Conjointement avec les niveaux d'intervention, les scénarios accidentels jouent donc un rôle déterminant dans la définition du rayon de mise en œuvre des contre-mesures prévues dans les PPI, et plus généralement du zonage des PPI - les caractéristiques environnementales intervenant dans leur mise en œuvre *in situ* en situation accidentelle.

Des éléments de compréhension en matière de sûreté nucléaire sont un préalable à l'étude de ces scénarios.

3.1- ÉLÉMENTS DE COMPRÉHENSION EN MATIÈRE DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE : DÉFENSE EN PROFONDEUR ET PROCÉDURES DE CONDUITE

3.1.1- Le concept de défense en profondeur (Jacquemain, 2013 ; Libman, 1993)

Introduite dans le domaine de la sûreté nucléaire au début des années 1970, la défense en profondeur désigne une série de niveaux de défense qui visent à prévenir les incidents et accidents, et en cas d'échec de la prévention, à en limiter les conséquences. Ces défenses reposent sur les caractéristiques intrinsèques des installations ; elles consistent en procédures et dispositions matérielles, qu'il s'agisse de faire face à d'éventuelles défaillances techniques, humaines et/ou organisationnelles. La défense en profondeur comporte cinq niveaux, chaque niveau étant censé prévenir une évolution vers un niveau supérieur.

Niveau 1 : prévention des anomalies de fonctionnement et des défaillances des composants, équipements et systèmes

Ce niveau correspond au *domaine de fonctionnement normal et prévisible* de l'installation, y compris en cas de perturbations ou d'agressions externes. Il suppose que des marges suffisantes soient prises en compte au niveau de la conception des composants, équipements et systèmes (dimensionnement), et que leur fabrication et leur exploitation soient de haute qualité. Il repose sur des règles générales et des procédures d'exploitation définies.

Niveau 2 : détection des défaillances et maîtrise des anomalies de fonctionnement

Il s'agit des systèmes de surveillance et de régulation qui permettent de *détecter* et de *corriger* d'éventuelles anomalies de fonctionnement (systèmes de mesure et de régulation de la température, de la pression, de la puissance neutronique ou thermique, systèmes de mesure de l'activité des différents fluides et de l'atmosphère des différents locaux, systèmes de protection tels que les soupapes de sûreté ou l'arrêt d'urgence, programmes de surveillance périodique de ces derniers...).

Les niveaux 1 et 2 sont destinés à éliminer avec un haut niveau de confiance le risque de défaillance de l'installation. Celle-ci est néanmoins plausible, et sa gestion fait l'objet des niveaux 3 à 5.

Niveau 3 : maîtrise des accidents pris en compte dans le cadre du dimensionnement de l'installation

Le niveau 3 correspond à l'activation des *systèmes de sauvegarde* permettant de faire face à un incident ou accident résultant d'un *initiateur unique*, qui peut être un élément important pour la sûreté (rupture d'une tuyauterie du circuit primaire principal ou d'une tuyauterie vapeur, retrait d'une grappe de contrôle à pleine puissance, ouverture intempestive d'une soupape du pressuriseur...) susceptible de compromettre la maîtrise de la réaction nucléaire, le refroidissement du combustible ou le confinement des substances radioactives. Il comporte également la définition des *procédures de conduite* à mettre en œuvre dans une telle éventualité.

Niveau 4 : maîtrise des accidents graves

Il s'agit traditionnellement de la situation dans laquelle l'accident résulte de *défaillances multiples* (ou « *cumulées* »), qui peuvent éventuellement conduire à une fusion de cœur. Il s'agit (a) d'éviter cette évolution (b) et dans le cas où elle se produirait, de limiter les rejets radioactifs dans l'environnement. Les moyens disponibles sont des *procédures dites « ultimes »* (U), certains moyens matériels, le *guide d'intervention en accident grave* (GIAG) et le *plan d'urgence interne* de l'exploitant (PUJ).



Niveau 5 : limitation des conséquences radiologiques en cas de rejet de substances radioactives

Dans le cas où, malgré les mesures décrites au niveau 4, des rejets se produiraient dans l'environnement, les pouvoirs publics mettraient en œuvre des mesures de protection des populations : les PPI. Ce niveau ne relève pas *stricto sensu* d'une action de l'exploitant⁸.

REMARQUE

- ◆ Le concept de défense en profondeur, introduit dans les années 70, ne prévoyait ni la possibilité de défaillances multiples⁹ ni celle d'une fusion du cœur¹⁰ – dont la réalité a été révélée par l'accident de Three Mile Island aux États-Unis en 1979. Cela explique que ces éventualités ne soient pas intégrées dans la conception des réacteurs actuellement en exploitation en France : elles sont « hors dimensionnement ».

3.1.2- Approches et procédures de conduite

Durant le fonctionnement de l'installation, comme pour la survenue de situations incidentelles et accidentelles, l'exploitant utilise un ensemble de procédures de conduite qui visent à maintenir ou à ramener le réacteur dans un état sûr. Ces procédures ont évolué au cours du temps.

Les procédures de conduite initialement utilisées étaient les procédures « I » (incidentelles) et « A » (accidentelles), procédures pré-établies élaborées à partir du déroulement prévisible de l'incident ou de l'accident et applicables aux situations de *défaillance unique*. Il s'agissait d'une approche « par événement ».

Au début des années 80, des procédures complémentaires ont été définies à l'instigation du SCSIN¹¹ pour faire face au risque de *défaillances simultanées de plusieurs voies redondantes* de systèmes importants pour la sûreté, ou de défaillances de *matériels sollicités sur le long terme* après un accident de perte de réfrigérant primaire : les procédures « H » (pour « hors dimensionnement »), nécessitant éventuellement l'installation de nouveaux matériels (« matériels complémentaires »). Ces procédures concernent :

- la défaillance totale de la source froide ou des systèmes associés (H1) ;
- la défaillance totale de l'alimentation en eau des générateurs de vapeur (alimentation normale ARE / alimentation de secours ASG) (H2) ;
- la défaillance totale des sources électriques externes et internes (défaillance des deux sources externes du réseau / échec de l'ilotage / défaillance des deux groupes électrogènes) (H3) ;
- la défaillance totale du système d'injection de sécurité basse pression ou du système d'aspersion de l'enceinte pendant la phase de refroidissement à long terme suivant un accident de perte de réfrigérant primaire (perte totale à terme des moyens de pompage ou d'échange de chaleur) (H4) ;
- la protection de certains sites fluviaux à l'égard d'une crue supérieure à la crue millénaire (H5).

Suite enfin à l'accident de Three Mile Island en 1979 et face à la réalité du risque de *défaillances multiples* (ou d'*enchaînements d'événements*), des procédures visant à limiter ou à retarder l'endommagement éventuel du cœur et ses conséquences radiologiques ont été développées à la demande de l'autorité de sûreté nucléaire (des procédures « ultimes » pour des situations « ultimes ») (cf. **annexe 11**) :

- U1, qui vise à éviter la fusion du cœur (détermination des meilleures actions en termes d'utilisation des générateurs de vapeur, de l'injection de sécurité, des soupapes de décharge du pressuriseur et des pompes primaires) ;
- U2, qui vise à localiser et isoler les fuites de l'enceinte de confinement ;
- U3, qui consiste à mettre en place des moyens mobiles de secours pour pallier la défaillance éventuelle de l'ensemble des systèmes d'injection de sécurité et d'aspersion de l'enceinte (prolongement de H4) ;

- U4, qui consiste à mettre en place des dispositifs de prévention des rejets atmosphériques précoces en cas de percée de la cuve et d'attaque du radier par le corium en fusion ;
- U5, système d'éventage-filtration permettant la décompression de l'enceinte de confinement en cas de fusion du cœur.

L'installation plus récente de *recombineurs catalytiques passifs d'hydrogène* est également considérée comme une parade contre le risque d'explosion d'hydrogène à l'intérieur de l'enceinte de confinement en situation de fusion du cœur (cf. [annexe 11](#)).

Un guide d'action des équipes de crise (GAEC) et un guide d'intervention en accident grave (GIAC) seraient dans ce cas utilisées par les équipes techniques.

Pour des raisons de réalisme et d'efficacité, l'approche événementielle a été progressivement abandonnée à partir de 1990 au profit de l'approche par état pour toutes les situations incidentelles ou accidentelles avec défaillances simples ou multiples, et des procédures *ad hoc*¹² ont été définies. La conduite n'est plus définie à partir d'un diagnostic initial, elle repose sur l'identification de l'état physique de l'installation (notamment l'analyse des états de refroidissement de la chaudière et de la disponibilité des systèmes de sauvegarde) et la définition de l'objectif de conduite et des priorités d'actions.

La défense en profondeur et les procédures de conduite relèvent d'une **approche déterministe** du risque et de la sûreté : prévention et maintien du réacteur dans le domaine autorisé, recensement des événements pouvant néanmoins conduire à un accident grave (les initiateurs) et mise en œuvre de stratégies *déterminées* permettant de conduire le réacteur vers un état sûr et de faire en sorte que les conséquences demeurent acceptables.

3.2- LES SCÉNARIOS ACCIDENTELS À L'ORIGINE DES PREMIERS PPI

Les scénarios historiquement considérés comme les plus préoccupants sont les accidents de fusion du cœur, dits encore « accidents graves ».

Ces scénarios ont joué un rôle central dans la définition du rayon d'application des contre-mesures.

3.2.1- L'accident de fusion du cœur ou « accident grave »

Définition

Historiquement, un accident grave est défini comme un accident dans lequel le combustible est significativement dégradé par une *fusion plus ou moins étendue du cœur du réacteur*¹³. Cette fusion est la conséquence d'une élévation importante de la température des matériaux composant le cœur, résultant elle-même d'une absence prolongée de refroidissement du cœur par le fluide caloporteur. Ce type d'accident ne pouvant survenir qu'à la suite d'un grand nombre de dysfonctionnements, ce qui rend sa probabilité très faible. Mais le scénario n'en reste pas moins plausible, et en tout état de cause supérieur à l'objectif probabiliste global de 10^{-6} par an défini en 1977 et 1978 par le Service central de sûreté des installations nucléaires (SCSIN) pour la survenue de « conséquences inacceptables ».

8- À l'exception toutefois de l'alerte en phase réflexe.

9- « Deux accidents qui ne résulteraient pas d'un événement unique ne peuvent survenir au même moment » (EDF, 1985).

10- « Il ne peut y avoir de fusion du cœur (...). L'enceinte du bâtiment réacteur constitue un écran de protection contre les rayonnements provenant du cœur et une barrière de confinement des produits de fission, limitant la dose reçue par la population à un taux acceptable dans tous les cas de fonctionnement normal ou accidentel et en particulier pendant et après l'accident le plus grave qui puisse affecter le circuit primaire » (EDF, 1985).

11- SCSIN : Service central de sûreté des installations nucléaires (intitulé de l'autorité de sûreté nucléaire française jusqu'en 1991).

12- incluant les procédures H et U.

13- Le terme « fusion du cœur » inclut dans les études probabilistes de sûreté conduites par l'IRSN la « simple » rupture de gaine, à l'origine du relâchement des produits de fission volatils dans le circuit primaire.

Si le processus de fusion ne peut être arrêté dans la cuve du réacteur par refroidissement du cœur dégradé, l'accident peut dans certaines conditions conduire à plus ou moins brève échéance à une *perte d'intégrité du confinement* (du circuit primaire voire de l'enceinte confinement) et à des *rejets à l'extérieur du site* (Jacquemain, 2013)¹⁴.



Historiquement, un accident grave est défini comme un accident dans lequel le combustible du cœur est significativement dégradé par une fusion plus ou moins complète du cœur.

Les scénarios d'accidents pouvant mener à une fusion du cœur

On considère aujourd'hui que ce type d'accident peut survenir à la suite

- d'une *accumulation de dysfonctionnements*, qui dénote une défaillance de la défense en profondeur de niveau 4 (cf. 3.1) (exemple : l'accident de Three Mile Island, 1979) et/ou
- d'*agressions externes* (exemple : la catastrophe de Fukushima Daiichi, 2011 : séisme + tsunami).
Il se situe aux niveaux 4 à 7 de l'échelle INES.

À partir d'études déterministes préalables, les premières études probabilistes de sûreté dites de niveau 1 (EPS1) ont donné une description des *scénarios accidentels d'origine interne susceptibles de conduire à une fusion du cœur* dans le bâtiment réacteur en cas de cumul avec d'autres dysfonctionnements et de leur probabilité

d'occurrence (**annexe 10**). Ont ainsi été identifiés dès les années 70-80 :

- les accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP) : grosses brèches, brèches intermédiaires et petites brèches ;
- les accidents de rupture d'une tuyauterie secondaire (alimentation en eau du générateur de vapeur RTE, tuyauterie vapeur RTV) ou blocage d'un organe de décharge en position ouverte ;
- les accidents de rupture de tubes d'un générateur de vapeur (RTGV) ;
- les accidents de perte totale de la source froide ou des systèmes associés (H1) ;
- les accidents avec perte totale de l'alimentation en eau des générateurs de vapeur (H2) ;
- les accidents avec perte totale des alimentations électriques (H3) ;
- la perte des sources électriques internes (PDS) ;
- la défaillance de l'arrêt automatique du réacteur (ATWS).

Ces scénarios, qui concernent¹⁵ les différents paliers REP, peuvent conduire à des rejets à l'extérieur du site, via différents modes de défaillance de l'enceinte de confinement.

Les modes de défaillance de l'enceinte de confinement suite à une fusion du cœur conduisant à des rejets à l'extérieur du site (**annexe 11**)

Dans la continuité des travaux de Rasmussen en 1975, plusieurs modes principaux de défaillance de l'enceinte de confinement ont été retenus :

- le défaut d'étanchéité initial de l'enceinte de confinement (traversées, sas...) (**mode « β »**) ;
- l'explosion d'hydrogène dans l'enceinte de confinement, conduisant à la perte de son étanchéité (**mode « γ »**) ;
- l'explosion de vapeur dans la cuve ou dans le puits de cuve provoquant la défaillance à court terme de l'enceinte de confinement (**mode « α »**) ;
- la mise en surpression lente de l'enceinte de confinement conduisant à la perte de son étanchéité (**mode « δ »**) ;
- la traversée du radier en béton par le corium (**mode « ϵ »**).

3.2.2- Cinétique des accidents et importance du rejet dans le cas de l'accident grave : la notion de terme-source¹⁶

L'étude des accidents graves vise à déterminer notamment

- la *cinétique* de l'accident, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre l'occurrence de l'accident et le début du rejet. Les modes de défaillance de l'enceinte de confinement ont ainsi été initialement répartis en deux catégories : défaillance intervenant à *court-terme* (modes α , β , γ) et défaillance intervenant à *long terme* (modes δ , ϵ) ;
- la *nature*, l'*importance* et (notamment pour l'iode) *les caractéristiques physico-chimiques des rejets*.

La combinaison de ces paramètres a conduit à définir des types de rejets, appelés « **termes-sources** », définis comme des « rejets typiques, caractéristiques d'une famille de réacteurs et représentatifs d'un type d'accident c'est-à-dire, en général, d'un [ou de plusieurs] mode(s) de défaillance de l'enceinte de confinement, en supposant la fusion complète du cœur¹⁷. Les termes-sources sont pris en compte pour définir les actions à prévoir pour la protection des populations » (Jacquemain, 2013).

Les études réalisées en 1977-1979 par l'IPSN sur la fusion du cœur dans le bâtiment réacteur suite au Rapport Rasmussen (Rasmussen *et al.*, 1975) ont conduit à la définition de trois termes-sources « S », de probabilité croissante et de gravité décroissante :

- « **S1** », qui correspond à une défaillance de l'enceinte de confinement à *court-terme*, soit quelques heures au plus après le début de l'accident (modes α , β , γ) , et à la dispersion dans l'atmosphère de quelques dizaines de pour cent de l'inventaire du cœur pour les produits de fission volatils ;
- « **S2** », qui correspond à des rejets directs dans l'atmosphère dus à une perte d'étanchéité de l'enceinte de confinement survenant *un ou plusieurs jours plus tard* (modes δ , ϵ), et à la dispersion dans l'atmosphère de quelques pour cent de l'inventaire du cœur ;
- « **S3** », qui correspond à des rejets dans l'atmosphère indirects et différés (*plus de 24 heures après le début de l'accident*) par des voies permettant une rétention significative des produits de fission, et à la dispersion de quelques pour mille de l'inventaire du cœur.

Les rejets des termes-sources S1, S2, S3 d'un REP 900, exprimés en pourcentage de l'activité initiale de produits radioactifs présents dans le cœur sont indiqués en **annexe 22** (tableau 1).

3.2.3- Les termes-sources initialement retenus pour l'élaboration des PPI

Les travaux conduits notamment par l'IRSN et les demandes de l'Autorité de sûreté nucléaire ont pour objet d'éliminer par des dispositions et des moyens adaptés le risque d'accident pouvant conduire à des rejets de type S1 ou S2. Cela a été le cas des *procédures ultimes* « U » et des *recombineurs catalytiques passifs d'hydrogène*.

À la fin des années 1980, les PPI ont été élaborés sur la base de plusieurs postulats relatifs aux termes-sources décrits précédemment :

- les modes de défaillance de l'enceinte de confinement de type S1 sont extrêmement peu probables voire « non plausibles » - postulat renforcé par le recours possible à la procédure U2 (mode de défaillance « β ») et par la mise en place, dans les années 2000, de recombineurs catalytiques d'hydrogène (prévention du mode de défaillance « γ ») (EDF termes-sources%20EDF.webarchive) ; ils constituent un risque « résiduel » et n'appellent pas de dispositions particulières ;
- les conséquences potentielles d'une défaillance de type S2 ne sont pas gérables par un PPI (Gauvin, 1992) ; or la possibilité de recourir à la procédure U5 a fait passer le mode « δ » de défaillance de l'enceinte dans la catégorie du terme-source S3 (rejet filtré après 24 à 48 heures). Il en a été de même pour le mode « ϵ » (recours à la procédure U4).

Le seul mode de défaillance de l'enceinte de confinement retenu est donc le terme-source S3.

14- L'accident grave ainsi défini correspond aux niveaux 5 à 7 de l'échelle INES et au niveau 4 de la défense en profondeur (tous les événements de niveau 4 ne conduisant pas nécessairement à une fusion du cœur). L'expression « accident grave » est par ailleurs utilisée pour désigner l'accident de niveau 6 de l'échelle INES, ce qui peut prêter à une certaine confusion.

15- Avec des probabilités d'occurrence variables.

16- Cf. annexe 10, les études probabilistes de sûreté de niveau 2.

17- À l'exception du mode « γ », qui n'exige pas la fusion de la totalité du cœur.



4. LE « ZONAGE » RETENU POUR LA MISE EN ŒUVRE DU PPI

Les zones retenues pour l'application des PPI sont traditionnellement présentées comme des cercles concentriques d'un rayon donné à l'intérieur desquels les populations sont susceptibles d'être exposées à des doses de rayonnement qui requièrent la mise en œuvre des contre-mesures (les « niveaux d'intervention »)¹⁸ (cf. section 2).

La définition de ces zones et des modalités de mise en œuvre des contre-mesures est fonction de la nature, de l'importance et de la cinétique possibles des rejets, c'est-à-dire des termes-sources retenus - avec ou sans fusion du cœur. Pour les centres nucléaires de production d'électricité, les rayons de 5 km et 10 km apparaissent dans la circulaire interministérielle du 30 mai 1997 au titre des « périmètres » des PPI donnant lieu à une distribution et/ou à la mise à disposition des comprimés d'iode stable (cf. 6.2.1, tableau 5). En ce qui concerne la mise à l'abri et l'évacuation, ils n'ont pas de fondement réglementaire. La question se pose de la même manière pour les restrictions de consommation (cf. 2.5).

4.1- LES TERMES-SOURCES INITIALEMENT RETENUS EN SITUATION DE FUSION DU CŒUR ET LA PRISE EN COMPTE D'ACCIDENTS SANS FUSION DU CŒUR

Comme indiqué précédemment, les PPI ont été élaborés la fin des années 1980 sur la base de plusieurs postulats relatifs aux termes-sources, le seul mode de défaillance de l'enceinte de confinement retenu étant le terme-source S3 qui correspond

- à des scénarios d'accidents « raisonnablement pénalisants » en termes de rejets dans l'environnement et de conséquences radiologiques hors du site ;
 - à des rejets différés, compatibles avec le délai de 12 à 24 heures nécessaire à la mise en œuvre des contre-mesures prévues dans les rayons de 10 km et/ou 5 km (confinement et/ou évacuation) ;
- ce dans le respect des niveaux d'intervention de la CIPR (1984) (**annexe 9**).



¹⁸- D'où l'utilisation ici de l'un ou l'autre des termes « zonage » et « rayon » indifféremment.



Modification de la zone d'application du PPI : introduction d'une « zone réflexe » de mise à l'abri et de distribution d'iode stable.

Une modification importante est intervenue en 2000 concernant la cinétique de l'accident :

« Jusqu'à présent, les PPI s'appliquant aux centrales nucléaires étaient calibrés sur l'accident majeur caractéristique de ces installations, dont les rejets significatifs à l'extérieur du site n'apparaissent qu'au terme de 24 heures ou plus. Il convient désormais de prendre également en compte des situations accidentelles à **cinétique rapide** mais **aux conséquences minimales** par rapport au scénario d'accident majeur. Dans ces situations préalablement répertoriées, devra être mis en œuvre un ensemble prédéterminé et conservatoire de mesures visant à informer et protéger la population contre une menace de rejet rapide. C'est le déclenchement du PPI en *mode réflexe*. La mise en place d'une phase réflexe se justifie pour quelques situations identifiées sur les réacteurs d'EDF, et plus couramment pour les autres installations nucléaires » (Circulaire interministérielle du 10 mars 2000)¹⁹.

Si les *types d'accidents* concernés ne sont pas précisés, **cette modification remet néanmoins en question le postulat du seul accident de type S3.**

Elle entraîne une *modification de la zone d'application* du PPI : introduction d'une « zone réflexe » de mise à l'abri et de distribution d'iode stable, dont le rayon retenu dans les PPI (2 km) n'est pas non plus défini réglementairement.

La question est de savoir si l'application des contre-mesures dans des rayons de 2 km, 5 km et 10 km permet de respecter les niveaux d'intervention aujourd'hui définis par la réglementation, et ce dans toutes les configurations accidentelles avec rejets à l'extérieur du site.

4.2- SUR LA PERTINENCE DU ZONAGE

Le zonage (2 km, 5 km et 10 km) retenu dans les PPI pose problème au regard notamment :

- des calculs de doses prévisionnelles réalisés dans diverses configurations accidentelles et des niveaux d'intervention retenus aujourd'hui pour la mise en œuvre des contre-mesures ;
- des incertitudes relatives aux études probabilistes de sûreté ;
- des retours d'expérience (REX) d'accidents et catastrophes nucléaires.

4.2.1- Les calculs de doses prévisionnelles et les niveaux d'intervention pris en compte dans la définition des périmètres du PPI

Ce point comporte trois aspects : (a) les calculs de doses prévisionnelles, (b) les hypothèses retenues pour réaliser ces évaluations, (c) les niveaux d'intervention pris en compte dans la définition des périmètres du PPI.

La réévaluation des doses prévisionnelles

L'IPSN/IRSN (2000/2009b) indique que dans le cas de l'accident enveloppe retenu pour l'élaboration du PPI d'une centrale électronucléaire²⁰, avec un mode « δ » de défaillance de l'enceinte²¹ et donc un terme-source S3, les doses prévisionnelles pour notamment la mise à l'abri et l'administration d'iode stable dépasseraient les niveaux d'intervention au-delà des rayons de 5 km et 10 km²².

Par ailleurs, l'IRSN (2009b) indique que la dose équivalente à la thyroïde de 50 mSv pourrait, pour certains scénarios, être dépassée en quelques heures et sur une distance plus grande que les 2 km habituellement retenus pour la phase réflexe²³. Qu'en tout état de cause, la question se pose des modalités de la gestion d'une telle situation, la prise d'iode stable pouvant difficilement être mise en œuvre comme seule contre-mesure réflexe. L'IRSN a donc fait apparaître de longue date le **caractère inadapté des rayons de 5 et 10 km** retenus pour la mise en œuvre des PPI – en contradiction avec les travaux menés par l'IPSN dans les années 80. Il insiste également sur le **caractère inadapté du rayon de 2 km en phase réflexe** pour certains scénarios accidentels, et plus généralement sur les **lacunes relatives à la gestion de la phase réflexe**.

Concernant les restrictions de consommation et dans la configuration accidentelle précisée plus haut, la contamination en iode 131 et en césium 137 serait supérieure aux limites maximales admises par la Communauté Européenne à 90 km (légumes-feuilles) et 90-170 km (lait de vache) 15 jours après le début des rejets (IPSN, 2000).

« Un rejet de référence a été retenu en matière de protection sanitaire des populations, qui a conduit aux périmètres de 5 km et 10 km pour les mesures d'évacuation et de confinement respectivement. Mais un tel rejet conduirait à une contamination [en iode] du lait supérieure à la norme européenne de 500 Bq.l⁻¹ et donc à l'interdiction de sa commercialisation jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres. » (Règlement Euratom, 1989).

Ces niveaux de contamination et donc les rayons d'interdiction seraient beaucoup *plus importants* en phase d'urgence.

Ces données confirment la nécessité d'explicitier dans les PPI les limites admissibles de contamination des aliments, de même que les modalités précises des restrictions alimentaires et de l'accès à une alimentation non contaminée (cf. 2.5 et 5.7.1).

Elles pointent l'étendue considérable des zones susceptibles d'être concernées par des restrictions alimentaires.

L'IRSN insiste également sur le **caractère inadapté du rayon de 2 km en phase réflexe pour certains scénarios accidentels, et plus généralement sur les lacunes relatives à la gestion de la phase réflexe.**

Les hypothèses prises en compte dans l'évaluation initiale des doses prévisionnelles

Les transferts de radionucléides de la source à l'homme

Depuis les années 1980, les conséquences du terme-source S3 ont été calculées avec les hypothèses d'une « diffusion normale, vents fluctuants autour d'une direction constante et de vitesse 5m/s, pas de pluie », donc d'une *météorologie* moyenne et non pénalisante (L'Homme *et al.*, 1989). Cérénino (2008) fait état de conditions météorologiques « moyennes » (diffusion normale et vitesse du vent de 7 m/s). Ces hypothèses ne sont pas représentatives de la diversité et donc de la réalité des conditions météorologiques. Il est tout aussi surprenant que les vents soient supposés fluctuants autour d'une direction constante et que la pluviométrie ait été ignorée.



19- Le décret du 6 mai 1988, qui définissait la première doctrine en matière de PPI, disposait que « le plan particulier comporte (...) les mesures incombant à l'exploitant à l'égard des populations voisines et notamment en cas de danger immédiat, les mesures d'urgence qu'il est appelé à prendre avant l'intervention de l'autorité de police et pour le compte de celle-ci, en particulier (...) l'interruption de la circulation sur les infrastructures de transport et l'éloignement des personnes au voisinage du site ». La possibilité d'un accident à cinétique rapide était donc établie depuis cette date.

20- Grosse brèche primaire doublement débattue, non fonctionnement des deux voies redondantes du circuit d'injection de sécurité et de celles du circuit d'aspersion de l'enceinte de confinement.

21- Rejet lié aux fuites « normales » de l'enceinte de confinement durant les premières 24 h, suivi d'un rejet plus important à travers un filtre, d'environ 20 heures.

22- Un enfant de 1 an situé dans l'axe du vent atteindrait le niveau d'intervention fixé pour la mise à l'abri (10 mSv) à une distance de 10 km au bout de 30 heures, de 12,5 km au bout de 36 heures, et de plus de 14 km au bout de 51 heures. De même, le niveau d'intervention pour l'administration d'iode stable (100 mSv) serait atteint à 16 km du site accidenté au bout de 36 heures et à 19 km au bout de 51 heures (pas d'indication pour la période ultérieure) (annexe 12). **Étant donné l'abaissement d'un facteur 2 du niveau d'intervention retenu pour la distribution d'iode (Arrêté ministériel, 2009), cette distance serait aujourd'hui plus importante : 25 à 30 km au bout de 51 heures** (IRSN, 2009).

23- Il en était déjà de même avec la valeur de 100 mSv (IPSN, 2000).

Or ce sont ces hypothèses qui ont conduit à conclure que, pour un terme-source de type S3, les niveaux d'intervention applicables à l'époque pour l'évacuation et la mise à l'abri étaient atteints sur des distances maximales de 5 et 10 km²⁴.

Par ailleurs, diverses caractéristiques telles que le *relief, les conditions physiographiques et géomorphologiques, le type de couvert végétal des sol* etc. sont bien connues pour jouer un rôle important dans les transferts de polluants atmosphériques. Selon les conditions météorologiques et la spécificité des sites, ils serviront d'écrans, de zones d'accumulation ou de dispersion. Ces paramètres ne semblent pas intégrés aux évaluations.

La circulaire du 10 mars 2000 précisait pourtant : « À chaque site correspond un plan particulier : les PPI ne sauraient être standards. Au-delà de l'étude de danger propre à chaque site, la topographie (...) voire la climatologie locale (...) dimensionnent réellement le PPI ».

L'évaluation de la dose prévisionnelle à partir de l'activité incorporée

L'évaluation de la dose prévisionnelle réalisée dans les années 80 est antérieure aux dernières recommandations de la CIPR et de l'Agence internationale de l'énergie atomique relatives aux coefficients de dose (qui permettent de calculer la dose efficace engagée à partir de l'activité incorporée, cf. [annexe 2](#)).

Il est indispensable de réaliser des études d'impact sur la base d'hypothèses enveloppes qui intègrent l'ensemble des paramètres en jeu, et de calculer les doses prévisionnelles à partir de données actualisées.

Les niveaux d'intervention retenus pour définir les « périmètres » du PPI

L'IRSN (2009b) insiste sur le fait que l'administration d'iode stable suppose également une mise à l'abri, et que l'abaissement de son niveau d'intervention de 100 mSv à 50 mSv à la thyroïde entraîne un élargissement du rayon d'administration de l'iode stable et de la mise à l'abri (cela lui paraissant d'ailleurs problématique pour la gestion d'un rejet de longue durée).

Ces études illustrent l'incidence d'une variation des niveaux d'intervention sur le « périmètre » de mise en œuvre des contre-mesures.

Or les niveaux d'intervention qui sous-tendent la définition des périmètres que l'on trouve actuellement dans les PPI proviennent de la CIPR 40 (1984) (cf. section 4). Ils **étaient plus élevés que les niveaux d'intervention qui ont cours aujourd'hui** (d'un facteur 5 à 10 selon les contre-mesures pour les niveaux « justifiés » de la CIPR, cf. 2.2) et étaient établis pour les individus adultes (cf. 2.3).

Ainsi selon L'Homme *et al.* (1989), la dose à la thyroïde en cas de terme-source de type S3 serait de 0,7 Sv à 5 km du site et de 0,2 Sv à 10 km, valeurs « qui sont du même ordre de grandeur » que les niveaux d'intervention préconisés par la CIPR 40 pour l'évacuation et le confinement. Il s'ensuivait selon les auteurs que le terme-source S3 était bien compatible avec les mesures nécessaires de protection des populations prévues dans le PPI.

En conclusion, la définition dans les années 80 des rayons d'intervention ne permet pas de faire face à un accident de type S3. Elle repose sur une évaluation des doses prévisionnelles discutable et des niveaux d'intervention aujourd'hui caducs.

4.2.2- Les incertitudes relatives à l'étude des risques et aux études probabilistes de sûreté (EPS 1, EPS 2)²⁵

L'évaluation de la nature, de l'importance et de la cinétique des rejets en cas de fusion du cœur, à l'origine de la définition des termes-sources et du zonage des PPI, prend appui sur les évaluations probabilistes de sûreté de niveaux 1 et 2 ([annexe 10](#)). Or de nombreuses incertitudes limitent la portée de ces évaluations.

Ces incertitudes résultent notamment :

- de la prise en compte très partielle et/ou insuffisante de certains événements internes ainsi que des agressions internes et externes ;
- des données quantitatives d'entrée et des simplifications retenues pour conduire les études²⁶.

Des incertitudes caractérisent les études probabilistes de sûreté de niveau 1 (EPS1)

qu'il s'agisse des événements internes, des agressions internes (chutes de charges, manutention du combustible, explosion, incendie, inondation...) ou des agressions externes (séismes, conditions climatiques extrêmes, chutes d'aéronefs, actes de malveillance...).

Les agressions ne sont apparues que dans les EPS1 les plus récentes. Leur traitement fait l'objet de réserves et recommandations de la part de l'IRSN (2012b, 2014a) et de demandes de la part de l'ASN (2013b)²⁷.

Le cas du risque de chute d'avion

Les études probabilistes conduites par EDF sur le risque aérien pour les 1300 MWe ont porté sur trois familles d'avions²⁸ et sur les structures et équipements nécessaires aux trois fonctions principales de sûreté.

Lors de la conception des centrales, la probabilité calculée d'une chute d'avion était inférieure à la probabilité requise par la Règle fondamentale de sûreté (1980), sauf pour l'aviation générale, dont deux types d'avions ont été retenus pour le dimensionnement des protections antimissiles [le CESSNA 210 et le LEAR JET 23] (EDF, 1985). Ces évaluations ont fait en 2013 l'objet d'une réactualisation qui, selon l'IRSN (2013), présente de nombreuses insuffisances (**annexe 13**).

Au demeurant, il s'agit là d'une évaluation probabiliste de niveau 1, qui ne comporte pas d'indication sur les conséquences potentielles d'une chute d'avion, en termes de rejets (gravité, cinétique) (EPS2) et d'impact sur la population. Ce risque ne figure pas dans les PPI²⁹.

Il est néanmoins mentionné dans la Circulaire interministérielle (2013) et dans SGDSN (2014) parmi une liste de sept objectifs nationaux proposés pour l'année 2014 au même titre que les aléas naturels ou technologiques. En tout état de cause, il pourrait être hors dimensionnement et hors procédures ultimes. De manière plus générale, le scénario d'une *agression externe volontaire d'origine humaine* (malveillance, terrorisme, guerre...) n'est pas pris en compte dans les EPS et dans les PPI.



Lors de la conception des centrales, la probabilité calculée d'une chute d'avion était inférieure à la probabilité requise par la Règle fondamentale de sûreté (1980), sauf pour l'aviation générale.



24- Pourtant, une étude conduite en 2000 par le Centre départemental de Météo-France (Tarn-et-Garonne) sur la base d'un modèle de dispersion en trois points et à partir des données météorologiques locales de 1995 à 1998, faisait apparaître que « l'hiver est une saison où les vitesses des vents sont fortes contrairement à l'été. Cela entraîne la menace de contamination de régions très éloignées de Golfech en hiver, et la sur-contamination des zones proches de Golfech en été, notamment le sud-ouest de la France. Des villes importantes relativement proches de Golfech (Bordeaux, Toulouse, Agen, Montauban, Castelsarrasin, Moissac) [agglomérations distantes de 30 à 150 km environ du CNPE] sont menacées d'autant plus rapidement que l'on se rapproche de la saison hivernale ».

Ces paramètres sont heureusement intégrés aux logiciels RODOS (utilisés par certaines CLI) et OPAL (en cours de développement par l'IRSN).

25- Les commentaires qui suivent sont susceptibles de s'appliquer de manière variable aux différents paliers (voire aux différents sites d'un même palier).

26- On peut citer : le choix de regroupement des événements initiateurs ou des scénarios pour les calculs thermo-hydrauliques et neutroniques en support, la modélisation des phénomènes physiques et des actions humaines, l'estimation de la fiabilité des logiciels et des équipements, le choix des arbres d'événements ainsi que des logiciels de quantification probabiliste, etc.

27- L'IRSN (2011b) estimait nécessaire la réalisation par l'exploitant d'un recensement des initiateurs jugés suffisamment improbables pour avoir été exclus du dimensionnement des installations et non pris en compte dans les évaluations probabilistes de sûreté, mais pouvant toutefois conduire à une fusion du cœur et/ou à des rejets importants. On peut citer des *événements internes* à l'installation tels que la rupture brutale des grands appareils (cuve, enveloppe extérieure des générateurs de vapeur, pressuriseur, volutes des pompes primaires), dont les conséquences pourraient être très difficiles voire impossibles à maîtriser, ou la rupture simultanée de plusieurs tubes d'instrumentation interne du cœur (Libman, 1993), des *agressions externes* d'origine naturelle (séisme excédant le dimensionnement des installations et entraînant des situations particulièrement délicates à gérer : chute du pont polaire, rupture du circuit primaire, fuite de l'enceinte de confinement...) ou anthropique (chute d'avion militaire ou commercial, explosions...). Ce type d'initiateurs seraient à intégrer aux études probabilistes de sûreté.

28- Aviation générale (masse inférieure à 5,7 tonnes), aviation commerciale (masse supérieure à 5,7 tonnes), aviation militaire.

29- Ainsi, le projet de PPI de Golfech (2014) indique que « même si elles ne sont pas construites pour résister sans dommage à un tel choc, les centrales offriraient une bonne capacité de résistance grâce notamment à leurs enceintes de confinement en béton armé ».

Concernant l'évaluation des termes-sources (études probabilistes de niveau 2 - EPS2)

Des incertitudes majeures caractérisent tous les modes de défaillance de l'enceinte de confinement identifiés initialement (tableau 2)

Tableau 2 - Sources d'incertitudes associées aux modes de défaillance de l'enceinte de confinement identifiées initialement

Mode de défaillance de l'enceinte de confinement	Sources d'incertitude Quelques exemples
Fuites résultant d'inétanchéités de l'enceinte de confinement (mode « β »)	Traversées, dégradation du béton en bord de mer...
Explosion d'hydrogène dans l'enceinte (mode « γ »)	Production et combustion d'hydrogène (renoyage d'un cœur dégradé en cuve, interaction corium-béton, risque hydrogène dans l'espace entre enceintes pour les doubles enceintes, promotion ou accélération de la flamme dans différentes configurations, efficacité des recombineurs catalytiques d'hydrogène, tenue mécanique de l'enceinte et de ses traversées...) ³⁰
Explosion de vapeur dans la cuve ou dans le puits de cuve (mode « α »)	Montée en pression de la cuve, gestion de l'eau dans le puits de cuve et risques associés (dont risque d'explosion)
Mise en surpression lente de l'enceinte de confinement (mode « δ »)	Système d'éventage-filtration U5...
Traversée du radier en béton par le corium (mode « ϵ »)	Caractéristiques et modalités de l'interaction corium-béton
Défaillance possible des équipements nécessaires ou utiles à la gestion de l'accident	

Sur les parades destinées à minimiser les risques de défaillance de l'enceinte : le cas des recombineurs catalytiques d'hydrogène et de la procédure U5 (annexe 14)

Les recombineurs catalytiques passifs d'hydrogène (mode « γ » : explosion d'hydrogène)

Leur installation vise à supprimer le « risque hydrogène » ³¹.

Leur efficacité et leur fiabilité posent néanmoins question, ce qui a conduit l'Autorité de sûreté nucléaire à formuler des demandes d'études complémentaires dans le cadre des réexamens de sûreté et de la réalisation des études probabilistes de sûreté.

« L'IRSN rappelle que, de son point de vue et compte-tenu de l'état des connaissances, une défaillance de l'enceinte suite à une combustion d'hydrogène demeure possible dans certaines circonstances particulières [malgré la présence de recombineurs d'hydrogène] » (IRSN, 2011b).

La procédure « U5 » (mode « δ » : mise en surpression lente de l'enceinte de confinement conduisant à la perte de son étanchéité)

La procédure « U5 » a une fonction d'écrêtage de la pression de l'enceinte. Le dispositif de filtration permet également de réduire les rejets radioactifs à un niveau compatible avec la mise en œuvre des plans particuliers d'intervention.

Ce dispositif soulève plusieurs interrogations, qui concernent ses conditions d'utilisation, ses performances, son niveau de fiabilité et sa disponibilité. Ces questions ont conduit l'ASN à demander à l'exploitant d'améliorer le dispositif.

Ces interrogations ne permettent pas d'exclure le mode « γ » de défaillance de l'enceinte de confinement et de considérer le mode « δ » comme un terme-source de type S3.



Des modes de défaillance de l'enceinte de confinement, identifiés ultérieurement n'ont pas été pris en compte initialement pour caractériser les termes-sources (**annexe 15**). Ainsi :

- le mode « DCH » (échauffement direct de l'enceinte suite à une percée de la cuve par le corium³² sous pression, avec fragmentation et dispersion de celui-ci dans l'enceinte, échauffement des gaz qu'elle contient et montée en pression brutale de l'atmosphère de l'enceinte, constituant également une menace à court-terme pour le confinement des substances radioactives),
- le risque d'insertion rapide de réactivité (transitoires survenant dans le circuit primaire, notamment dilution hétérogène du bore, retour de criticité du corium en puits de cuve...),
- les phénomènes de *by-pass* (perte de réfrigérant primaire par une brèche sur un circuit connecté à celui-ci et situé à l'extérieur de l'enceinte de confinement) pouvant donner lieu à des rejets importants à court-terme³³.

Ces scénarios comportant également de nombreuses incertitudes.

Plus généralement, des phénomènes majeurs n'ont pas été intégrés à la définition et donc à l'étude des accidents graves et à la définition des termes-sources. On citera notamment :

- le risque de *fusion du cœur dans la piscine de désactivation* du combustible (bâtiment réacteur) suite au découverture total ou partiel du combustible (perte du refroidissement ou vidange rapide). Ce scénario n'a été intégré que récemment aux études de fusion du cœur.
- l'*accident de criticité* (ou accident d'insertion rapide de réactivité) conduisant à une explosion qui endommagerait la cuve et l'enceinte de confinement voire à un dégagement de substances radioactives dans le bâtiment combustible.

Dans ce contexte, l'ASN (2013c) demande à EDF que les prochaines EPS2, réalisées dans la perspective des réexamens de sûreté associés aux VD2 N4, VD4 900 et VD4 1300 (et le cas échéant à chaque site),

- prennent en compte **tous les états de fonctionnement des réacteurs et de la piscine de désactivation, toutes les agressions internes** (incendie, explosion, inondation) **et externes** (notamment séisme, inondation, conditions climatiques extrêmes), **tous les scénarios de fusion du cœur et d'insertion de réactivité (criticité)** (y compris le mode « ε »)^{34,35},
- donnent une **définition plus précise des initiateurs et paramètres influant sur la progression de l'accident**,
- procèdent à une **évaluation « assez précise » des rejets radioactifs dans l'environnement** (catégories, chronologie et amplitude des rejets) (...).

avec dans tous les cas une évaluation des incertitudes associées.



30- « Compte-tenu des limites des modélisations de l'étude EPS 2 VDS 1300 MWe REX visant à caractériser le risque hydrogène, l'IRSN considère que le risque de défaillance de l'enceinte interne de confinement par combustion ne peut pas être considéré comme résiduel, notamment lorsque sont prises en compte des situations particulières (renoyage tardif du combustible après début de dégradation, démarrage tardif du système d'aspersion dans l'enceinte...) » (IRSN, 2013a).

31- C'est-à-dire le risque de perte de l'intégrité de l'enceinte de confinement (ou des deux enceintes) à la suite d'une combustion d'hydrogène, dans différentes configurations accidentelles et/ou à l'occasion de différentes manipulations (annexe 11).

32- *Corium* : amas de combustible et de matériaux de structure (supportant le combustible dans la cuve en fonctionnement normal) fondus et mélangés, et maintenu en fusion par le dégagement de la puissance résiduelle due à la décroissance radioactive des produits de fission qui y sont piégés (les produits de fission les plus volatils sont déjà sortis en quasi-totalité du combustible) (Cénérimo, 2008).

33- À noter qu'il s'agit d'une défaillance du confinement plutôt que d'une défaillance de l'enceinte de confinement.

34- Il est donc demandé à l'exploitant d'étendre les EPS de niveau 2 aux situations d'accidents sans fusion du cœur.

35- L'ASN (2015a) a demandé à l'exploitant de reprendre l'analyse probabiliste niveau 1 du risque de chute d'aéronef (VD3- 1300) dans le cadre du prochain réexamen de sûreté. Cette demande porte sur les lacunes identifiées par l'IRSN (2013b) dans la réévaluation EDF de 2010.



L'Autorité de sûreté nucléaire a demandé en 2012 et 2014 à l'exploitant de lui proposer des prescriptions techniques complémentaires.

En conclusion, et eu égard aux lacunes et/ou incertitudes nombreuses et importantes qui caractérisent les séquences accidentelles et les études probabilistes de sûreté, les rayons d'intervention qui figurent dans les PPI ne présentent pas aujourd'hui de légitimité.

Les prescriptions post-Fukushima (Études complémentaires de sûreté)

Suite aux évaluations complémentaires de sûreté (ECS) qui ont été conduites sur le Parc nucléaire français après l'accident de Fukushima, l'Autorité de sûreté nucléaire a demandé en 2012 et 2014 à l'exploitant de lui proposer des prescriptions techniques complémentaires visant, pour les situations extrêmes étudiées dans le cadre des ECS, à :

- prévenir un accident avec *fusion du cœur* ou à en limiter la progression ;
- limiter les *rejets radioactifs massifs* ;
- permettre à l'exploitant d'assurer les missions qui lui incombent dans la *gestion d'une crise*.

Ces dispositions, qualifiées de **noyau dur**, sont d'ordre matériel et organisationnel. Les dispositions matérielles portent (a) sur la fonctionnalité des systèmes,

structures et composants en situations extrêmes³⁶ ainsi qu'en cas d'agressions internes et externes, (b) sur la surveillance de l'intégrité de la cuve et de l'enceinte de confinement, ainsi que de l'état de la piscine de stockage du combustible irradié. Les dispositions organisationnelles visent à assurer le caractère opérationnel de l'organisation et des moyens de crise en cas d'accident (locaux de gestion des situations d'urgence, moyens mobiles³⁷, moyens de communication, capacité de diagnostic de l'état de l'installation et de l'évolution des conditions météorologiques et environnementales, moyens en interne de dosimétrie, de mesure et de radioprotection).

L'ensemble des éléments du noyau dur définitivement retenus devant être opérationnels avant 2020 et au-delà pour les demandes complémentaires (phase 3).

Si l'isolement de l'enceinte de confinement et la prévention des by-pass sont mentionnées dans ces prescriptions au titre de la limitation des rejets radioactifs, la question des recombineurs catalytiques d'hydrogène par contre n'apparaît pas. La réponse de l'exploitant aux demandes relatives à l'amélioration du dispositif d'événement-filtration sont discutées à l'[annexe 14](#). De manière générale, la disponibilité de la source froide et de l'alimentation électrique ainsi que la prise en compte des agressions naturelles externes sont des éléments centraux du noyau dur.

Si les dispositions « post-Fukushima » apportent des améliorations concernant notamment la prévention du risque de fusion du cœur, la limitation de sa progression ou le risque de rejets radioactifs massifs, elles ne les excluent pas pour autant.

4.2.3- Le retour d'expérience des catastrophes nucléaires récentes

Les catastrophes de Tchernobyl et Fukushima ont montré que **le zonage actuel des PPI n'est pas adapté à la réalité d'un accident majeur**, à deux titres : la *distance* au site accidenté et le postulat des *cercles concentriques*.

Cette question est traitée dans la section 6.

4.2.4- Conclusion

Les études conduites depuis les années 2000 par l'IPSN/IRSN sur un scénario accidentel enveloppe et un mode de défaillance de l'enceinte de confinement de référence de type S3, montrent que le zonage actuellement retenu dans les PPI n'est pas justifié, quelles que soient les contre-mesures considérées et les modalités de leur mise en œuvre (réflexe ou concertée).

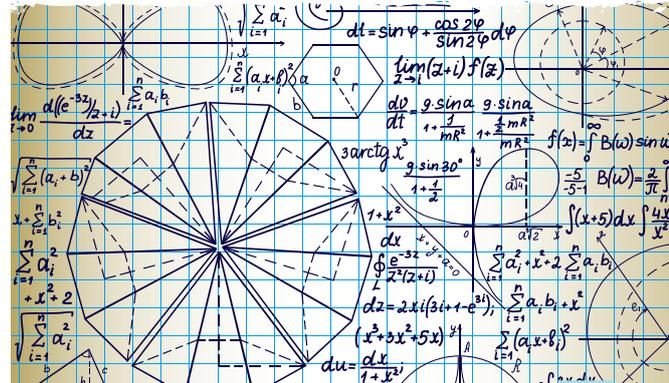
Les facteurs en cause : les *niveaux d'intervention* retenus pour la mise en œuvre des contre-mesures et les *hypothèses* prises en compte pour évaluer la dose prévisionnelle dans les années 80.

Par ailleurs, les connaissances relatives à l'accident grave ne permettent pas aujourd'hui d'appréhender de manière suffisamment précise les modes de défaillance possibles de l'enceinte de confinement et les rejets (nature, amplitude, cinétique) qui leur seraient associés. Si « les travaux menés dans le domaine des accidents graves pour améliorer la sûreté ont visé en priorité à éliminer, par des dispositions et moyens adaptés, les accidents pouvant conduire à des rejets de niveau S1 ou S2 » (Jacquemain, 2013), les incertitudes actuelles sur les différents modes de défaillance de l'enceinte de confinement ne permettent pas d'exclure les rejets de type S1 (rejet à court-terme de quelques dizaines de pour cent de l'inventaire du cœur) (modes α , β , γ de défaillance de l'enceinte) et S2 (rejet un ou plusieurs jours plus tard de quelques pour cent de l'inventaire du cœur) (modes δ , ϵ de défaillance de l'enceinte). Cela sans préjuger des risques de fusion du combustible dans le bâtiment combustible, du risque de criticité à court terme et du risque de by-pass de l'enceinte de confinement.

« Les risques de combustion d'hydrogène dans l'enceinte de confinement et dans l'espace entre enceintes, d'explosion de vapeur dans le puits de cuve, de rupture de l'enceinte de confinement par mise en pression lente, ainsi que le risque de fusion du combustible dans la piscine de désactivation sont sous-évalués et l'EPS 2 [1300 MWe] **ne permet pas d'appréhender de manière réaliste certains risques de rejets dans l'environnement** » (IRSN, 2013a).

Ces conclusions, par ailleurs confirmées par l'observation des conséquences des accidents survenus en 1986 et 2011 à Tchernobyl et à Fukushima, ôtent toute légitimité aux rayons de mise en œuvre des contre-mesures qui figurent dans les PPI.

Il convient en outre de souligner que les évaluations probabilistes de sûreté auxquelles s'adosent la définition des termes-sources, et *in fine* le zonage retenu dans les plans particuliers d'intervention, portent sur divers initiateurs et scénarios accidentels considérés comme plausibles d'un point de vue déterministe et dont la probabilité est de l'ordre de grandeur ou supérieure aux seuils définis par les exploitants et/ou les autorités de sûreté nationales ou internationales. Néanmoins, outre que la justification de ces seuils n'apparaît pas clairement, tous les événements considérés comme plausibles d'un point de vue déterministe sont susceptibles de survenir quel que soit leur degré de probabilité³⁸, et les PPI doivent être en mesure d'y faire face.



Tous les événements considérés comme plausibles d'un point de vue déterministe sont susceptibles de survenir quel que soit leur degré de probabilité, et les PPI doivent être en mesure d'y faire face.



36- Notamment la disponibilité de la source froide et de l'alimentation électrique, la manutention et le refroidissement du combustible en piscine, les chutes de grappes de commande et les procédures U4 et U5 déjà citées.

37- Notamment la disponibilité de la Force d'action rapide nucléaire (FARN).

38- Voir à ce sujet la demande de l'ASN (2015) relative à la chute d'aéronef citée dans l'annexe 13 (note).

Par ailleurs, la notion de plausibilité est elle-même à interroger³⁹. En effet, les PPI doivent également être en mesure de faire face à des situations accidentelles qui n'auraient pas été identifiées comme « plausibles » d'un point de vue déterministe.

Des considérations du même ordre valent aussi pour un certain nombre de scénarios accidentels sans fusion du cœur susceptibles de conduire à des rejets importants à l'extérieur du site.

Des considérations du même ordre **valent aussi pour un certain nombre de scénarios accidentels sans fusion**

du cœur (rupture du réservoir de stockage des effluents gazeux (TEG) ou du réservoir du circuit de contrôle volumétrique et chimique (RCV), phénomènes de by-pass...) susceptibles de conduire à des rejets importants à l'extérieur du site (niveaux 4 ou 5 de l'échelle INES).

4.3- PERSPECTIVES

Il convient de rappeler que, hormis pour l'administration d'iode stable⁴⁰, **les rayons de 2 km, 5 km et 10 km ne sont fixés par aucun texte réglementaire**, pas plus que les **différents scénarios associés à la cinétique des rejets**.

Trois cas de figure sont cependant envisagés par le SGDSN (2014)⁴¹ :

- **accident d'installation conduisant à un rejet immédiat et court** : rejet immédiat (moins de une heure après le début de l'incident), de courte durée (quelques heures) susceptible d'entraîner des impacts à court terme sur les populations, dans des zones allant jusqu'à quelques kilomètres (zone PPI pour les installations qui en font l'objet). L'alerte doit être immédiate et la population *mise à l'abri en mode réflexe* ;
- **accident d'installation conduisant à un rejet immédiat et long** : rejet immédiat (moins de 6 heures après le début de l'incident), de longue durée (jusqu'à quelques jours, voire quelques semaines) susceptible d'entraîner des impacts importants en termes d'exposition des populations et de contamination des territoires sur des zones pouvant dépasser celle des PPI. L'alerte doit être immédiate et la population *mise à l'abri*. La zone d'application de cette mesure *peut être étendue, notamment au-delà des zones PPI*, en fonction de l'évolution de la situation et des données techniques fournies. En fonction du type de rejet, une prise d'iode doit être envisagée. L'évacuation, qui se fera sous rejet, doit être effectuée si possible avant le renforcement important des rejets ;
- **accident pouvant conduire à un rejet différé et long** : menace de rejet suivi ou non d'un rejet différé

(plus de 6 heures après le début de l'incident), de longue durée (jusqu'à quelques jours, voire quelques semaines). L'évacuation préventive est préconisée. De plus, selon les cas, des *mises à l'abri ponctuelles* peuvent être envisagées en périphérie de la zone concernée, voire des restrictions d'activités.

Ces dispositions appellent plusieurs commentaires⁴².

Diverses instances proposent aujourd'hui d'élargir les rayons de mise en œuvre des dispositions du PPI⁴³. L'ANCCLI (2014) propose un rayon de **80 km**. HERCA et WENRA (2014) proposent une **démarche européenne commune** recommandant des actions de protection d'urgence et un niveau minimal de préparation à la mise en œuvre de ces actions :

- l'évacuation doit être **préparée** sur un rayon allant jusqu'à **5 km** autour des centrales, la mise à l'abri des personnes et la distribution d'iode sur un rayon allant jusqu'à **20 km** ;



- une **stratégie générale** doit être définie afin d'**être en mesure d'étendre** l'évacuation sur un rayon allant jusqu'à **20 km**, la mise à l'abri des personnes et la distribution d'iode sur un rayon allant jusqu'à **100 km** ;
- les Autorités de sûreté nucléaire et de radioprotection européennes doivent poursuivre leurs efforts pour promouvoir la mise en place de dispositifs d'intervention et de stratégies de protection des populations **compatibles** au sein des pays européens.

Outre les questions relatives au fondement de ces propositions, il faut ajouter que selon SGDSN (2014), « Certaines situations pourraient induire des rejets ou des risques ayant un impact au-delà des périmètres des PPI. Dans ce cas, deux types de planification peuvent être mis en œuvre : la planification des PPI (...), et la déclinaison du plan national (sécurité intérieure, transports, intervention sanitaire...) qui doit permettre la **mise en œuvre des mesures identifiées hors de la zone PPI**, en s'appuyant notamment sur le **dispositif ORSEC** ». Selon Ginot (1994), cette situation correspondrait au niveau 7 de l'échelle INES.

Il est donc impératif de préciser clairement quelle est la philosophie globale de la gestion de crise, et notamment quels sont les objectifs et les limites des PPI⁴⁴.



Certaines situations pourraient induire des rejets ou des risques ayant un impact au-delà des périmètres des PPI. Dans ce cas, deux types de planification peuvent être mis en œuvre : la planification des PPI (...), et la déclinaison du plan national (sécurité intérieure, transports, intervention sanitaire...)



39- « L'ensemble des accidents possibles est tout de même limité, de sorte que nous pensons pouvoir couvrir avec le temps la totalité des cas possibles. **Mais je reconnais que nous ne sommes pas sûrs d'être absolument exhaustifs et que, s'il doit se produire un accident, ce sera celui que nous n'aurons pas prévu** » (P. Tanguy, Inspecteur général pour la sûreté et la sécurité nucléaire à EDF, 1989).

40- Cf. *supra* et 6.2.1 (tableau 5).

41- Le cas des accidents de transport avec rejets potentiels et celui des accidents survenant à l'étranger pouvant avoir ou ayant un impact significatif en France ne sont pas développés ici.

42- Deux cinétiques de *rejets précoces* distinctes (moins de 6 heures comme indiqué dans les PPI, mais également moins d'une heure), possibilité de mise à l'abri au-delà de la zone PPI en cas de *rejet immédiat et long* et prise d'iode répétée non mentionnée en cas d'évacuation « sous rejets », *rejet différé et long* susceptible de durer « de quelques jours à quelques semaines » (et non 24 à 50 heures comme indiqué dans les PPI), et de manière générale *scénarios accidentels* non caractérisés et rayons d'intervention non définis.

43- Ces rayons variaient déjà d'un facteur 10 à 100 dans les pays de l'OCDE en 1988 (Boeri et Wiktorsson, 1988).

44- « (...) Si une réflexion a déjà été menée sur la question de l'administration de comprimés d'iode stable hors zone PPI dont la société civile a été informée, cela n'est pas le cas pour les autres contre-mesures » (SDGSN, 2014).

Recommandations du Comité scientifique

Le Comité scientifique recommande

1- Que soit introduit dans les PPI le principe de *flexibilité*

Les PPI actuels ont été conçus initialement pour l'essentiel comme une réponse (immédiate ou différée) à des scénarios d'accidents « raisonnablement pénalisants » avec rejets différés permettant de mettre en œuvre les opérations préprogrammées (localisation des centres de décision, itinéraires et modalités d'évacuation, lieux d'accueil et/ou de traitement, et ce en deux temps). Comme pour tout plan, ceux-ci restent souvent théoriques. Plus récemment, la reconnaissance de la réalité d'accidents à cinétique rapide avec rejets immédiats et courts mais surtout avec rejets immédiats et longs, a conduit à donner à la question de la flexibilité et de l'adaptabilité des plans en temps réel une acuité particulière. Par ailleurs, les scénarios accidentels retenus le sont sur la base de leur probabilité d'occurrence, à l'exclusion d'autres scénarios tout à fait plausibles d'un point de vue déterministe mais de plus faible probabilité, et bien entendu d'éventuels scénarios qui n'auraient pas même été identifiés comme plausibles.

Pour ces différentes raisons, il paraît nécessaire de **disposer sur chaque site d'un PPI modulable et modulaire** intéressant des surfaces beaucoup plus étendues que ça n'est le cas actuellement. Ce plan ne serait pas nécessairement mis en œuvre, mais présenterait l'avantage d'être disponible et d'assurer une meilleure sécurité opérationnelle et une meilleure base de décision, dans l'hypothèse où le premier PPI s'avérerait très rapidement dépassé sinon obsolète. Il s'agirait donc de concevoir un PPI à deux échelles spatiales, l'une proche (l'existant), la seconde, encore à concevoir et à définir en fonction des scénarios plausibles les plus pénalisants voire au-delà.

Les modèles de dispersion des aérosols couplés avec les modèles numériques de terrain doivent permettre de prévoir, selon plusieurs scénarii météorologiques, les zones plus probables de forts ou de faibles impacts. En faisant tourner ces modèles en temps réel, alimentés par des données météo fournies également en temps réel, il devient alors possible de moduler et d'orienter les opérations de secours, afin de concentrer les moyens de manière plus pertinente sur les secteurs les plus susceptibles d'être fortement touchés plutôt que de les déployer de manière uniforme géographiquement. **Et de ne pas réduire la notion de zone à la notion de rayon⁴⁵.**

Si la géographie est sous-jacente à la plupart des PPI, elle devrait revenir au premier plan dans leur élaboration. En effet, elle constitue la seule variable prédictible car statique, par rapport à des flux qui eux sont intrinsèquement fluctuants, tant quantitativement que qualitativement. Le but ultime étant de lier ces deux variables afin d'adapter en continu les modalités d'application des PPI sur un registre « dialectique », alors que pour l'instant l'organisation *stricto sensu*, pour des raisons évidentes de responsabilité à la fois de l'exploitant et de l'État, a pris le pas sur l'adaptabilité et la réactivité.

Il est absolument nécessaire que ces PPI deviennent des **outils dynamiques « en temps réel »**, et pas simplement organisationnels, et que soit intégrée la notion de **plans alternatifs**.

Sur le plan pratique, la question subsiste néanmoins de savoir ce qui se passerait si par exemple les désordres ou les conditions météorologiques se modifiaient dans le cours d'une évacuation, rendant caducs les périmètres définis initialement, et par extension les zones isocentriques de réponse. De nouvelles dispositions seraient-elles envisagées face à l'importance croissante des populations à mettre à l'abri et/ou à évacuer, le tout dans un délai maximum d'une journée, et comment seraient-elles mises en œuvre ? Comment adapter cette flexibilité aux centres opérationnels ? aux centres de regroupement et d'hébergement ?

Ces interrogations confirment l'impérieuse nécessité de disposer d'un « plan B » qui leur soit adapté.

2- Qu'y soient précisés de manière claire et exhaustive

(1) les séquences accidentelles identifiées donnant lieu à application du PPI

- ◆ hors endommagement du combustible,
- ◆ avec endommagement du combustible (bâtiment réacteur, bâtiment combustible) : fusion du cœur (« accident grave » selon la définition habituelle), insertion rapide de réactivité, agressions internes et externes,
- ◆ avec by-pass de l'enceinte de confinement ;

(2) les différents scénarios envisagés en termes de cinétique et de durée des rejets, et leur gestion (rejet immédiat et court, immédiat et long, différé et long, en justifiant l'absence d'un accident avec rejet différé et court) et ce pour quelles séquences accidentelles ;

(3) l'évaluation, sur la base d'hypothèses réalistes, de la nature, de l'importance, de la cinétique et de la dispersion des rejets radioactifs susceptibles d'intervenir lors des séquences accidentelles considérées comme plausibles (études probabilistes de niveau 2 étendues), ainsi que les rayons maximaux et les modalités d'application des contre-mesures correspondantes ;

(4) les niveaux d'intervention appliqués aux restrictions de consommation ;

(5) les études justifiant du respect des niveaux d'intervention, en l'absence d'études probabilistes de niveau 3 ;

(6) les modalités de mise en œuvre du principe de flexibilité évoqué plus haut ;

(7) la délimitation du champ d'action des PPI et de leur dimensionnement, et sa justification ;

(8) l'articulation précise entre PPI et plans ORSEC⁴⁶ ;

(9) les modalités de la gestion des termes-sources de types S1 et S2, et notamment des modes « β », « α », « γ », « δ », « ε » de défaillance de l'enceinte de confinement, en cas de dysfonctionnement ou d'inefficacité des procédures U ou autres dispositifs de prévention.



45- « Zone » entendue comme secteur angulaire + rayon.

46- Voir sur ce point l'Instruction interministérielle des exercices d'urgence nucléaire et radiologique (Circulaire, 2013).



5. L'ADMINISTRATION D'IODE STABLE

Un accident grave avec ou sans fusion du cœur ou un accident de criticité survenant dans un réacteur nucléaire de puissance, peut conduire au relâchement dans l'environnement de substances radioactives (produits de fission, produits d'activation, noyaux lourds) (cf. sections 3 et 4). La part de l'iode est prépondérante dans l'activité des produits de fission présents dans le cœur du réacteur (Jacquemain, 2013 ; Hardeman, 2006-2007 ; Guétat *et al.*, 2004) et en cas de rejet, ses différents isotopes sont radiologiquement à court terme les plus pénalisants. Cette question concerne également d'autres installations nucléaires (installations nucléaires de base secrètes, centres de recherche, usines de fabrication ou de retraitement du combustible...).

5.1- POURQUOI ADMINISTRER DE L'IODE STABLE AUX POPULATIONS EN CAS D'ACCIDENT ?

Le bon fonctionnement de la glande thyroïde suppose la présence d'iode dans le follicule thyroïdien, où il participe à la synthèse des hormones thyroïdiennes (**annexe 16**).

Les besoins en iode varient selon l'âge des sujets - entre 80 et 150 microgrammes (μg) chez l'enfant, entre 150 et 200 μg chez l'adulte selon le sexe et pour la femme en cas de grossesse ou d'allaitement⁴⁷. Ces besoins sont essentiellement couverts par les aliments et la boisson (**annexe 17**). En effet, l'iode est présent dans le milieu naturel (eaux, atmosphère, sols), essentiellement sous la forme d'iode stable (iode 127) (**annexe 18**). L'utilisation de sel iodé peut permettre de pallier d'éventuelles déficiences naturelles en iode, n'entraînant que rarement des surcharges chroniques en iode, ce qui par contre n'est pas le cas de l'utilisation massive d'iode d'origine non alimentaire dans l'élaboration des produits transformés.

En situation accidentelle avec inhalation d'iode radioactif et/ou consommation d'eau de boisson ou d'aliments contaminés, la saturation préalable de la glande thyroïde par de l'iode stable permet d'éviter que ne s'y fixe l'iode radioactif qui aura été incorporé, et de prévenir ainsi l'apparition ultérieure de pathologies thyroïdiennes (cancéreuses ou non cancéreuses) dues à la désintégration radioactive de l'iode *in situ* (cf. 5.6 et 6.9).



47- Il existe des divergences entre les experts sur la définition des apports journaliers recommandés.

5.2- PRÉCAUTIONS D'EMPLOI ET EFFETS SECONDAIRES LIÉS À L'ADMINISTRATION D'IODE STABLE

(OMS, 2011 ; VIDAL, 2014 ; WAMBERSIE *ET AL.*, 2008 ; AGENCE DE LA SANTÉ ET DES SERVICES SOCIAUX DE LA MAURICIE ET DU CENTRE-QUÉBEC, 2012⁴⁸)

L'administration d'iode stable (iodure de potassium) en cas d'accident nucléaire doit cependant être mise en œuvre avec discernement, car pour certains sujets elle peut être déconseillée et/ou donner lieu à des effets secondaires indésirables, certes rares mais qu'il convient de ne pas négliger.

- Concernant les *précautions d'emploi*, on trouve mentionnés dans la littérature : les sujets porteurs de goitres anciens (risque d'hyperthyroïdie), les pathologies immunologiques préexistantes (dermatites herpétiformes, pemphigus vulgaire, vascularites hypo-complémentaires), la myotonie congénitale, la pneumopathie chronique obstructive dans un contexte d'allergie à l'iode, les réactions d'hypersensibilité observées à l'occasion d'un traitement médical (injection de produits de contraste radiologiques, application de désinfectants iodés...) ou de la consommation de produits de la mer, les interactions médicamenteuses éventuelles (absorption d'antiacides...), certaines populations sensibles (femmes enceintes et enfants à naître, nourrissons de moins de 1 an).

Tableau 3 – Effets indésirables possibles de l'administration d'iode stable

Effets non thyroïdiens ⁴⁹	Effets thyroïdiens ⁵⁰ (perturbations fonctionnelles)
Poussées de fièvre	<p>Hyperthyroïdie (avec possibilité de complications cardiaques)</p> <p>notamment</p> <ul style="list-style-type: none"> chez les sujets atteints d'une pathologie préexistante en cas de carence iodée préalable
Angio-œdème (dont œdème de Quincke)	
Douleurs articulaires (arthrite, douleurs cervicales...)	
Troubles digestifs (nausées, vomissements, diarrhées, douleurs abdominales)	
Troubles respiratoires (dyspnée, angio-œdème) notamment	<p>Hypothyroïdie et/ou goitre (blocage de l'hormonosynthèse)</p> <ul style="list-style-type: none"> par surcharge iodée (notamment fœtus à partir du 3^o mois, nouveau-né) chez les sujets atteints d'une pathologie préexistante
◆ chez les sujets atteints de broncho-pneumopathie chronique, dans un contexte d'allergie connue à l'iode	
Éruptions cutanées transitoires et spontanément régressives (urticaire, lésions hémorragiques...)	
Troubles sanguins (éosinophilie) Troubles lymphatiques (lymphadénopathie)	
Inflammation glandes salivaires (parotidite...)	
Maux de gorge, écoulement nasal, Sensibilité oculaire	

- Concernant les *effets indésirables possibles*, il en est mentionné un spectre assez varié dans la littérature (tableau 3). Ces effets sont pour beaucoup d'ordre inflammatoire et œdémateux. Ils sont thyroïdiens ou non thyroïdiens, ces derniers étant souvent considérés comme des réactions allergiques. Ils sont rares pour les plus bénins et *exceptionnels* pour les plus sévères.

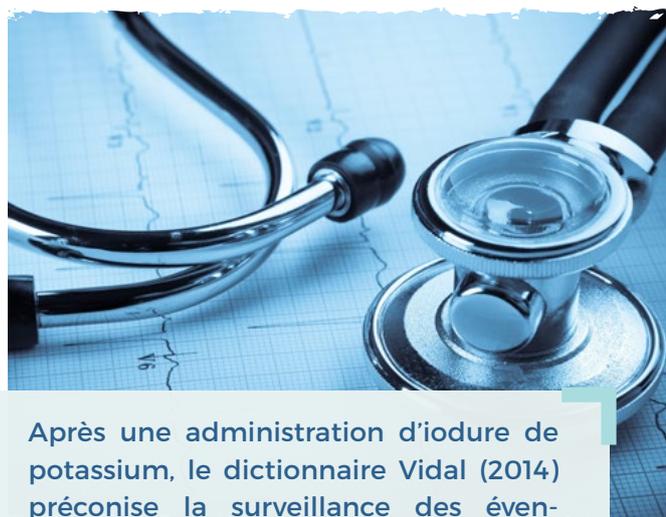
D'après l'ASSMCQ (2012), les effets thyroïdiens indésirables, au demeurant très rares, apparaîtraient dans des contextes précis (dose d'iode stable administrée supérieure à la dose recommandée, prise répétée, pathologie thyroïdienne préexistante, carence iodée). *On dispose cependant de très peu de données sur les effets d'un éventuel surdosage, et d'un retour d'expérience limité concernant les éventuels effets indésirables induits par l'administration d'iode stable suite à un accident nucléaire.*

REMARQUE

- ♦ Selon l'OMS, l'AAAAI (2004) et l'ASN (2009), cités par l'ASSMCQ (2012), les réactions allergiques souvent attribuées à l'iode dans la vie quotidienne pourraient être dues aux excipients utilisés (produits de contraste iodés utilisés en radiologie), à un constituant de la solution iodée (utilisation d'antiseptiques iodés), à une protéine (consommation de fruits de mer) ou à une irritation locale. Ce point de vue est partagé par Le Guen *et al.* (2007).

En tout état de cause, le dictionnaire Vidal (2014) préconise, après une administration d'iodure de potassium, la surveillance suivante des éventuels effets thyroïdiens :

- femmes enceintes et enfants à naître exposés au-delà de la 12^e semaine de gestation (production thyroïdienne fœtale propre) : surveillance échographique du fœtus jusqu'à la fin de la grossesse puis suivi du nouveau-né avec recherche de goitre, contrôle de la fonction thyroïdienne (dosage TSH, T4 libre) ;
- nourrissons exposés de moins de 1 an, femmes allaitantes : contrôle de la fonction thyroïdienne (dosage TSH, T4 libre) devant être pratiqué 2 semaines après l'administration d'iode stable et en cas d'hypothyroïdie, traitement par hormone thyroïdienne ;
- sujets porteurs de goitre ancien, d'un antécédent ou d'une pathologie thyroïdienne évolutive : surveillance clinique par le médecin traitant.



Après une administration d'iodure de potassium, le dictionnaire Vidal (2014) préconise la surveillance des éventuels effets thyroïdiens chez les sujets à risque.



48- Désignée par la suite au moyen de l'acronyme ASSMCQ.

49-Selon Nauman et Wolff (1993), une étude conduite sur plus de 12 000 enfants et 5 000 adultes polonais ayant reçu une dose d'iodure de potassium lors de la catastrophe de Tchernobyl a montré la survenue de troubles digestifs (vomissements, diarrhée, douleurs gastriques) dans 0,12 à 2,38 % des cas et à des éruptions cutanées bénignes dans environ 1 % des cas. Deux cas d'insuffisance respiratoire aiguë ont été observés chez deux adultes atteints de broncho-pneumopathie chronique obstructive et allergiques connus à l'iode. Selon cette étude, le risque d'incidents médicalement significatifs mais non sérieux est, en cas d'administration d'une dose unique d'iodure, de 0,2 %. Après une seule prise, de la fièvre, des douleurs articulaires, des éruptions cutanées transitoires et spontanément régressives ont été observées. Il n'est pas démontré que ces manifestations aient été liées à la prise d'iodure de potassium.

50- Selon Nauman et Wolff (1993), aucun effet thyroïdien indésirable n'a été observé chez 774 adultes ayant reçu une dose ou plus de 100 mg d'iodure de potassium, y compris chez les adultes porteurs de goitre nodulaire, en dehors d'une gêne thyroïdienne douloureuse observée dans 0,08 % des cas. En revanche, 0,37 % des 3 214 nouveau-nés ayant reçu de l'iodure au 2^e jour de vie ont présenté une élévation transitoire de TSH circulante, normalisée à 16 à 20 jours.

Recommandations du Comité scientifique

- (1) Certains PPI présentent une notice médicale relative à l'iodure de potassium. On y trouve diverses informations relatives aux contre-indications et aux effets secondaires possibles de l'administration d'iodure de potassium.

Le Comité scientifique recommande que figurent dans les PPI

- ♦ une présentation complète et systématique de ces contre-indications et effets secondaires ;
- ♦ les modalités de la surveillance des populations a priori sensibles aux effets indésirables de l'administration d'iode stable, notamment thyroïdiens.

- (2) La question des éventuelles contre-indications suppose que les populations susceptibles d'être concernées par la prise d'iode stable en soient informées en amont, et que les médecins soient de leur côté invités à faire le point sur la question avec leur patientèle. Le rôle du corps médical en la matière était déjà évoqué de manière circonstanciée dans la circulaire DGS/PGE/1B (1989).

Le Comité scientifique recommande que ces indications figurent dans les plaquettes d'information du public.

- (3) Le Comité scientifique recommande que la notice médicale sur l'iode qui figure dans les PPI soit présentée de manière claire et intelligible.



Pour entraîner [chez l'adulte] une réduction de plus de 90 % de la fixation de l'iode radioactif, les doses nécessaires peuvent varier selon les régions.

5.3- LES CONDITIONS DE L'EFFICACITÉ DE L'ADMINISTRATION D'IODE STABLE (ANNEXE 19)

L'efficacité de l'administration d'iode stable dépend à la fois de la dose administrée et du moment de son administration.

5.3.1- Sur la dose administrée

L'action protectrice de l'iode stable repose principalement sur le mécanisme de saturation de la glande thyroïde et sur la dilution des isotopes radioactifs de l'iode. Le captage de l'iode stable et l'importance de l'inhibition de la fixation de l'iode radioactif par la glande thyroïde dépendront de la dose d'iodure de potassium administrée (annexe 19, figure 1), les besoins de la glande thyroïde variant cependant en raison inverse de l'apport alimentaire en iode stable (annexe 19, figure 2).

Selon le dictionnaire Vidal (2014), « Pour entraîner [chez l'adulte] une réduction de plus de 90 % de la fixation de l'iode radioactif, les doses nécessaires sont :

- dans les régions où l'apport alimentaire en iode est « normal » : une dose supérieure ou égale à 30 mg d'iode [40 mg d'iodure de potassium]⁵¹ ;
- dans les régions où il existe une carence relative en iode alimentaire (cas de la France) : 50 à 100 mg d'iode (...) [65 à 130 mg d'iodure de potassium] ».

Les préconisations en matière d'administration d'iodure de potassium sont actuellement les suivantes (prise unique) :

- Enfant de plus de 12 ans et adulte : 130 mg d'iodure de potassium, soit 2 comprimés à 65 mg ;
- Enfant de 36 mois à 12 ans : 65 mg d'iodure de potassium, soit 1 comprimé ;
- Nourrisson (de 1 à 36 mois) : 32,5 mg d'iodure de potassium, soit ½ de comprimé ;
- Nouveau-nés (< 1 mois) : 16 mg d'iodure de potassium, soit ¼ de comprimé⁵².

Ces préconisations sont identiques quelle que soit la région.

On considère que selon la richesse de l'apport alimentaire en iode stable, 20 à 50 % de l'iode administré seraient en France fixés par la glande thyroïde, ce qui représente 20 à 50 mg d'iode dans le cas d'une administration de 130 mg d'iodure de potassium. Cette administration est donc susceptible de saturer en iode stable la thyroïde d'un adulte de moins de 50 ans, dont la teneur en iode est de 10 à 30 mg (**annexe 16**). L'iode stable en excès non utilisé par la thyroïde est éliminé par les reins en 2 à 3 jours (**annexe 19**). Ce processus est le même en ce qui concerne les enfants. Si la thyroïde saine est ainsi capable de s'adapter à des variations importantes de court terme des apports en iode (Valeix, 2002), ce point mérite néanmoins une attention particulière eu égard au risque de survenue d'effets secondaires chez le jeune enfant et chez certains patients atteints de pathologies thyroïdiennes (cf. 5.2), ainsi qu'à la faiblesse du retour d'expérience.

À noter que l'on observe déjà chez les moins de 3 ans un risque de dépassement des limites supérieures de sécurité d'origine alimentaire (régime avec sel iodé à 12,5 µg/g) (AFSSA, 2005).

Pour ce qui est des adultes de plus de 40 ans, le principe même de l'administration d'iode stable est discuté par les instances internationales du fait de son rôle possible dans l'apparition d'effets adverses thyroïdiens (cf. 2.4 et 5.2), dans un contexte de réduction de la masse thyroïdienne et de moindre sensibilité aux effets carcinogènes de l'iode radioactif. Selon Wambersie *et al.* (2008), elle est déconseillée chez les sujets âgés de plus de 60 ans et recommandée avec précaution chez les 45-60 ans. On observe que d'une manière générale, elle n'est pas recommandée chez les plus de 40 ans dans les pays connaissant un déficit d'apport alimentaire en iode (ASSMCQ, 2012) (cf. effets thyroïdiens, tableau 3).

5.3.2- Moment de l'administration et degré de protection

Pour être pleinement efficace, l'administration d'iode stable doit avoir lieu *au plus près* de la propagation du nuage radioactif (au plus tôt *2 heures avant*). Lorsque la prise d'iode a lieu *au moment des rejets*, une posologie de 130 mg d'iodure permet, dans les régions riches en iode, d'atteindre une efficacité de 97 %. Mais si cette administration a lieu *48 heures avant le rejet*, la dose évitée à la thyroïde n'est que de 75 %⁵³. Elle est



On considère que 20 à 50 % de l'iode administré seraient en France fixés par la glande thyroïde, ce qui représente 20 à 50 mg d'iode dans le cas d'une administration de 130 mg d'iodure de potassium.

51- Réduction de près de 98% de la fixation de l'iode radioactif, selon Sternthal (1980) et Blum (1967).

52- Cette tranche d'âge ne fait pas dans certains PPI l'objet d'une posologie spécifique (exemple : PPI AREVA-La Hague, Edition 2012).

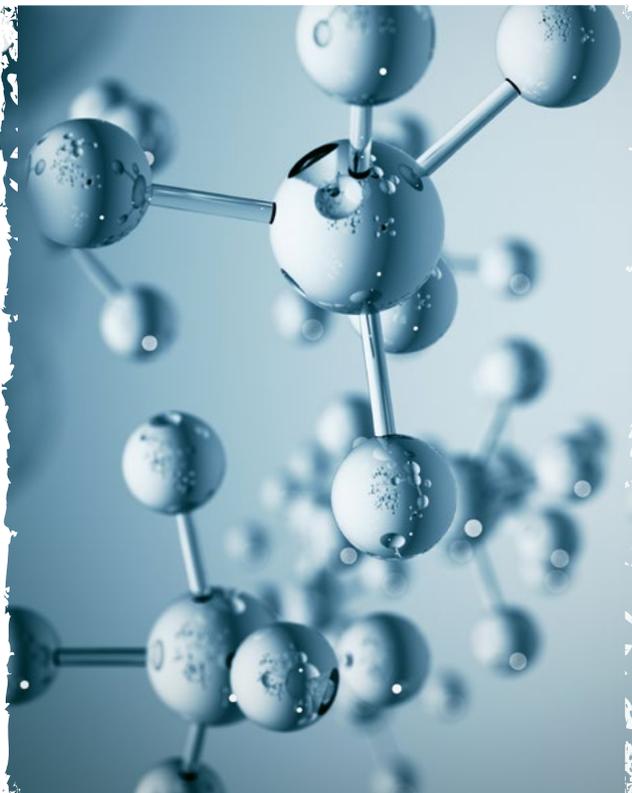
53- Verger (2002) mentionne un blocage de la glande thyroïde efficace (≥ 90 %) et quasi immédiat (30 minutes après la prise) à partir d'une posologie d'iodure de potassium relativement faible (20 mg, soit 15 mg d'iodure). Selon l'auteur, cette posologie est cependant moins à même de couvrir les variations inter individuelles qu'une posologie de 130 mg. Le blocage est par ailleurs plus lent avec une posologie encore plus faible (plusieurs heures), ce qui plaide dans ce cas pour une administration anticipée de plus de deux heures.

Tableau 4 – Efficacité de la prise d'iodure de potassium (130 mg) en fonction du délai entre cette prise et le début de la contamination

Délai entre l'administration d'iodure de potassium et l'inhalation d'iode radioactif (en heure)	Protection thyroïdienne (%)
-96	5
-72	32
-48	75
-24	93
0	97
+2	80
+8	40
+16	17
+24	7

(SOURCE : SCHLUMBERGER ET AL., 2011, D'APRÈS ZANCONINO ET BECKER, 2000)

de 80 % quand l'iodure est administré 2 heures après le début de la contamination et de 40 % 8 heures après (tableau 4), contre 65% et 15% dans les régions carencées en iode (Vidal, 2014). Lorsque l'administration d'iode stable a lieu *avant les rejets*, la dose évitée serait par contre légèrement plus élevée dans les régions carencées en iode que dans les régions riches en iode ([annexe 19](#), figure 3).



Recommandations du Comité scientifique

- ◆ La justification du dosage « enveloppe » des comprimés d'iode stable retenu serait à préciser dans les PPI pour les différentes tranches d'âge.
- ◆ Concernant particulièrement le principe de l'administration d'iode stable aux personnes de 40 ans et plus, il ne fait pas dans les PPI l'objet de dispositions particulières. Cela doit être justifié.
- ◆ L'opportunité de limiter l'apport de sel de table enrichi en iode stable aux seules régions naturellement pauvres en iode, notamment pour les enfants de moins de 3 ans, est à envisager.
- ◆ Les indications relatives au moment de l'administration de l'iodure de potassium et au degré de protection doivent figurer dans les PPI de manière claire et circonstanciée.



5.4- LA DURÉE DE LA PROTECTION (ANNEXE 19)

Le blocage du captage thyroïdien est transitoire et sa durée dépend de la posologie qui a été administrée (Zanconino et Becker, 1993) (**annexe 19**, figure 4). Pour une prise dans les deux heures avant l'exposition et une posologie voisine de 100 à 200 mg d'iodure de potassium, la protection est totale pendant 8 à 9 heures. Elle est totale pendant 48 heures après une prise de 200-1000 mg mais partielle après une prise de seulement 25 à 100 mg. Elle est très

faible après 72 heures quelle que soit la dose administrée (Schlumberger *et al.* 1987).

Il est néanmoins difficile de mettre en perspective les études de référence, au demeurant anciennes et relativement peu nombreuses.

5.5- LA QUESTION DE L'ADMINISTRATION RÉPÉTÉE D'IODE STABLE (ANNEXE 20)

La question de l'administration répétée d'iode stable est indissociable de celle de la durée de la protection.

Divers scénarios sont envisagés dans les PPI en termes de cinétique des rejets. On peut lire par exemple qu'une évacuation est susceptible d'intervenir avant, pendant ou après le rejet selon les circonstances, que cette évacuation peut-être précédée d'une mise à l'abri avec éventuellement prise de comprimés d'iode stable, et que les personnes évacuées pendant le rejet (cas du rejet prolongé) peuvent être soumises à une contamination par les particules contenues dans le nuage, comme lors d'une évacuation après rejet. La question d'une éventuelle prise répétée d'iode n'est pas évoquée. Pourtant, la durée de la protection après blocage de la thyroïde par une administration d'iode stable en cas d'exposition prolongée est limitée (cf. ci-dessus).

Il semble exister un consensus au niveau de diverses instances nationales et internationales sur l'opportunité d'une administration d'iode stable répétée plusieurs jours de suite (pendant environ 10-12 jours) en cas d'exposition prolongée au-delà de plusieurs jours. Administrée chez les sujets euthyroïdiens⁵⁴, elle permettrait de maintenir un blocage efficace du captage thyroïdien.

Les avis peuvent néanmoins diverger concernant les *populations* susceptibles de faire l'objet d'une administration répétée d'iode stable - celle-ci étant dans tous les cas recommandée pour les enfants et les adolescents.

La question se pose par ailleurs de la *posologie* qui doit être administrée. Notons que l'administration d'iode à raison de 100 mg/24 h (soit 130 mg d'iodure de potassium) pendant 15 jours ne provoquerait pas de désordre hormonal sérieux chez le sujet normal (dictionnaire Vidal, 2014 ; Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM) 2014 – <http://agence-prd.ansm.sante.fr/php/ecodex/rcp/R0252412.htm>).

L'IRSN pour sa part a lancé avec cinq partenaires scientifiques un programme de recherche sur les modalités d'administration de l'iode stable en cas de rejets radioactifs répétés ou prolongés (Programme PRIODAC), dont les premiers résultats sont attendus dans les cinq ans (IRSN, 2014b).



54- *Sujet euthyroïdien* : sujet dont la glande thyroïde présente un fonctionnement normal.



Recommandations du Comité scientifique

- ◆ *Le Comité scientifique recommande que les indications relatives à la durée de la protection figurent dans les PPI de manière claire et circonstanciée.*
- ◆ *La question de l'éventuelle administration répétée d'iode stable et de ses modalités (public concerné, dose, conditions d'administration...) est à intégrer dans les PPI et ce sans attendre les conclusions des recherches conduites sur le sujet par l'IRSN et coll.. Cela est d'ailleurs conforme aux recommandations de la CIPR 103 (2007).*

5.6- SUR LA COMPOSITION DES REJETS EN IODE (ANNEXE 21)

On recense 32 isotopes de l'iode (Brown et Firestone, 1986). Ils sont d'origine anthropique, à l'exception de l'iode 127 et de l'iode 129 que l'on trouve en abondance à l'état naturel (ce dernier, formé dans la haute atmosphère par interaction du rayonnement solaire avec le tellure, a également une origine anthropique)⁵⁵. Enfin, comme beaucoup d'éléments de numéro atomique⁵⁶ impair, l'iode n'a qu'un seul isotope stable : l'iode 127.

L'activité totale d'un cœur de réacteur en isotopes de l'iode est estimée à environ 3¹⁹ Bq (Schlumberger *et al.*, 2011). Il s'agit de produits de fission (fragments de fission ou leurs descendants) : les isotopes 129 à 141, de période⁵⁷ variable.

Si les isotopes de très courte période (iodes 130 et 132 à 141) disparaissent (se désintègrent) plus rapidement, ils n'en sont pas moins toxiques s'ils atteignent l'homme, notamment s'ils sont incorporés (inhalés ou ingérés avec de l'eau ou des aliments) (**annexe 21**, tableau 1).

Quant à l'iode 129, du fait de sa très longue période, il est susceptible d'être incorporé pendant des centaines de millions d'années.

Recommandations du Comité scientifique

- ◆ *Préciser dans les PPI que l'administration d'iode stable protège contre les effets des différents isotopes de l'iode présents dans les rejets – même ceux de très courte période, et pas seulement contre les effets de l'iode 131. Ce qui confirme l'importance d'une prise d'iode stable avant le début des rejets.*
- ◆ *Envisager l'enrichissement en iode du sel de table pour les populations vivant au voisinage des centres de stockage ou de traitement du combustible usé (iode 129) dans les régions où l'alimentation est naturellement pauvre en iode.*

5.7- LES LIMITES DE L'ADMINISTRATION D'IODE STABLE

Cette question comporte deux aspects : le rôle des restrictions alimentaires dans la réduction de l'incorporation d'iode radioactif et le rôle des autres radionucléides rejetés en cas d'accident dans l'exposition des populations.

5.7.1- Sur le rôle des restrictions alimentaires dans la réduction de l'incorporation d'iode radioactif

Si l'administration d'iode stable est la parade retenue (avec naturellement la mise à l'abri et/ou l'évacuation) pour limiter l'incorporation thyroïdienne d'iode radioactif en atmosphère contaminée, des mesures visant à *réduire l'activité ingérée* (restrictions de consommation d'eau et/ou d'aliments contaminés) doivent si nécessaire et dans la mesure du possible être mises en œuvre à court terme (CIPR, 2007 ; OMS, 2011).

L'expérience de la Pologne est à ce titre exemplaire (**annexe 22**, tableau 1).

5.7.2- Le rôle des radionucléides autres que l'iode dans l'exposition des populations en cas d'accident

Comme cela est indiqué ci-dessus, l'efficacité de l'administration d'iode stable dépend de plusieurs facteurs qui relèvent des modalités d'administration de l'iodure de potassium et des caractéristiques des sujets.

Il convient néanmoins de rappeler que, si à *court terme* les différents isotopes de l'iode sont radiologiquement les plus pénalisants⁵⁸, d'autres radionucléides sont rejetés en situation accidentelle contre lesquels l'administration d'iode stable ne confère aucune protection (autres produits de fission, produits d'activation, noyaux lourds) (**annexe 22**).

Ces substances sont présentes dans le combustible, voire dans la cuve, les circuits primaire et secondaire et dans l'enceinte de confinement sous des formes physico-chimiques diverses.

Recommandations du Comité scientifique

- ◆ **Les contre-mesures destinées à protéger les populations exposées contre l'iode radioactif qui figurent dans les PPI ne doivent pas se limiter à l'administration d'iode stable. Les PPI doivent aussi prévoir et détailler les mesures à prendre en matière d'alimentation.**
- ◆ **Le port de masques de protection serait à recommander dans le cas d'une évacuation qui fait suite à une mise à l'abri en mode réflexe.**
- ◆ **L'inefficacité de l'administration d'iode stable contre les radionucléides autres que l'iode doit être clairement indiquée aux différents acteurs de la gestion de crise et au public.**



55- La production d'isotopes de l'iode à partir des fissions spontanées de l'uranium naturel est très marginale.

56- Le *numéro atomique* désigne le nombre de protons contenus dans le noyau d'un atome.

57- La *période* est le temps au bout duquel il reste encore la moitié de l'activité initiale de la source radioactive, le reste s'étant désintégré naturellement. Ainsi, T = *entre 2,28 et 20,8 heures* pour les iodes 130, 132, 133, 135 // *52,6 et 1,4 minutes* pour les iodes 134 et 136 // *24,5 secondes à 450 millisecondes* pour les iodes 137 à 141 // *8 jours* pour l'iode 131 et *1,57x10⁷ ans* (15,7 millions d'années) pour l'iode 129.

58- Avec le ruthénium gazeux, éventuellement présent dans l'enceinte de confinement.



6. CAMPAGNES DE DISTRIBUTION DES COMPRIMÉS D’IODE STABLE : LES MODALITÉS DE LA MISE À DISPOSITION DES COMPRIMÉS D’IODURE DE POTASSIUM DANS ET HORS DE LA ZONE PPI⁵⁹

Les conditions de la mise à disposition des comprimés d’iodure de potassium sont différentes selon qu’il s’agit des populations situées à l’intérieur ou à l’extérieur du périmètre des PPI, tant au niveau du *moment* de leur mise à disposition que de ses *modalités*.

S’il s’agit dans les deux cas de dispositions préventives, la distribution aux populations n’est réalisée en amont de la situation accidentelle qu’à l’intérieur du périmètre du PPI, seul un stockage de proximité au niveau des zones défense et des départements étant effectif hors de la zone PPI.

DANS LA ZONE PPI

6.1- HISTORIQUE DE LA DISTRIBUTION DES COMPRIMÉS D’IODE STABLE EN ZONE PPI DES CNPE

Avant 1996, des stocks de comprimés d’iode stable étaient constitués à proximité des installations nucléaires dotées d’un plan particulier d’intervention et susceptibles de rejeter de l’iode radioactif, notamment des centres nucléaires de production d’électricité (Circulaire interministérielle du 18 août 1992).

Étant données les difficultés pratiques que poserait la distribution de ces comprimés en cas d’accident, le principe d’une distribution préventive d’iode stable aux populations (foyers) et aux chefs d’établissements d’enseignement et de santé autour des sites nucléaires a été décidé au printemps 1996, puis étendu à toutes les catégories de population : particuliers, responsables d’entreprises, collectivités, établissements recevant du



59- L’analyse qui suit porte principalement sur les installations nucléaires de base (INB) exploitées par EDF (centres nucléaires de production d’électricité). La question des autres INB et des installations nucléaires de base secrètes (INBS) est évoquée en 6.9.

public et lieux publics de rassemblement (établissements scolaires, sanitaires et sociaux, centres de loisir ou de vacances...), administrations et services participant à la mise en œuvre du PPI.

Plusieurs campagnes successives ont été organisées avant 2016, motivées principalement par la durée de validité des comprimés d'iode de potassium (fixée initialement à 3 ans puis progressivement à 7 ans sous réserve du résultat du suivi toujours en cours)⁶⁰.

6.2- MODALITÉS ET BILAN DES DIFFÉRENTES CAMPAGNES

6.2.1- Deux modalités de mise à disposition ont été mises en œuvre :

- la **remise des comprimés** (envoi postal ou distribution en porte-à-porte),
- la **mise à disposition des comprimés dans les officines de pharmacie** (avec envoi de bons retrait à domicile, ou plus marginalement sans bon de retrait).

Quatre campagnes ont eu lieu à ce jour, selon des modalités différentes et avec des résultats contrastés (tableau 5).

Tableau 5 - Les campagnes de distribution d'iode de potassium dans la zone PPI et leur bilan

Campagne		Modalités de distribution	Rayon de mise en œuvre	Taux de couverture
N°1	1996	(à titre expérimental)	5 km	90 % (envoi postal de comprimés)
		◆ Envoi postal de comprimés		
	◆ Distribution en porte-à-porte			
	◆ Envoi de bons de retrait			
	◆ Distribution de comprimés ou			
1998 ¹	◆ Mise à disposition (modalités non précisées)	5 km		
	Envoi postal de comprimés	5 km – 10 km (établissements sanitaires et scolaires)	/	
	Envoi de bons de retrait	5 km – 10 km (autres établissements)		
Disponibles en pharmacie sans ordonnance	> 10 km			
N°2 ²	2000	Envoi de bons de retrait	10 km	~ 54 %
	2002	◆ Distribution directe par les pharmaciens sans bon de retrait		(final) 73%
◆ Distribution en porte-à-porte par associations agréées				
N°3 ³	2005	Envoi de bons de retrait nominatifs (+ lettre nominative + notice d'information) + mobilisation particulière des pharmaciens d'officine		~ 54 %
	à + 6 mois	Envoi postal de comprimés	/	
N°4 ⁴	2009	Envoi de bons de retrait	~ 50 %	
	2010	Envoi postal de comprimés	(final) 91 %	

1 Instruction du Premier ministre du 10/04/1997 et Circulaire DGS/DSC/SGCISN du 30/05/1997.

2 Circulaire DGS/SGCISN/DDSC du 14/11/2001.

3 Circulaires DGSNR/DDSC des 08/02 et 11/08/2005.

4 Circulaire NOR/IOCE 0915370 du 27/05/2009.

6.2.2- Le bilan

La remise des boîtes de comprimés s'avère être la stratégie de distribution la plus efficace en termes de couverture. Le taux de couverture suite à l'envoi des bons de retrait est tout à fait insuffisant, malgré l'implication de nombreux acteurs⁶¹.

L'abandon en 2000 de la remise des boîtes de comprimés d'iode stable avait été justifié par le fait qu'il s'agit de médicaments et qu'à ce titre, ils ne peuvent être délivrés que par l'intermédiaire d'un pharmacien. Les campagnes complémentaires réalisées en 2002, 2005 et 2010 ont néanmoins été réalisées par distribution en porte-à-porte ou par envoi postal.

6.3- OBSERVATIONS SUR LES TAUX DE COUVERTURE OBTENUS PAR RETRAIT DES BOÎTES EN PHARMACIE AVANT CAMPAGNES COMPLÉMENTAIRES

On note de grandes disparités selon les sites et selon les cibles.

Les disparités selon les sites

Exemples :

- *Campagne 2000* : Cattenom et Civaux : 70 %, Golfech : 49 %, Nogent-s/-Seine : 44,4 % (EDF Golfech, 2000).
- *Campagne 2005* : Nogent + Belleville + Golfech + Fessenheim (précampagne) : 66 % (Circulaire interministérielle du 11 août 2005), mais niveau Parc : 54 % (EDF, 2010).

Les disparités selon les cibles

Exemples :

- *Campagne 2005, CNPE de Golfech* : foyers ~ 48 %, entreprises ~ 75 % (CLI Golfech, 2005).
- *Campagne 2009, ensemble du parc nucléaire* : foyers ~ 50 % (proche du taux toutes catégories confondues qui est ~ 52 %), entreprises + collectivités 22,5 % (EDF, 2010).

6.4- LES MOTIVATIONS DES POPULATIONS VIS À VIS DU RETRAIT DES COMPRIMÉS D'IODE STABLE EN PHARMACIE

Un certain nombre d'explications ont pu être avancées localement concernant l'efficacité limitée de l'envoi de bons de retrait (confusion avec des publicités commerciales, insuffisance d'information, degré d'implication des pharmaciens d'officine...).

Mais la question de la motivation des populations à retirer les comprimés est une question centrale.

Tns/Sofres a réalisé en 2009 pour l'ASN une enquête sociologique relative à la campagne 2009. Cette étude a notamment porté sur les attitudes et les comportements des personnes selon qu'elles sont ou ne sont pas allées retirer leurs comprimés (comportements de retrait, perception du risque, attitude vis-à-vis de l'administration d'iode stable, confiance dans le nucléaire et l'information).

Pour 79% des personnes qui n'ont pas retiré leurs comprimés, cela était « compliqué ». C'est le cas pour 87% de l'ensemble des sujets enquêtés. Cela n'est donc pas, si l'on en croit cette étude, un critère décisif. Par ailleurs, que les sujets aient ou non retiré leurs comprimés, une proportion importante d'entre eux minimise le risque nucléaire et/ou l'utilité des comprimés⁶².

Les résultats de cette étude n'apportent donc guère de réponse à la question de savoir pourquoi la stratégie de l'envoi de bons de retrait est si peu efficace.



60- Les boîtes de comprimés distribuées lors de la campagne de 2016 indiquent juillet 2022 comme date de péremption.

61- Ainsi, la campagne de 2009 a-t-elle été organisée par les ministères de l'Intérieur et de la Santé et par l'ASN avec le soutien d'EDF, de l'ANCCLI, ainsi que de l'Ordre et des syndicats de pharmaciens. Un courrier nominatif daté du 15 juin invitait chaque foyer à retirer une boîte de comprimés dans les pharmacies dépositaires pendant une période de 6 mois ; ce courrier était également adressé aux établissements de la zone recevant du public dans le but de constituer un stock en cas d'urgence (ASN, 2009). Afin de sensibiliser la population, les pharmaciens et professions médicales (ainsi que les CLI) étaient invitées à organiser des réunions publiques d'information.

62- Pour une grande partie des riverains qui ne sont pas allés chercher les comprimés (50% des sujets enquêtés), le retrait des comprimés n'est pas une priorité. Globalement, l'ensemble des enquêtés disent à 72 % ne pas être inquiets d'habiter à proximité d'une centrale nucléaire.

Recommandations du Comité scientifique

(1) *Si le principe du retrait des boîtes en pharmacie est maintenu, il pourrait être réalisé*

- ♦ *une étude comparative des taux de couverture obtenus lors des précédentes campagnes réalisées avec bons de retrait (i) autour des différents sites (ii) pour les différentes catégories de cibles,*
- ♦ *une enquête de motivation auprès des catégories de cibles qui présentent des taux de couverture significativement différents suite à l'envoi de bons de retrait.*

De telles études pourraient peut-être permettre (i) de différencier les modalités d'information et de distribution selon les sites et selon les cibles (ii) de laisser plus de souplesse aux territoires pour choisir le mode de distribution le plus pertinent pour eux en tenant compte de la réalité des bassins de vie.

(2) *Par ailleurs, de nombreuses études de sciences sociales ont fait apparaître que la perception du risque pouvait varier en fonction de la distance au site à risque, les populations riveraines ayant tendance à être dans une attitude de déni du risque (Chiva, 1980) (annexe 23). Une étude des taux de retrait en fonction de la distance au site pourrait éventuellement conduire à adapter l'information et les stratégies de distribution selon la zone de résidence.*

(3) *En tout état de cause, il est clair que le mode de distribution actuel via des bons de retraits n'est pas efficace, et que les populations globalement n'y adhèrent pas. Ce constat a été rapporté de nombreuses fois aux autorités concernées.*

Pourquoi dès lors ne pas revenir aux modalités de 1996 (distribution en porte-à-porte ou à défaut envoi des comprimés par voie postale), qui ont d'ailleurs été mises en œuvre à l'occasion des campagnes complémentaires ?

HORS DE LA ZONE PPI

L'idée de constituer des stocks de proximité est apparue dans la circulaire de la Direction générale de la santé du 14 novembre 2001 – circulaire abrogée par la circulaire interministérielle du 11 juillet 2011, qui définit les nouvelles modalités de mise en place des stocks de comprimés d'iode de potassium (KI) au sein du territoire ainsi que les conditions de leur distribution à la population hors des zones couvertes par un plan particulier d'intervention (PPI) (nouveau Plan Iode Départemental)⁶³.

6.5- LA PROCÉDURE DE MISE À DISPOSITION

6.5.1- Aux niveaux zonal et départemental

- des stocks sont *pré-positionnés dans les zones de défense* par l'établissement de préparation et de réponse aux urgences sanitaires (EPRUS), avec également constitution d'un stock zonal de sécurité (durée initiale de conservation prévue : 4 ans) ;
- l'EPRUS alimente *dans chaque département un grossiste-répartiteur de médicaments*, ce qui doit permettre la distribution rapide, la gestion dynamique et la traçabilité des lots ;
- l'accès à ces stocks d'iode de potassium est garanti 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24 par la convention passée entre l'EPRUS et le grossiste-répartiteur *sous réserve d'une mise en alerte* de ce dernier, alerte signifiée par l'EPRUS ou par le préfet ;
- une *pré-alerte* déclenche immédiatement la mise en astreinte 24/24 de l'établissement de répartition ;
- si l'accident se confirme, le préfet demande au grossiste-répartiteur, dans la limite de ses capacités opérationnelles, d'acheminer dans un délai de 12 heures maximum les comprimés d'iode de potassium vers tout ou partie des *sites de distribution préalablement établis* par le préfet du département (niveau infra départemental).

6.5.2- Au niveau infra départemental

Chaque préfet organise en cas d'urgence dans son département les modalités de mise à disposition de la population des comprimés d'iodure de potassium, en s'appuyant notamment sur les maires (lieux préalablement identifiés dans les plans communaux de sauvegarde...) et dans la mesure du possible sur les organisations et maillages territoriaux.

Cette mise à disposition repose sur une planification à deux niveaux :

- au niveau départemental pour définir *les communes chargées de la distribution* ;
- au niveau communal où le maire organisera *les points de distribution à la population* après les avoir identifiés en lien avec l'agence régionale de santé.

Le *choix des lieux de distribution* infra départementaux repose sur un certain nombre de principes. Ils doivent être :

- reconnaissables par la population (identification, localisation) ;
- activables 24/24, dans des délais très courts ;
- accessibles ;
- situés en dehors des zones à risque connues.

Leur nombre et leur répartition sont fonction des densités de population, et ils ne doivent pas impliquer les établissements de santé dans le cas d'une situation d'urgence.

Dans le sud-ouest de la France par exemple (CNPE de Golfech), les *chefs-lieux de cantons* et plus marginalement *les pharmacies (officines, établissements de santé), SDIS et Préfectures* jouent selon les départements le rôle de sites de distribution pour le grossiste-répartiteur. À charge pour eux de remettre aux maires de toutes les communes concernées, à la population ou aux chefs-lieux de cantons selon le cas, les lots qui leur reviennent.



Chaque préfet organise en cas d'urgence dans son département les modalités de mise à disposition de la population des comprimés d'iodure de potassium en s'appuyant notamment sur les maires.

6.6- OBSERVATIONS RELATIVES À LA CIRCULAIRE INTERMINISTÉRIELLE DU 11 JUILLET 2011 ET À SA MISE EN ŒUVRE

6.6.1- Observations relatives aux termes de la circulaire

Mise en alerte, pré-alerte et mise en astreinte du grossiste-répartiteur

On note tout d'abord l'utilisation de plusieurs termes distincts (mise en alerte, pré-alerte, mise en astreinte) dont l'*objet* et l'*articulation* restent flous ;

Ensuite, *les modalités de mise en pré-alerte* sont inadaptées aux conditions accidentelles (mise en pré-alerte aux heures ouvrables des établissements + les dimanches et jours fériés 8h-18h). Dans ces conditions en effet, le public peut se trouver exposé à un rejet d'iode radioactif sans que le grossiste-répartiteur n'ait été mis en pré-alerte et donc en astreinte, et « les stocks mis à disposition de la population dans des délais appropriés » - qu'il s'agisse d'un accident à cinétique « rapide » (rejet prévu dans les 6 heures) ou d'un accident à cinétique « lente » (rejets prévu après un délai de 6 heures) (cf. sections 3 et 4).

63- À noter que la circulaire interministérielle du 30 mai 1997 stipulait déjà qu'au-delà des périmètres d'intervention des PPI, sur l'ensemble du territoire, des plaquettes de comprimés seraient en vente sans ordonnance avant la fin de l'année dans les pharmacies d'officine, et des stocks constitués dans des hôpitaux.

Les principes de désignation des lieux de distribution infra départementaux

Il est indiqué que ces lieux « doivent être situés en dehors des zones à risque connus » : concernant le CNPE, zone à risque par définition, s'agit-il simplement d'être situé au-delà du rayon des 10 km ? ou plus loin vu le caractère discuté du rayon de 10 km retenu dans le PPI ?

Par ailleurs, les « nombre et répartition [des lieux de distribution] seront déterminés en fonction des densités de population » : une telle formulation, qui peut conduire à négliger certaines populations, est préoccupante en termes de déontologie et de santé publique.

Le délai maximum d'acheminement des comprimés d'iodure de potassium par le grossiste-répartiteur

Pour être pleinement efficace, l'administration d'iode stable doit avoir lieu dès l'alerte donnée, au mieux avant la propagation du nuage radioactif (par exemple 2 heures avant) (cf. 5.3.2). Le délai maximum de 12 heures pour l'acheminement des comprimés est très problématique en cas d'accident à cinétique rapide avec rejets au bout de quelques heures, mais également d'accident à cinétique plus lente (cf. 4.3).

Recommandations du Comité scientifique

Le Comité scientifique recommande

- ◆ d'éclaircir la fonction et les conditions de la mise en pré-alerte et de la mise en alerte du grossiste-répartiteur ;
- ◆ de préciser la signification du principe de sélection des lieux de distribution infra départementaux n°4 (« être situés en dehors des zones à risques connus ») ;
- ◆ d'insister sur le risque associé au principe de sélection des lieux de distribution infra départementaux n°5 (« leur nombre et leur répartition seront déterminés en fonction des densités de population ») ;
- ◆ de réduire le délai maximum autorisé d'acheminement des comprimés d'iodure de potassium par le grossiste-répartiteur.



6.6.2- Observations relatives à la mise en œuvre de la circulaire

Les établissements de préparation et de réponse aux urgences sanitaires (EPRUS)

Les établissements de préparation et de réponse aux urgences sanitaires (EPRUS) semblent être dans certains cas des établissements de santé (exemple : les Hôpitaux de Lyon). Sachant que réglementairement l'accès aux stocks d'iodure de potassium est garanti 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24 par la convention passée entre l'EPRUS et le grossiste-répartiteur sous réserve d'une mise en alerte de ce dernier par l'EPRUS, la question se pose de savoir si les établissements de santé satisfont à ces exigences.

L'efficacité des modalités de la distribution arrêtée au plan départemental

Pour être pleinement efficace, la prise d'iode stable doit avoir lieu avant le passage du panache radioactif, au mieux 2 heures avant et au maximum 5 ou 6 heures après (avec une efficacité moindre) (cf. 5.3.2).

Un exercice réalisé en 2013 dans le département de Tarn-et-Garonne a montré que le temps nécessaire à l'activation de trois circuits de distribution du grossiste-répartiteur vers les chefs-lieux de canton était respectivement de 4 h15, 5 h et 6 h15. À charge ensuite pour les chefs-lieux de cantons de distribuer les lots aux maires des différentes communes et pour ceux-ci de les remettre à leurs administrés.

La question est de savoir si le délai de 12 heures prescrit dans la circulaire peut-être respecté en situation « normale » et *a fortiori* :

- en situation de crise, avec encombrement des *voies de circulation* et le cas échéant fermeture de ces voies et mise en place de déviations routières ;
- en situation de crise, avec indisponibilité des *systèmes de communication* (zones blanches, panne technique ou agression externe éventuelles...) ;
- en cas de *conditions météorologiques* défavorables.

En tout état de cause, des délais de cet ordre sont problématiques en cas d'accident à cinétique rapide avec rejets à court terme et mise à l'abri immédiate (cf. 4.3).

La pertinence des dispositions de la circulaire du 11 juillet au regard du redécoupage administratif du territoire qui est intervenu en 2014

La redéfinition des cantons

Les sites de distribution infra départementale par le grossiste-répartiteur peuvent être les *chefs-lieux de cantons*. Les cantons ont été redessinés en 2014, les chefs-lieux de cantons sont moins nombreux. Lorsque le site de distribution est le chef-lieu de canton, cela a pour conséquences :

- une *modification des modalités d'acheminement* des stocks d'iode stable par le grossiste-répartiteur vers les chefs-lieux de cantons ;
- un *allongement du temps d'acheminement* des nouveaux chefs-lieux de cantons vers certaines communes.

La redéfinition des régions

La circulaire du 11 juillet 2011 stipule que le préfet de zone de défense, en lien avec l'agence régionale de santé (ARS) de zone s'assurera de la cohérence du dispositif concernant

- le maillage territorial et les zones de compétences des grossistes répartiteurs (...);
- la cohérence territoriale en cas de distribution ;
- la cohérence de la typologie des lieux mis à contribution pour la distribution des comprimés d'iodure de potassium (...) ».

Par ailleurs, les plateformes de l'EPRUS où sont pré-positionnés les stocks de comprimés d'iodure de potassium sont des plateformes zonales.

Or le nouveau découpage administratif des régions ne coïncide plus ni avec les zones de défense et de sécurité, ni avec le réseau des ARS antérieurs.

L'information des populations hors zone PPI

La circulaire du 11 juillet 2011 précise que « L'organisation de la distribution devra définir et intégrer les priorités de distribution d'urgence, notamment les zones susceptibles de concentrer des populations vulnérables, notamment des enfants et des femmes enceintes, ou les zones en proximité de zone PPI. Il devra également prévoir la présence éventuelle de populations exogènes sur le territoire pour les intégrer dans le processus de distribution ».

Or, aucun texte ne prévoit une information préalable des populations hors zone PPI : pas de fascicule grand public, pas d'information dans les médias ou de réunions d'information *tant sur l'existence d'un risque que sur les mesures de protection à mettre en œuvre en cas d'accident*.

De plus, aucune présence médicale n'est prévue lors de l'éventuelle remise des comprimés à la population.

Recommandations du Comité scientifique

Le Comité scientifique recommande

(1) au regard du redécoupage administratif du territoire intervenu en 2014

- ◆ de redéfinir les zones de défense et de sécurité ainsi que le réseau des ARS ;
- ◆ de redéfinir, suite à la redéfinition des cantons, les points de livraison des stocks (sites de distribution infra départementaux) par les grossistes-répartiteurs (cas des chefs-lieux de cantons) ;

(2) concernant la qualification des établissements de préparation et de réponse aux urgences sanitaires (EPRUS)

- ◆ de s'assurer que les établissements de santé qui ont été sélectionnés pour faire fonction d'EPRUS répondent bien aux exigences de disponibilité requise 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24 ;

(3) concernant l'efficacité et la cohérence des modalités de la distribution arrêtées au plan départemental

- ◆ d'évaluer les délais nécessaires à l'acheminement des comprimés d'iode stable du grossiste-répartiteur jusqu'aux sites de distribution et au-delà jusqu'à la population, notamment en cas d'accident à cinétique rapide, et plus précisément d'optimiser les circuits choisis (en termes de délais, de rose des vents...), et ce dans toutes les configurations possibles de circulation, de disponibilité des réseaux de communication et de conditions météorologiques ;

- ◆ de repenser si nécessaire le choix des centres de stockage (localisation, nombre par département...), mais également le choix des sites de distribution infra départementaux, et finalement de s'interroger sur la pertinence de la notion même de limite départementale ;

- ◆ d'harmoniser les plans iode des départements situés dans la zone hors PPI d'un même CNPE⁶⁴ (cohérence, visibilité pour les élus locaux), voire à un niveau plus large (départements différents situés dans la zone hors PPI de plusieurs CNPE) ;

(4) concernant l'information des populations

- ◆ de faire une information préalable des populations situées dans les zones hors PPI et concernées par la distribution d'iode stable, sur l'existence et la nature du risque ainsi que sur les mesures de protection à mettre en œuvre en cas accident (développer la culture du risque) ;

(5) de rendre indispensable la présence de professionnels et de bénévoles compétents pour

- ◆ porter, accompagner et valoriser les campagnes de distribution des comprimés d'iode stable : médecins, pompiers, infirmières et autres personnels de santé, associations agréées ;
- ◆ rappeler la posologie et veiller aux éventuelles contre-indications ou effets indésirables liés à la prise d'iode / expliquer l'intérêt et les limites de l'administration d'iode stable (voir section 4).



Le Comité Scientifique recommande de repenser si nécessaire le choix des centres de stockage et le choix des sites de distribution infra départementaux.

Pour conclure,

Les plans antérieurs à la circulaire du 11 juillet 2011 permettaient un pré-positionnement des stocks de proximité dans les chefs-lieux de cantons, privilégiant ainsi la notion de proximité au niveau du maillage territorial. On peut considérer que les nouvelles modalités de distribution d'iode stable hors de la zone PPI constituent à cet égard une régression par rapport à la situation antérieure.

Le Comité scientifique recommande donc de laisser plus de souplesse aux territoires pour choisir le mode de distribution le plus pertinent pour eux en tenant compte de la réalité des bassins de vie (cohérence de la distribution, sentiment d'appartenance de la population à un territoire...).

6.7- QUESTIONS COMPLÉMENTAIRES

D'autres questions peuvent se poser concernant les stocks d'iodure de potassium disponibles chez les grossistes-répartiteurs et leur acheminement vers les sites de distribution départementaux, telles que :

- l'exercice du droit de retrait par les livreurs du grossiste-répartiteur ;
- une éventuelle administration répétée d'iode stable (cf. 6.8).

PAR-DELÀ LE CLIVAGE ZONE PPI / HORS ZONE PPI

6.8- LA QUESTION DE L'ADMINISTRATION RÉPÉTÉE D'IODE STABLE (CF. 5.5)

Recommandations du Comité scientifique

- ◆ **La question de l'éventuelle administration répétée d'iode stable est à intégrer dans les plans de stockage et de distribution des comprimés d'iodure de potassium tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des zones couvertes par un PPI, sans attendre les résultats de l'étude lancée par l'IRSN (Programme PRODAC).**

6.9- LA QUESTION DU RAYON DU PPI ET DE LA ZONE HORS PPI RETENUS POUR LA DISTRIBUTION D'IODE STABLE

Cette question est traitée dans la section 4 pour l'ensemble des contre-mesures susceptibles d'être mises en œuvre en cas d'accident.

La distance au site

Comme cela est indiqué en 4.2, les rayons de 2 km, 5 km et 10 km retenus pour la mise en œuvre des PPI ne permettraient pas d'assurer la protection des populations dans certaines situations accidentelles.

Le retour d'expérience de la catastrophe de Tchernobyl a montré quant à lui le caractère aléatoire de l'étendue d'une contamination en cas d'accident grave. En effet, les régions de Gomel et de Mogilev en Biélorussie, situées respectivement à environ 150 km et 300 km de la centrale accidentée, ont été particulièrement exposées aux rejets radioactifs. Cela a conduit à une augmentation considérable à relativement court terme des pathologies thyroïdiennes, notamment cancéreuses, chez les jeunes âgés de moins de 19 ans et plus

64- Le propos vaut pour toutes les installations nucléaires de base susceptibles de rejeter de l'iode radioactif.

particulièrement les enfants âgés de moins de 5 ans au moment de la catastrophe – augmentation inversement corrélée à l'âge au moment de l'exposition⁶⁵.

Sur la période 1991-1997, le risque relatif⁶⁶ variait ainsi jusqu'à plusieurs ordres de grandeur selon l'âge des enfants au moment de l'accident et leur lieu de résidence. Il était le plus élevé dans le district de Gomel (le plus touché) chez les enfants âgés de moins de 1 an au moment de l'exposition : de l'ordre de 600, *versus* environ 6 chez les sujets exposés à l'âge de 11-14 ans et 50 chez les enfants de Mogilev exposés avant l'âge de 1 an (Cardis *et al.*, 1999).

Dix ans après la catastrophe, on estimait à plusieurs milliers l'incidence globale des cancers de la thyroïde radio-induits chez les jeunes exposés avant l'âge de 19 ans dans les deux pays les plus touchés (Biélorussie et Ukraine) (IAEA, 2006 ; UNSCEAR, 2008). Vingt ans après, cette incidence est d'environ 7000 cancers de la thyroïde pour les trois pays de l'ex-Union soviétique les plus touchés (Biélorussie, Ukraine, Fédération de Russie) chez les sujets exposés avant l'âge de 18 ans, et elle ne diminue pas (Schlumberger *et al.*, 2011). Les estimations du risque relatif conduites depuis les années 1990 dans ces trois pays sont cohérentes avec l'étude de Cardis *et al.* (1999). Les autres études confirment le risque majeur auxquelles les populations enfantines ont été exposées à des distances très éloignées du site accidenté⁶⁷ (Cardis et Hatch, 2011 ; Zablotska *et al.*, 2011...).

Il convient d'ailleurs de rappeler que les autorités polonaises, dont le territoire est situé à plusieurs centaines de km du site de la catastrophe de Tchernobyl, ont pour leur part distribué environ 10,5 millions de doses d'iode de potassium à 87% des enfants et 7 millions de doses aux adultes (Nauman et Wolff, 1993).

Enfin, la réalité d'une contamination radioactive à plusieurs dizaines de km du site de la catastrophe de Fukushima est largement documentée.

De manière plus générale, l'OMS insistait en 1999⁶⁸ sur le fait qu'en cas d'accident nucléaire « des expositions significatives à l'iode radioactif peuvent se produire à plusieurs centaines de kilomètres du site, au-delà des zones retenues dans les plans d'urgence », que peu de régions d'Europe sont situées suffisamment loin d'un réacteur nucléaire pour que soit écartée l'hypothèse d'une exposition à l'iode radioactif et qu'« **il n'est donc pas possible de fonder sur la distance une politique de mise en œuvre de la prophylaxie par l'iode stable** ». Ce point de vue rejoint les préoccupations du Comité scientifique (cf. 4.2).

La contamination de l'environnement en « taches de léopard » et la notion de rayon

La catastrophe de Tchernobyl, mais aussi celle de Fukushima, ont bien montré le *caractère hétérogène d'une contamination en cas d'accident nucléaire*. Ainsi, les régions de Gomel et de Mogilev, au nord-est de Tchernobyl, de Brest, située à environ 500 km à l'ouest du site accidenté, et de nombreuses autres régions du globe (Carpates, Bavière etc.)...

Dans ce contexte, les limites de zone PPI et de zone hors PPI n'ont plus grande signification.

Recommandations du Comité scientifique

- ◆ **Il convient de réfléchir à la proposition de Martin Schlumberger, spécialiste de cancérologie endocrinienne à l'Institut Gustave-Roussy de Villejuif (1994) : « L'accident de Tchernobyl a montré que les populations vivant à plusieurs centaines de kilomètres de la centrale [de Tchernobyl, ndlr] peuvent être fortement contaminées et développer dans les années qui suivent un cancer de la thyroïde. Ceci montre que les plans d'intervention doivent être établis au niveau d'un pays, voire d'un continent. »⁶⁹.**

6.10- LES INSTALLATIONS AUTRES QUE LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (CNPE)

6.10.1- Les installations nucléaires de base (INB) autres que les CNPE peuvent être concernées par d'éventuels rejets en iode justifiant l'administration d'iode stable.

Si l'ensemble des installations nucléaires « dotées d'un PPI » entrent dans le champ d'application de l'instruction du 10 avril 1997 (distribution d'iode stable **en zone PPI**), les circulaires des 8 février et 11 août 2005 s'appliquent de manière explicite aux INB exploitées par EDF et les *autres types d'installations nucléaires* n'y sont pas évoqués.

En ce qui concerne les *installations nucléaires de base secrètes* (INBS) susceptibles de rejeter de l'iode, «elles ne sont pas concernées par ces mesures» (circulaire du 30 mai 1997).

Au demeurant, l'information qui est consacrée à la distribution préventive et au stockage d'iode stable dans la zone PPI peut être dans certains PPI extrêmement réduite. Il en est ainsi du PPI du Centre CEA de Cadarache (version 2012), dans lequel l'administration d'iode stable *ne figure pas dans l'énoncé des contre-mesures* (chap. C) et est simplement évoquée *en une ligne* (« Si nécessaire, l'administration d'iode stable lorsque la dose équivalente à la thyroïde a atteint ou est susceptible d'atteindre 50 mSv »).

D'autres PPI par contre comportent des indications très circonstanciées sur l'administration et la distribution d'iode stable. C'est le cas du PPI de l'arsenal militaire de Toulon (INBS) (2012).

Par ailleurs, la question se pose de la mise en œuvre de la circulaire du 11 juillet 2011 (stockage et distribution d'iode stable **hors des zones couvertes par un PPI**) pour ces installations nucléaires de base.

6.10.2- Les sites de production d'iode radioactif à usage médical

Certains isotopes radioactifs de l'iode sont fabriqués par activation pour un usage médical. Ils sont utilisés, soit en radiothérapie, soit comme marqueurs *in vivo* ou *in vitro*. L'isotope 131 de l'iode est destiné aux traitements des dysfonctionnements et tumeurs de la thyroïde ; l'isotope 123 est utilisé en imagerie médicale ; l'iode 125 est utilisé en radio-immunoanalyse, en diagnostic et en thérapie.

Les sites de production de ces isotopes sont, tout au moins pour certains, sous statut ICPE.

La question se pose des accidents susceptibles de survenir sur ces installations et des mesures éventuellement à mettre en œuvre dans de telles circonstances.

Ces questions sont à approfondir.



65- Une augmentation de l'incidence des cancers thyroïdiens a également été observée dans une moindre mesure chez les adultes - notamment chez les femmes, population habituellement plus touchée par le cancer de la thyroïde.

66- Le risque relatif (RR) est une mesure statistique souvent utilisée en épidémiologie. Il s'agit de mesurer l'incidence d'un événement (ici la survenue de cancers thyroïdiens) dans une population ayant été exposée à un facteur de risque (ici l'exposition aux rejets radioactifs), rapportée à l'incidence de ce même événement dans une population identique qui n'a pas été exposée à ce facteur de risque.

67- Elles font notamment apparaître une augmentation linéaire du risque de cancer de la thyroïde avec la dose reçue, augmentation d'autant plus importante que les sujets ont été exposés jeunes.

68- Organisation Mondiale de la Santé (OMS), *Guidelines for Iodine Prophylaxis following Nuclear Accidents*, Update 1999.

69- Ce point de vue est cohérent avec les termes de la circulaire interministérielle du 30 mai 1997 (cf. introduction de la partie « Hors zone PPI », note).





probabilită
din domeniul
istilor pentru
re dolar che
și materiale

Cum știință care
cate - teme voturi
Intr-o cursă electora
procente din număr
ar putea valora m
câteva voturi dispu

7. OBSERVATIONS D'ORDRE GÉNÉRAL RELATIVES AUX PPI

7.1- LA QUESTION DE L'ALERTE

Dans le cas des accidents à cinétique rapide (situations susceptibles d'entraîner des rejets dans un délai inférieur à 6 heures) l'exploitant doit, en liaison avec les Pouvoirs Publics, alerter les populations dans la zone de danger immédiat (circonsrite en général dans les PPI à un rayon de 2 km).

L'obligation de résultats demandée par les textes réglementaires sera obtenue par une diversification des moyens déployés par EDF et les Pouvoirs Publics (sirènes, radio, télévision, véhicules avec haut parleur, système SAPPRE - système d'alerte des populations en phase réflexe).

L'obligation de résultats demandée par les textes réglementaires sera obtenue par une diversification des moyens déployés par EDF et les Pouvoirs Publics (sirènes, radio, télévision, véhicules avec haut parleur, SAPPRE).

Les limites des sirènes PPI

L'audibilité des sirènes est atténuée

- à l'intérieur des habitations ;
- dans des zones proches d'une source sonore importante ;
- lors de conditions météorologiques défavorables.

Les limites du système d'alerte « SAPPRE »

Le système d'alerte SAPPRE ne permet d'appeler que les téléphones filaires situés dans le rayon du PPI, à l'exclusion des téléphones portables. Cette situation n'est pas acceptable aujourd'hui.

Il avait été indiqué en 2014 à la CLI Golfech, d'une part que l'on s'orienterait vers un réseau satellitaire, d'autre part que le déploiement d'un système d'alerte et d'information des populations (SAIP) était envisagé pour les zones d'alerte prioritaires.

Recommandations du Comité scientifique

- ◆ ***Il est impératif de perfectionner les systèmes d'alerte (exhaustivité de la couverture géographique, adaptation aux conditions de vie et d'activités), ainsi que la méthodologie des tests périodiques effectués sur ces systèmes d'alerte, afin de les optimiser. Leur portée doit être adaptée à la réalité du risque concerné par la phase réflexe.***

7.2- LES ACTEURS SANITAIRES DE LA GESTION DE CRISE

En situation accidentelle, tout *professionnel de santé local* est susceptible d'être sollicité pour prodiguer des soins lors de la mise en œuvre des actions de protection des populations prévues dans les PPI, en particulier ceux qui ont contribué aux campagnes d'information ou de distribution des comprimés d'iode stable. Il est donc nécessaire de donner au préalable aux acteurs de santé les informations (et aux médecins la formation) dont ils pourraient avoir besoin. Une première action en ce sens a eu lieu en 1988 avec la publication de la brochure de la Faculté de médecine de Grenoble), en réponse à la prise de conscience par la communauté médicale, à l'occasion de la catastrophe de Tchernobyl, de sa méconnaissance du risque nucléaire (**annexe 24**). Cette implication des professionnels de santé est indépendante de l'intervention des spécialistes de médecine de catastrophe.

Rappelons par ailleurs que le concours de la *société civile* à la gestion post-accidentelle fait l'objet de la fiche-action n°35 du Plan national de réponse à un accident nucléaire majeur, qui implique les parties prenantes suivantes : élus, professionnels, associations, entreprises, individus, familles (SGDSN, 2014).



Recommandations du Comité scientifique

Le Comité scientifique recommande

- ◆ ***qu'une véritable sensibilisation des professionnels de santé à la gestion de crise soit mise en œuvre,***
- ◆ ***que la participation des professionnels de santé ainsi formés à la gestion de crise, ainsi que celle des autres acteurs de la société civile, soient testées lors des exercices de crise.***

Des sondages pourraient permettre d'évaluer l'aide apportée par des habitants bénévoles dans la gestion post-accidentelle.



7.3- LA QUESTION DU POST-ACCIDENT

Le Comité scientifique fait le constat que :

- les actions à mettre en œuvre lors de la phase post-accidentelle ne sont pas décrites dans le PPI,
- les collectivités et les acteurs locaux ne sont pas informés des conséquences et des responsabilités engendrées par la déclinaison du CODIRPA dans leurs territoires.

Recommandations du Comité scientifique

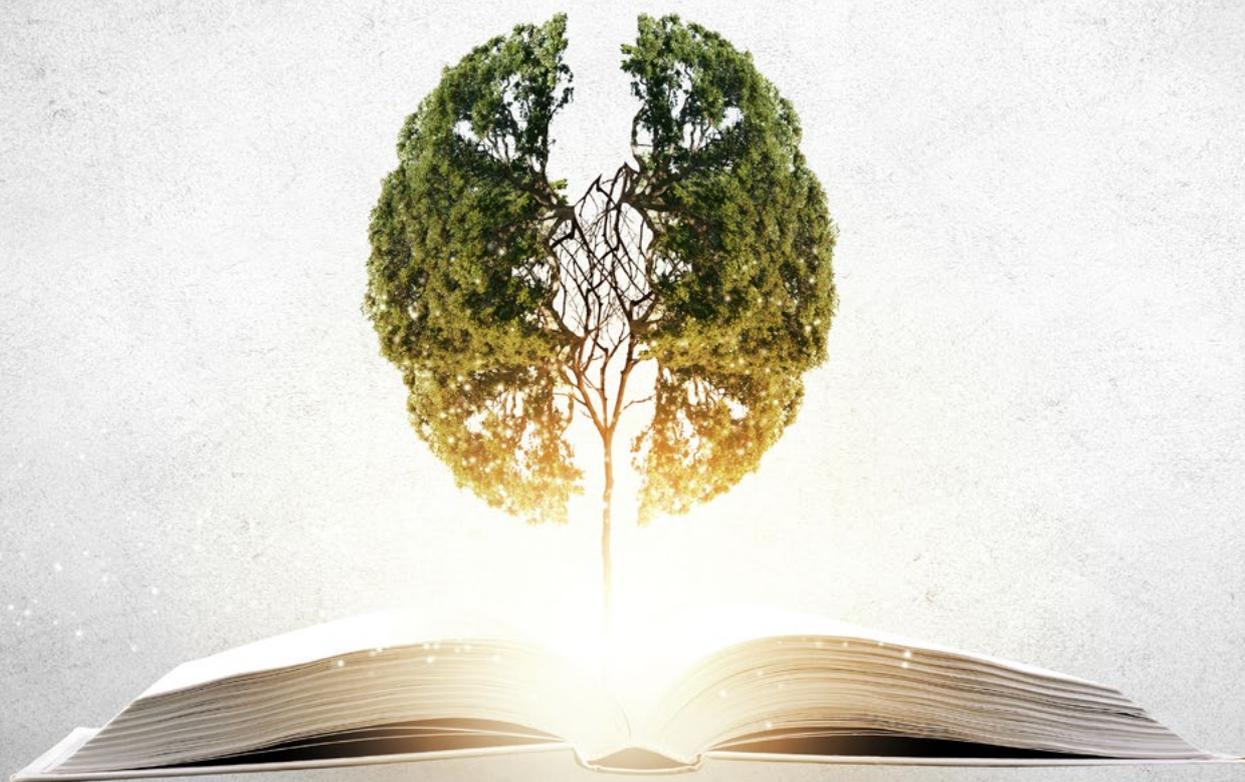
- ◆ *Sans toutefois être développée dans le PPI dont cela n'est pas l'objet, la doctrine CODIRPA de la gestion post-accidentelle d'un accident nucléaire doit être dans ses grandes lignes évoquée dans les PPI ;*
- ◆ *Les enjeux stratégiques locaux qui devront être traités de manière prioritaire lors d'une contamination, à la fois en matière de radioprotection (décontamination, nettoyage, suivi des populations, surveillance du territoire, ...) et en matière socio-économique (population, bâti, activités économiques, agricoles, bâtiments sensibles...) doivent y figurer clairement, de manière que les territoires et leurs acteurs puissent anticiper les problèmes auxquels ils seront confrontés (exemples : gestion de la ressource en eau et du ravitaillement, gestion des productions locales, ...)* ;
- ◆ *Ces enjeux doivent être définis en concertation avec les acteurs locaux.*

7.4- LA CO-CONSTRUCTION PAR LES PARTIES PRENANTES ET L'INFORMATION DU PUBLIC, CONDITIONS DE LA FAISABILITÉ ET DE L'EFFICACITÉ DES PPI

Recommandations du Comité scientifique

Le Comité scientifique recommande

- ◆ *de formaliser réglementairement la participation des CLI à la refonte des PPI ;*
- ◆ *d'inviter les CLI, le plus en amont possible, à émettre leur avis sur les PPI ;*
- ◆ *d'intégrer l'avis de la CLI dans le registre de l'enquête publique du PPI et de le mettre à disposition du public ;*
- ◆ *de prévoir dans les PPI la mise en place d'un site WEB dédié à l'information et à la communication vers le grand public : lieux de rassemblement, communes d'accueil... (cf. la démarche du site « Google Crisis ») ; en effet l'outil Internet, s'il est préservé, peut être très utile en termes d'information et de communication en situation de crise ;*
- ◆ *de veiller à ce que, conformément au décret du 6 mai 1988, les PPI soient réactualisés tous les 5 ans.*



CONCLUSION

Le principe des plans d'urgence posé par la Loi du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs au titre de la préparation et de l'organisation des secours en cas d'urgence, est à l'origine de l'élaboration des plans particuliers d'intervention (PPI) auprès des installations nucléaires de base.

Ces plans, en principe renouvelés tous les cinq ans après consultation des élus de proximité, n'ont véritablement attiré l'attention du public qu'à l'occasion de la catastrophe de Fukushima en mars 2011. Ils constituent un enjeu crucial de sûreté, dans le contexte d'une volonté de transparence de la part tant de l'État (Loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire) que de l'Autorité de sûreté nucléaire, de la montée en puissance de l'action des Commissions locales d'information auprès des installations nucléaires de base et de sa fédération nationale l'ANCCLI, ainsi que d'une réflexion des instances internationales.

C'est ainsi que la société civile a été amenée à se poser la question de l'organisation de la gestion d'une crise nucléaire, tant en phase d'urgence qu'au delà de la phase d'urgence.

Concernant la phase d'urgence, les interrogations portent essentiellement sur les procédures et les périmètres de mise en sécurité des personnes et des biens.

Le Comité scientifique de l'ANCCLI a étudié les PPI sous ces différents aspects, en réalisant une analyse critique de chacun d'entre eux et en proposant des recommandations.

Ces analyses et recommandations répondant à un triple objectif : contribuer à enrichir la réflexion du public, à faire évoluer la réglementation et à améliorer les plans particuliers d'intervention.

Cela avec pour seule fin de sauvegarder l'environnement et de protéger la santé des populations, et *in fine* de minimiser voire d'éviter, autant que faire se peut, les conséquences d'un éventuel accident grave survenant en France ou dans un pays limitrophe.

Plus précisément, le Comité scientifique s'est attaché à étudier plusieurs aspects essentiels des PPI :

- les mesures de protection (les « contre-mesures ») prévues dans les PPI ;
- les niveaux d'intervention (les niveaux d'exposition prévisionnels à partir desquels ces contre-mesures seraient mises en œuvre en cas d'accident) ;
- les scénarios accidentels susceptibles de conduire à l'activation du PPI et les rejets qui leur seraient associés ;
- le « zonage » des PPI (le rayon d'application des contre-mesures prévues dans le PPI) ;
- les procédures de distribution d'iode stable dans et hors de la zone PPI.

Ces analyses et recommandations répondant à un triple objectif : contribuer à enrichir la réflexion du public, à faire évoluer la réglementation et à améliorer les plans particuliers d'intervention.

La catastrophe de Fukushima a montré (bien après celle de Tchernobyl) que le « zonage » est un aspect central de la mise en œuvre des PPI, et le décalage qui est apparu entre les zones concernées par la gestion de cette crise et le « zonage » défini dans les PPI interpelle à juste titre la société civile. Le Comité scientifique s'est donc attaché à faire apparaître l'origine du « zonage » retenu dans les PPI (des niveaux d'intervention caducs et des scénarios accidentels discutables) et le caractère inapproprié de celui-ci.

Le Comité scientifique a également approfondi les questions de l'administration d'iode stable (une des contre-mesures prévues dans les PPI) et de sa distribution préventive (dans et hors zone PPI), qui préoccupent à juste titre les habitants des zones concernées. Il a également fait plusieurs propositions sur l'organisation générale des PPI.

Comme cela est indiqué plus haut, il a émis de nombreuses recommandations concernant l'ensemble de ces sujets, recommandations qui portent tant sur les orientations de fond que sur la rédaction des PPI, et qui ont pour objectif de contribuer à une meilleure protection des populations et de leur environnement en cas d'accident.

Cela dans le cadre d'une concertation avec les parties prenantes (services de l'État, élus, exploitants, commissions locales d'information, associations concernées...), dont le rôle central dans la faisabilité et l'efficacité des PPI est aujourd'hui largement reconnu.

NOTE AJOUTÉE EN COURS D'IMPRESSION

La Ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer a annoncé le 26 avril 2016 une extension des périmètres d'intervention à 20 km autour des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE).

On ne peut que se féliciter de cette évolution, qui va dans le sens des préconisations de l'ANCCLI maintes fois réitérées.

Néanmoins, cette décision reste très en-deçà de ces préconisations et en tout état de cause très en-deçà des présentes recommandations du Comité scientifique.



BIBLIO- GRAPHIE

Agence française de sécurité sanitaire des aliments (AFSSA) (Esinam Kalonji, Thomann C, Coord.) (2005). *Évaluation de l'impact nutritionnel de l'introduction de composés iodés dans les produits agroalimentaires*, 120 p.

Agence de la santé et des services sociaux de la Mauricie et du Centre-Québec. (2012). *Unis dans tous les sens*, 74 p.

American Academy of allergy, asthma & immunology (AAAAI) (2004). *Academy position statement : The risk of severe allergic reactions from the use of potassium iodide for radiation emergencies*.

www.thyroid.org/professionals/publications/statements/ki/11_03_18_radiation_risk_joint_statement.html

APAVE (2012). CLI Golfech – *Expertise confinement du bâtiment réacteur*. Rapport R10U2/32135/AJ/2011 à la demande de la Commission locale d'information auprès du CNPE de Golfech, 9 novembre 2012.

Arnould F, Bachellerie E, Auglaire M, De Boeck B, Braillard O, Echardt B *et al.* (2001). State of the art on hydrogen passive autocatalytic recombiner. European PARSOAR Project 1998-2002. *9th International Conference on Nuclear Engineering*. Nice Acropolis, 8-12 Avril 2001 : 24 p.

Association nationale des comités et commissions locales d'information (ANCCLI) (2014). Sûreté nucléaire – Parce-que le risque zéro n'existe pas. *Communiqué de presse*, 7 novembre 2014.

Arrêté ministériel du 13 octobre 2003 relatif aux niveaux d'intervention en situation d'urgence radiologique.

Arrêté ministériel du 20 novembre 2009 portant homologation de la décision n°2009-DC-0153 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 18 août 2009 relative aux niveaux d'intervention en situation d'urgence radiologique.

Autorité de Sûreté Nucléaire (2002). *Développement et utilisation des études probabilistes de sûreté pour les réacteurs nucléaires à eau sous pression*. Règle fondamentale de sûreté n° 2002-01.

<http://www.asn.fr/index.php/S-informer/Actualites/2002/Règle-fondamentale-de-surete-RFS-n-2002-01>

Autorité de Sûreté Nucléaire (2003). *Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté et de la radioprotection en France en 2002*.

Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2009). *Les comprimés d'iode*.

www.asn.fr/index.php/S_informer/Dossiers/Les-situations-d-urgence/Que-fair-en-cas-de-accident/Lecomprimés-d-iode (consulté 2011)

Autorité de Sûreté Nucléaire (2012). *Décision de l'Autorité de sûreté nucléaire n°2012-DC-0285 du 26 juin 2012 fixant à Électricité de France – Société anonyme (EDF-SA) des prescriptions complémentaires applicables au site électronucléaire de Golfech (Tarn-et-Garonne) au vu des conclusions des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) des INB n° 135 et 142*.

Autorité de Sûreté Nucléaire (2013a). *Études probabilistes de sûreté de niveau 1 (EPS 1) relatives aux réacteurs de 1300 MWe dans le cadre de leur troisième réexamen de sûreté (VD1300)*. CODEP- DCN-2013-005093, 4 mars 2013.

Autorité de Sûreté Nucléaire (2013b). *Avis relatif aux accidents graves et aux études probabilistes de niveau 2 (EPS 2) dans le cadre du réexamen de sûreté associé aux troisièmes visites décennales des tranches de 1300 MWe*. Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires, 28 mars 2013.

Autorité de Sûreté Nucléaire (2013c). *Études probabilistes de sûreté de niveau 2 dans le cadre du troisième réexamen de sûreté des réacteurs de 1300 MWe*. CODEP-DCN-2013-038780 - Annexe 2, 22 novembre 2013.

Autorité de Sûreté Nucléaire (2015a). *Réexamen de sûreté associé à la troisième visite décennale des réacteurs (VD3 1300 MWe) – Agressions externes associées aux risques aériens*. CODEP-DCN-2015- 000258, 6 janvier 2015.

Autorité de Sûreté Nucléaire (2015b). *Rapport sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2014*.

Blum M, Eisenbud M (1967). Reduction of thyroid irradiation from ¹³¹I by potassium iodide. *JAMA*, **200** : 1036-1040.

Bøeri G, Wiktorsson C (1988). Emergency planning practices and criteria after the Chernobyl Accident - A critical review. Nuclear energy agency – OCDE. Paris, 160 p.

Brown E, Firestone RB (1986). *Table of Radioactive Isotopes* (Virginia S. Shirley Ed.). John Wiley, 1056 p.

Cardis E *et al.*, Malakhova IV *et al.*, Demidchik EP, Astakhova LN, Ivanov VK *et al.* (1999). Observed and predicted thyroid cancer incidence following the Chernobyl accident. Evidence for factors influencing susceptibility to radiation induced thyroid cancer. In : Thomas G *et al.* (eds.) *Radiation and Thyroid Cancer*, European Commission EUR 18552 EN, ECSC - EC - EAEC, Brussels - Luxembourg, 1999 : 395-405.

Cardis E, Hatch M (2011). The Chernobyl accident – an epidemiological perspective. *Clin Oncol (R Coll Radiol)*, **23** (4) : 251-260.

Cénério G (2008). *Accidents graves des réacteurs à eau de production d'électricité*. IRSN doc.référence, 58 p.

Champion D, Herviou K (2006). Les bases techniques des plans d'urgence relevant des pouvoirs publics. *Contrôle*, **160** : 29-35.

Chenal C, Seisebaev AT, Nurgalieva K, Zhapbasov R, Laurent JF, Brouazin-Jousseau V, Guitton N (2001). Long term effects of chronically exposed rodents to internal and external irradiation in Semipalatinsk nuclear test site. In : *Biological effects of low dose ionizing radiation and radioactive pollution on environment*. Syktivkar, ISBN 5-89606-085-8 : 113.

Chiva I (1980). Perception du risque autour de quelques centrales nucléaires. *Colloque sur les Risques sanitaires des différentes énergies*, Paris 24-26 janvier 1980 : 176-293.

Circulaire DGS/PGE/1B n°1561 du 16 octobre 1989 relative à l'information sur l'administration d'iode stable à la population en cas d'accident nucléaire.

Circulaire interministérielle du 18 août 1992 relative à l'administration d'iode stable en cas d'accident nucléaire.

Circulaire DGS/VS5-int/DSC-SGCISN n° 97-403 du 30 mai 1997 relative à la distribution et mise à disposition d'iode stable aux habitants voisins des installations nucléaires.

Circulaire interministérielle du 10 mars 2000 relative à la révision des plans particuliers d'intervention relatifs aux installations nucléaires de base.

Circulaire interministérielle du 14 novembre 2001 relative à la distribution préventive d'iode stable et à la constitution de stocks de proximité.

Circulaire interministérielle du 11 août 2005 relative à la distribution préventive de comprimés d'iode stable.

Circulaire interministérielle n° DGS/DUS/DSC/2011/64 du 11 juillet 2011 relative au dispositif de stockage et de distribution des comprimés d'iodure de potassium hors des zones couvertes par un plan particulier d'intervention (PPI).

Circulaire interministérielle du 12 décembre 2013. *Instruction interministérielle des exercices d'urgence nucléaire et radiologique*.

Comité scientifique de l'ANCCLI (2014). *Contribution à l'analyse du Dossier de déclaration de modification au titre de l'Article 26 du Décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 relatif aux rejets et aux prélèvements d'eau du site du Bugey et des Projets de décision de l'Autorité de sûreté nucléaire* - Étude réalisée à la demande de la CLIS de Bugey, 27 février 2014, 38 p.

Commissariat à l'énergie atomique (CEA-IPSN) (1990). *Étude probabiliste de sûreté des réacteurs de 900 MWe – EPS 900*.

Commission Européenne (2010). Medical effectiveness of iodine prophylaxis in a nuclear reactor emergency situation and overview of European practices. *Radiation Protection n°165*. Luxembourg, 66p.

Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (1979). Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. *Publication 30 - Part 1*. Oxford, Pergamon Press.

Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (1984). Protection of the Public in the event of Major Radiation Accidents : Principles for Planning. *Publication 40*. Oxford, Pergamon Press.

Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (1992). Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency. *Publication 63*. Oxford, Pergamon Press.

Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Publication 103*. Valentin (ed.). Elsevier.

Décret du 6 mai 1988 relatif aux plans d'urgence.

Direction générale de la santé (1999). *Actions de protection des populations en fonction de l'exposition, en cas d'accident nucléaire*, 9 mars 1999.

Dubrova YE (2003). Long-term genetic effects of radiation exposure. *Mutat Res*, **544** : 433-439.

Dubrova YE (2007). Radiation induced genomic instability in the offspring of irradiated parents. In : Mothersill *et al.* (eds). *Multiple Stressors : A Challenge for the Future*. Springer : 139-154.

Dubrova YE, Plumb M, Brown J, Boulton E, Goodhead D, Jeffreys AJ (2000). Induction of minisatellite mutations in the mouse germline by low-dose chronic exposure to gamma radiation and fission neutrons. *Mutat Res*, **453** : 17-24.

Électricité de France (1985). *Textes du Rapport de sûreté communs à toutes les tranches du palier 1300 MWe* – Édition publique.

Électricité de France (1989). Note d'étude EDF/SEPTEN-ENSIN 88107A, 26 juillet 1989.

Électricité de France (1990). *Étude probabiliste de sûreté des réacteurs de 1300 MWe – EPS 1300*.

Électricité de France – CNPE de Golfech (2000). Communication. Réunion de la Commission technique de la CLI « Protection des populations », 17 novembre 2000.

Électricité de France (2002). Courrier EDF/SEPTEN-ENSN 0200472 à l'Autorité de sûreté nucléaire, 10 juillet 2002.

Électricité de France (2010). *Campagne Iode 2009 – Bilan de la distribution au 31 décembre 2009*.

Électricité de France (2011). *Rapport d'évaluation complémentaire de sûreté des installations nucléaires prioritaires*, 15 septembre 2011.

Électricité de France (2012). *Étude probabiliste de sûreté de niveau 2 des réacteurs de 1300 MWe dans le cadre de leur troisième réexamen de sûreté.*

Électricité de France (2013). Courrier D305913012428 en réponse à la Décision de l'Autorité de sûreté nucléaire fixant à Électricité de France des prescriptions complémentaires applicables au site électro-nucléaire de Saint-Laurent-des-Eaux au vu des conclusions des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) de l' INB n°100, 19 décembre 2013.

Électricité de France (2014). Réponse à la demande de la CLI de Saint-Laurent-des-Eaux dans le cadre de l'expertise indépendante confiée par celle-ci à l'INERIS sur la question du risque hydrogène.

Électricité de France (2015). Courrier PQT/VVR/15-003 à Mr le Président de la Commission locale d'information auprès du CNPE de Golfech, 24 février 2015.

Evans HJ (1987). Cytogenetic damage : threshold effects and sensitivities. *In* : Jones R.R. and Southwood R. (eds.) *Radiation and Health*. John Wiley and Sons Ltd : 179-189.

Faculté de médecine de Grenoble, Ordre des médecins, Conseil Général et Préfecture de l'Isère (1988). *Médecins et Risque nucléaire – Conduite pratique en cas d'accident*, 45 p.

Gazal S (1991). Les niveaux de gravité du plan particulier d'intervention. *Golfech Magazine 3*. Conseil Général de Tarn-et-Garonne, décembre 1991 : 11-14.

Gazal S, Allain N, de Féliquier V, Piquemal L (2008). Risque professionnel, souffrance au travail et stratégies de faire face selon le genre chez le personnel infirmier en service de psychiatrie. *Congrès National de la Société Française de Psychologie*. Bordeaux, 10-12 septembre 2008.

Gazal S, Amiard JC (2010). *Le Tritium – Actualité d'aujourd'hui et de demain*, Lavoisier, 2010, 146 p.

Gauvin J (1992). Assessment and limitation of radioactivity transfers in the event of a postulated severe PWR accident. CEA/IPSN/DPEI/SEAC. *In* : *Training in management and analysis of severe accidents. IAEA technical cooperation program*. Budapest, 13-24 janvier 1992, 56 p.

Ginot P (1994). Organisation opérationnelle en cas d'urgence nucléaire ou radiologique – *Techniques de l'ingénieur Ed.*, B3870, 17 p.

Groupement de scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire (GSIEN) (2004). *Rapport sur la visite décennale n°1 du réacteur 2 du CNPE de Golfech*, décembre 2004. Étude réalisée à la demande de la Commission locale d'information auprès du CNPE de Golfech.

Guétat P, Armand P, Monfort M, Fritsch P, Flury-Herard A, Ménétrier F *et al.* (2004). *Iodes Radioactifs et impacts environnemental et sanitaire – Étude bibliographique et quantification*. Rapport R-6065. CEA-IPSN.

Hardeman F (2006-2007). *Évaluation des risques de rejets radioactifs dans l'environnement et modélisation – Phénoménologie des accidents, dispersion dans l'environnement, enfouissement de déchets solides*. SCK-CEN.

Heads of the European radiological protection competent authorities (HERCA), Nuclear regulators' association (WENRA) (2014). Nouvelle approche européenne en matière de préparation aux situations d'urgence. *Communiqué de presse*. Paris, 26 novembre 2014.

Institut national d'évaluation des risques industriels (INERIS) (2014). *Avis sur la gestion de la sécurité hydrogène au CNPE de Saint-Laurent-des-Eaux en situations normale et accidentelle*. Rapport d'étude n° RDA-14-135658-00136B réalisé à la demande de la CLI de Saint-Laurent-des-Eaux, 24 mars 2014.

Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN), *Présentation de Situations Accidentelles Susceptibles d'affecter un REP*, document non daté communiqué par la DSIN aux présidents de CLI le 27 mars 2000. In : Gazal (2002). *Projet de révision du plan particulier d'intervention du centre nucléaire de production d'électricité de Golfech – Observations de la Commission locale d'information auprès du CNPE de Golfech*, janvier 2002.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2009a). *Radioprotection : Radionucléides* - Fiche Iode-131. ED4300.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2009b). *Avis de l'IRSN sur le projet de décision concernant le niveau d'intervention relatif à l'administration d'iode stable en situation d'urgence radiologique*, 20 mai 2009.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2011a). *Le risque associé à l'hydrogène dans les enceintes de confinement des réacteurs du parc nucléaire français*. Note d'information technique, juillet 2011.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2011b). *Évaluations complémentaires de sûreté post-Fukushima : installations nucléaires françaises en cas de situations extrêmes et pertinence des propositions d'amélioration*. Rapport IRSN n° 679 Tomes 1 et 2, novembre 2011.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2012a). *Bilan des conséquences de l'accident de Fukushima sur l'environnement au Japon, un an après l'accident*, 28 février 2012.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2012b). *Synthèse du rapport de l'IRSN sur les études probabilistes de sûreté de niveau 1 développées par EDF dans le cadre du réexamen de sûreté associé à la troisième visite décennale des réacteurs de 1300 MWe*, 10 mai 2012.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2013a). *Analyse de l'étude probabiliste de sûreté de niveau 2 des réacteurs de 1300 MWe dans le cadre de leur troisième réexamen de sûreté*, 23 janvier 2013.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2013b). *REP - Réexamen de sûreté VD - 1300 MWe - Évaluation des études de sûreté relatives au risque aérien*, 30 juillet 2013.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2014a). *Instruction des études associées au réexamen de sûreté VD3 1300 MWe – Analyse de la suffisance des études de sûreté et des modifications relatives au thème FBK1 « Études de risques pour la piscine BK »*, 9 avril 2014.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2014b).

http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Organisation/Programmes/projet-Priodac/Pages/projet_Priodac.aspx#_VbFVJEtZVc8

Jacquemain D (coord.) (2013). *Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance – État des connaissances*. IRSN-EDP-Sciences, 445 p.

Johnson AE (1963). The rate of return of radioiodine uptake by the normal thyroid after suppression by pharmacological doses of stable iodide. *Health Phys*, **9** : 537-538.

Kneale GW, Stewart AM, Mancuso TF (1978). Re-analysis of data relating to the Hanford study of the cancer risks of radiation workers. I.A.E.A Symposium *Late effects of ionizing radiation*-SM-224/510 : 387-412.

Koutras D, Livadas D (1966). The minimum dose of potassium iodide which inhibits the thyroidal radioiodine uptake. *Nucl Med*, **5** : 256-261.

Lanore JM (2003). Les principaux résultats des EPS pour les réacteurs français. *Contrôle* **155** : 48-57.

Le Guen B, Polak M, Schlumberger M (2007). Accidents nucléaires : Distribuer l'iode pour prévenir les cancers de la thyroïde. *Le Concours Médical*, **33-34** : 1141-1146.

Le Guen B, Schlumberger M (2012). *Iode et accident nucléaire : de la protection de la thyroïde par l'iode stable à l'évaluation dosimétrique rapide* - Annexe 4.

http://www.bibsciences.org/bibsup/acad-sc/common/articles/annexes-fukushima/annexe3_4.pdf (dernier accès 03/01/2016).

Lemarchand F, Grandazzi G, Bocéno L, Lalo A, Glatron S, Dupont Y (2003). *De l'information du public à la gestion concertée des risques : construction sociale et territoriale du risque nucléaire dans le Nord-Cotentin* – Rapport au ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement dans le cadre du Programme de recherche « Évaluation et Prise en compte du Risque technologique (EPR) », 297 p.

Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA *et al.* (2015). Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS) : an international cohort study. *The Lancet Haematology*, **2** (7) : 276-281.

Libman J (1993). *Approche et analyse de la sûreté des réacteurs à eau sous pression*. INSTN-CEA, 205 p.

Lima ML (2004). On the influence of risk perception on mental health : living near an incinerator. *Journal of Environ Psychol*, **24** : 71-84.

Little JB (2002). Radiation-induced genomic instability and bystander effects : implications for radiation protection. *Radioprotection*, **37** : 251-282.

Little JB (2006). Lauriston S. Taylor lecture : Non targeted effects of radiation - Implication for low-dose exposures. *Health Phys*, **91** (5) : 416-426.

Loi du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs, au titre de la préparation et de l'organisation des secours en cas d'urgence.

MacLachlan A (2003). France EDF has cut probability of core damage in 900 MW, 1300 MW units. *INSIDE NRC*. Vol. 25 n°4.

Malarbet JL, Aurengo A, Roy M, Le Guen B, Devillers C, Métivier H (1998). Coefficients de dose après incorporation de l'iode 129 - Influence de l'apport alimentaire. *Radioprotection*, **33** (1) : 15-33.

Mancuso TF, Stewart AM, Kneale GW (1977). Hanford 1 : Radiation Exposures of Hanford workers dying from cancer and other causes . *Health Phys*. **33** (369). In : Gazal S (coord.) (1989). *Actes du Colloque « Nucléaire : Santé-Sécurité »*. Montauban, 21-23 janvier 1988, 517 p. : 213-221.

Marchand C (1997). *Production d'iodures organiques à partir des surfaces peintes de l'enceinte de confinement d'un réacteur à eau pressurisée en situation accidentelle*. Thèse - Université Paris XI-Orsay.

Mothersill C, Seymour C (2005). Radiation-induced bystander effects : Relevance for radiation protection of human and non-human biota. *Radioprotection*, **40** (3) : 297-306.

Nauman J, Wolff J (1993). Iodide prophylaxis in Poland after the Tchernobyl reactor accidents : benefits and risks. *Amer J Med*, **94** : 524-532.

Nuclear Energy Agency (NEA) (2002). *Tchernobyl : évaluation des incidences biologiques et sanitaires*. Chapitre 2. Tableau 1.

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPSECT). *Rapport sur les conséquences de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl et sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires*. Première session ordinaire de 1987-1988.

Organisation mondiale de la santé (OMS) (1999). *Guidelines for Iodine Prophylaxis following Nuclear Accidents*, Update 1999.

Organisation mondiale de la santé (OMS) (2011). Use of Potassium Iodide for Thyroid Protection during Nuclear or Radiological Emergencies www.who.int/ionizing_radiation/pub_meet/tech_briefings/potassium_iodide/en/index.html

Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL, Vaeth M, Mabuchi K (1996). Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12. Part 1 Cancer :1950-1990. *Radiat Res*, **146** (1) :1-27.

Pohl-Rüling J (1990). Chromosome Aberrations of Blood Lymphocytes Induced by Low-level Doses of Ionizing Radiation. In (Obe G Ed) *Advances in Mutagenesis Research 2*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg : 156-190.

Préfectures du Tarn-et-Garonne, du Lot-et-Garonne et du Gers (2014). *Plan particulier d'intervention – Centre nucléaire de production d'électricité de Golfech*. Version Projet, juillet 2014.

Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K (2003). Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13 : solid cancer and non-cancer disease mortality 1950-1997. *Radiat Res*, **160** : 381-407.

Radford EP (1986). Recent evidence of radiation induced cancer in the Japanese atomic bomb survivors. *Conférence de Londres sur les rayonnements ionisants*, Londres, 26 novembre 1986. In : Gazal S (coord.) (1989). *Actes du Colloque « Nucléaire : Santé-Sécurité »*. Montauban, 21-23 janvier 1988, 517 p. : 213-221.

Ramsden D, Passant FH, Peabody CO, Speight RG (1967). Radioiodine uptakes in the thyroid - Studies of the blocking and subsequent recovery of the gland following the administration of stable iodine. *Health Phys*, **13** : 633-646.

Rasmussen N et al. (1975). *Reactor safety study*. Wash-1400. Washington DC, US NRC.

Règle fondamentale de sûreté (1980). *Prise en compte des risques liés aux chutes d'avion*. Règle fondamentale de sûreté I-2-a, 5 août 1980.

Règlement Euratom n° 2218-89 du Conseil du 18 juillet 1989 modifiant le règlement n° 3954/87 fixant les niveaux maximaux admissibles de contamination radioactive pour les denrées alimentaires et les aliments pour bétail après un accident nucléaire ou toute autre situation d'urgence radiologique.

Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, Hamra GB *et al.* (2015). Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation : retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom and the United States (INWORKS). *BMJ*, **351** : h5359.

Rothkamm K, Löbrich M, Richardson DB, *etc* (2003). Evidence for a lack of DNA double-strand break repair in human cells exposed to very low X-ray doses. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, **100** (9) : 5057-5062.

Saintigny Y, Roche S, Meynard D, Lopez BS (2008). Homologous recombination is involved in the Repair response of Mammalian Cells to Low Doses of Tritium. *Radiat Res*, **170** (2) : 172-183.

Schlumberger M 1994). Cancers de la thyroïde après Tchernobyl – Importance de la prophylaxie par le KI. *Radioprotection*, **29** (3) : 397-404.

Schlumberger M, Chevillard S, Ory K, Dupuy C, Le Guen B, de Vathaire F (2011). Cancer de la thyroïde après exposition aux rayonnements ionisants. *Cancer Radiother*, 2011. doi:10.1016/j.canrad.2011.05.002.

Schlumberger M, Parmentier N, Chavaudra J, Parmentier C, Tubiana M (1987). Mise au point : conduite à tenir en cas de contamination par les radio-isotopes de l'iode. *La Revue du Praticien*, **37** (40) : 2449-2455.

Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale (SDGSN) (2014). *Plan national de réponse – Accident nucléaire ou radiologique majeur*. 200/SGDSN/PSE/PSN. Février 2014, 117 p.

Tanguy P (1989). La maîtrise des risques nucléaires. In : Gazal S (coord.) (1989) *Actes du Colloque « Nucléaire : Santé-Sécurité »*. Montauban 21-23 janvier 1988, 517 p. : 425-433 et débat.

Tanguy P (1990). *Sûreté Nucléaire 1989* - Rapport de l'Inspecteur Général.

Tns/Sofres – ASN (2009). *Pré-étude Iode*. Rapport d'étude, décembre 2009.

Tubiana M (1982). Métabolisme et radiotoxicité des radionucléides – Métabolisme et radiotoxicité de l'iode radioactif. In : Galle P (coord.) *Toxiques nucléaires* : 53-77.

United nations scientific committee on the effect of atomic radiation (UNSCEAR) (2006). *Effects of ionizing radiation*. Report to the General assembly with Scientific annexes. Vol.1, United nations, New York, 383 p.

United nations scientific committee on the effect of atomic radiation (UNSCEAR) (2008). *Effects of atomic radiation : Radiation exposures in accidents*. Vienna.

Valeix P (2002). L'iode dans l'alimentation. In : Institut français de la nutrition (IFN). *Dossier scientifique sur l'iode*. **13** : 11-46.

Verger P (2002). Iode et risque nucléaire. In : Institut français de la nutrition (IFN). *Dossier scientifique sur l'iode*. **13** : 85-98.

Verger P, Aurengo A, Geoffroy B, Le Guen B (2001). Iodine kinetics and effectiveness of stable iodine prophylaxis after intake of radioactive iodine : a review. *Thyroid*, **11** : 353-360.

Verger P, Piechowski J (2000). Maintien de la protection thyroïdienne par l'iode stable chez l'adulte en cas d'exposition prolongée. *Radioprotection*, **35** (2) : 246-247.

Vidal (2014). *Le Dictionnaire*.

Volatier JL (2000). Enquête INCA individuelle et nationale sur les consommations alimentaires. CREDOC, AFSSA, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Tec & Doc, Paris, 158 p., cité par AFSSA (2005). *Évaluation de l'impact nutritionnel de l'introduction de composés iodés dans les produits agroalimentaires*.

Wambersie A, Smeesters P, Alexandre L, Jamar F (2008). Iode radioactif et comprimés d'iode (à propos de l'incident de l'IRE). *Louvain Med*, **127** (8) : 323-333.

Zablotska LB, Ron E, Rozhko AV, Hatch M, Polyanskaya ON, Brenner A *et al.* (2011). Risk of thyroid cancer after exposure to I-131 in childhood. *Br J Cancer*, **104** (1) : 181-187.

Zaka R, Chenal C, Misset MT. (2002). Study of external low irradiation dose effects on induction of chromosome aberrations in *Pisum sativum* root tip meristem. *Mutat Res*, **517** : 87-99.

Zanconino PB, Becker DV (1993). Use of potassium iodide to minimize thyroid radiation from radioactive fall-out. In : *Iodine deficiency in Europe* (F. Demange et al. Eds). Plenum Press, New York.

Zanconino PB, Becker DV (2000). Effects of time of administration and dietary iodine levels on potassium iodide (KI) blockade of thyroid irradiation by I-131 from radioactive fall-out. *Health Phys*, **78** : 660-667.

Zvonova IA (1989). Dietary intake of stable I and some aspects of radioiodine dosimetry. *Health Phys*, **57** : 471-475.



ANNEXES

Échelle INES de classement des incidents et accidents nucléaires

Description et niveau INES	Population et environnement	Barrières et contrôles radiologiques dans les installations	Défense en profondeur
7 ACCIDENT MAJEUR	Rejet majeur de matières radioactives avec des effets considérables sur la santé et l'environnement exigeant la mise en œuvre de contre-mesures prévues, voire plus.		
6 ACCIDENT GRAVE	Rejet important de matières radioactives exigeant probablement la mise en œuvre des contre-mesures prévues.		
5 ACCIDENT AYANT DES CONSÉQUENCES ÉTENDUES	Rejet limité de matières radioactives exigeant probablement la mise en œuvre de certaines des contre-mesures prévues - Plusieurs décès radio-induits.	Endommagement grave du cœur du réacteur - Rejet de grandes quantités de matières radioactives dans l'installation avec une probabilité élevée d'exposition importante du public. Ceci pourrait résulter d'un accident de criticité ou d'un incendie majeur.	
4 ACCIDENT AYANT DES CONSÉQUENCES LOCALES	Rejet mineur de matières radioactives n'exigeant probablement pas la mise en œuvre de contre-mesures prévues autres que la surveillance des aliments locaux - Au moins un décès radio-induit.	Fusion ou endommagement du combustible provoquant le rejet de plus de 0,1% de la radioactivité du cœur - Rejet de quantités importantes de matières radioactives dans l'installation avec une probabilité élevée d'exposition importante du public.	
3 INCIDENT GRAVE	Exposition dépassant dix fois la limite annuelle réglementaire pour les travailleurs - Effets sanitaires déterministes non létaux (brûlures, par exemple) radio-induits.	Débits d'exposition de plus de 1 Sv/h dans une zone de travail - Contamination grave d'une zone censée ne pas être contaminée de par sa conception, avec une faible probabilité d'exposition importante du public.	Accident évité de peu dans une centrale nucléaire avec défaillance de toutes les dispositions en matière de sûreté - Perte ou vol de sources scellées de haute activité - Erreur de livraison d'une source scellée de haute activité, sans procédures adéquates pour y faire face.
2 INCIDENT	Exposition d'un membre du public dépassant 10 mSv - Exposition d'un travailleur dépassant les limites annuelles réglementaires.	Intensité de rayonnement dans une zone de travail dépassant 50 mSv/h - Contamination importante dans une zone d'une installation censée ne pas être contaminée de par sa conception.	Défaillances importantes des dispositions en matière de sûreté, sans conséquences réelles - Découverte d'une source scellée orpheline, d'un appareil ou d'un colis de haute activité sans défaillance des dispositions en matière de sûreté - Emballage incorrect d'une source scellée de haute activité.
1 ANOMALIE			Surexposition d'un membre du public dépassant les limite annuelles réglementaires - Problèmes mineurs liés aux composants de sûreté, avec maintien d'une solide défense en profondeur - Perte ou vol d'une source, d'un appareil ou d'un colis de faible activité.
0 ÉCART		Aucune importance du point de vue de la sûreté.	

L'évaluation des doses efficaces (engagées)⁷⁰

Les doses efficaces (engagées) sont calculées en trois étapes :

- détermination de la dose absorbée, c'est-à-dire de l'énergie moyenne reçue par le corps entier et/ou par un (ou plusieurs) organe(s) et/ou tissu(s) du fait de l'exposition, exprimée en gray (Gy) ; cette dose absorbée est donnée par une mesure (pour l'irradiation externe) ou résulte d'une évaluation (pour la contamination interne) ;
- application à la dose absorbée d'un coefficient de pondération W_r , caractéristique du (ou des) type(s) de rayonnement impliqué(s) et, pour les protons et les neutrons, de leur énergie ; on obtient la dose équivalente (pour l'irradiation externe) ou la dose équivalente engagée (pour la contamination interne), qui intègre la dose qui aura été délivrée aux organes et/ou aux tissus durant la totalité de leur temps de séjour dans l'organisme. Elle est exprimée en sievert ;
- application à la dose équivalente (engagée) d'un facteur de pondération tissulaire W_t , qui tient compte de la radiosensibilité différentielle des tissus et organes exposés rapportée à une exposition du corps entier. On obtient la dose efficace (engagée) reçue par le sujet exposé. Ainsi, on considère aujourd'hui qu'une exposition de la glande thyroïde est équivalente, en termes d'effets sanitaires, à 4% de l'effet que produirait une même dose reçue de manière uniforme par le corps entier ($W_t = 0,04$)⁷¹.

De nombreux paramètres ne sont pas à ce jour pris en compte dans l'établissement de la dose efficace (engagée) (sensibilité individuelle, interactions avec d'autres polluants...).

On dispose aujourd'hui⁷² de coefficients qui permettent, à partir d'une activité incorporée donnée d'un radionucléide (exprimée en becquerel) de calculer la dose efficace engagée. Ce sont les *coefficients de dose*, qui donnent la dose efficace engagée par unité d'incorporation (= par becquerel incorporé) (DPUI). Ces coefficients varient selon les radionucléides (par exemple de l'iode 131 ou du césium 137), et tiennent compte de la forme physico-chimique du radionucléide et de l'âge des sujets exposés.

La Commission internationale de protection radiologique considère qu'une incertitude est associée à l'évaluation de ces coefficients de dose⁷³.

70- La somme dose efficace + dose efficace engagée est habituellement désignée par l'expression *dose efficace totale* ou simplement *dose efficace*.

71- Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (2007). Recommandations de la Commission internationale de protection radiologique. *Publication 103* (trad. IRSN). Lavoisier, 415 p., chap. 4.3.4 (128).

72- Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants - Annexe III.

73- Selon certains auteurs, cette incertitude serait pour le tritium deux fois plus élevée - voire encore beaucoup plus - que celle qui est retenue par la CIPR (Gazal et Amiard, 2010, chap.6.2.3.5).

Caractérisation des rejets des niveaux 2 et 3 du PUI du CNPE de Golfech en 1993

Type de rejets			Rejets pouvant caractériser les accidents de niveau		Réglementation* pour	
			2	3	1 tranche	2 tranches
G A Z E U X	Gaz	Gaz rares	< 925 téraBecquerels (25.000 curies)	> 925 téraBecquerels (25.000 curies)	825 téraBecquerels (22.500 curies)	1650 téraBecquerels (45.000 curies)
		Autres				
		Halogènes et Aérosols (dont iode, césium...)	< 74 gigaBecquerels (2 curies)	> 74 gigaBecquerels (2 curies)	27,5 gigaBecquerels (0,75 curie)	55 gigaBecquerels (1,5 curie)
L I Q U I D E S	Tous rejets		< 740 gigaBecquerels (20 curies)	> 740 gigaBecquerels (20 curies)	550 gigaBecquerels (15 curies)	1100 gigaBecquerels (30 curies)
	Hors tritium		> 148 gigaBecquerels (4 curies)			

(SOURCE : GAZAL, 1991)

*1 becquerel = une désintégration d'un radionucléide par seconde

1 gigaBecquerel = un milliard de becquerels

1 téraBecquerel = mille milliards de becquerels

Niveaux d'intervention Recommandations de la Commission internationale de protection radiologique – CIPR 40 (1984) et CIPR 63 (1992)

Contre-mesure (et type de dose à considérer)	Niveau d'intervention		
	Nouvelle CIPR		CIPR 40 (mSv)
	Niveau optimisé (mSv)	Niveau justifié (mSv)	
Confinement (dose effective ou dose extrême pour CIPR 40)	≥ 5	50	5 à 50
Tablettes d'iode stable (dose à la thyroïde)	≥ 50	500	50 à 500
Évacuation - dose projetée à l'organisme entier en 1 jour		500	
- Dose effective évitée	Quelques dizaines à quelques centaines	500	50 à 500
- Dose à la peau		5 000	
- Dose à un organe			50 à 500
Relogement - Dose effective		1 000	50 à 500
- Débit de dose : dépôt/mois	10		
Restrictions de consommation (dose effective/an)		10	5 à 50

(SOURCE : GINOT, 1994)

Estimation du risque radiologique après exposition à de faibles doses et faibles débits de dose

On considère habituellement que les effets sanitaires des rayonnements ionisants sont de deux ordres : les effets déterministes et les effets aléatoires.

Les effets *déterministes* présentent les caractéristiques suivantes :

- les dommages sont présents chez tous les sujets exposés (avec d'éventuelles variations individuelles de sensibilité) ;
- la gravité de l'effet augmente avec la dose reçue ;
- ils apparaissent au-delà d'un certain seuil.

Concernant les effets *aléatoires*,

- ils apparaissent chez certains sujets exposés mais pas chez tous ;
- leur probabilité d'apparition augmente avec la dose reçue, mais non leur gravité ;
- ils sont réputés sans seuil (absence probable d'un seuil en-dessous duquel ces effets n'apparaissent pas).

Les effets déterministes peuvent concerner tous les organes exposés. Ils peuvent affecter différents tissus (cutané, oculaire...) et différentes fonctions (cognitives, reproductive, hématopoïétique, respiratoire...). Ils peuvent engager le pronostic vital (doses aiguës). Ils sont immédiats ou différés.

Les effets aléatoires concernent le sujet exposé ou sa descendance. Ce sont des effets différés.

Les effets sanitaires susceptibles d'apparaître aux niveaux d'intervention sont les effets aléatoires (niveaux d'intervention inférieurs aux seuils d'apparition des effets déterministes).

La CIPR a proposé en 2007 une nouvelle estimation du risque après exposition du corps entier à faible débit de dose (en termes de cancers, d'effets héréditaires et de détriment total, par sievert reçu⁷⁴) (tableau 1).

Tableau 1 - Estimation du risque après exposition du corps entier à de faibles doses et faibles débits de dose (par sievert reçu)

Population exposée \ Effet aléatoire	Cancers	Effets héréditaires	Détriment total
<u>Public</u>	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$0,2 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$
<u>Travailleurs</u>	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$

74- Le détriment total est constitué pour les cancers par la probabilité de développer un cancer (mortel et non mortel) pondérée par un coefficient représentatif du préjudice subi, et pour les effets héréditaires par la probabilité de voir apparaître un effet héréditaire dans les deux générations suivant l'exposition.

Sur les effets aléatoires actuellement retenus par la communauté internationale

Les effets aléatoires actuellement retenus par la communauté internationale sont les cancers, et les effets héréditaires susceptibles d'apparaître sur les deux premières générations. Cette définition des effets aléatoires est considérée comme trop restrictive dans de nombreuses études.

En effet, une augmentation dose-dépendante de pathologies thyroïdiennes, digestives, respiratoires, cardiaques et/ou circulatoires non cancéreuses a été mise en évidence ou fortement suggérée chez les populations humaines soumises à des essais, à des bombardements⁷⁵ ou à des catastrophes nucléaires. De même, certaines études animales ont mis en évidence des effets non cancéreux, sans seuil et dose-dépendants, caractéristiques des effets aléatoires. La CIPR 103 (2007) considère cependant que les données disponibles sont insuffisantes pour être intégrées à l'évaluation des effets sanitaires des faibles doses de rayonnement⁷⁶.

Concernant les effets héréditaires radio-induits, la CIPR 103 ne retient que les effets sur les deux premières générations, ce qui pour plusieurs raisons pose problème (maladies héréditaires se manifestant après plus de deux générations, difficulté du diagnostic, effets difficilement prédictibles, inconnues sur les effets d'une contamination interne).

Enfin, l'existence des effets dits « non ciblés » n'est pas intégrée à l'évaluation dose-effet. Ainsi, l'effet de voisinage (modifications induites dans des cellules non irradiées situées au voisinage des cellules irradiées : mutations, réduction de la survie, activation de certains oncogènes...) et l'instabilité génomique transmissible (survenue d'altérations biologiques telles que remaniements chromosomiques, mutations, réduction de la survie cellulaire après plusieurs divisions successives de la cellule irradiée ou d'une cellule située dans le voisinage de celle-ci) ne sont pas pris en compte (Gazal et Amiard, 2010 ; **Annexe 7**). L'éventuelle existence d'une réponse adaptative n'est pas non plus intégrée à cette évaluation. La CIPR 103 (2007) estime que ces effets peuvent être négligés (prise en compte implicite dans les études épidémiologiques, absence de preuves tangibles).

75- Notamment Preston *et al.* (2003).

76- La CIPR reconnaît que des retards mentaux peuvent être causés par l'irradiation *in utero* pour lesquels, bien qu'il s'agisse d'un effet déterministe et non d'un effet aléatoire, le principe de l'absence d'un seuil n'est pas exclu.

La question des « faibles doses »

Cette question comporte plusieurs aspects :

- la dose absorbée (l'énergie déposée) ;
- le débit de dose⁷⁷ (exposition aiguë ou exposition prolongée) ;
- l'énergie du rayonnement (et donc le coefficient de pondération W_r) ;

et par conséquent *in fine* la dose efficace (exprimée en sievert) (cf. [annexe 2](#)).

1- Dose absorbée, débit de dose - Effet biologique, effet clinique⁷⁸

Il n'existe pas de définition des notions de faible, moyenne ou forte dose. Les critères retenus sont plutôt à rechercher... dans les niveaux de dose auxquels des effets biologiques et/ou des symptômes cliniques ont pu être observés ou mis en évidence par des études épidémiologiques, dans le niveau de radioactivité naturelle ou dans les niveaux d'exposition associés à certaines pratiques socialement acceptées⁷⁹. La question de pose de la même manière pour le débit de dose.

Une tendance est de considérer une exposition supérieure à 100-200 millisieverts (mSv) comme une exposition à une forte dose, une exposition de l'ordre de plusieurs millisieverts à plusieurs dizaines de millisieverts comme faible et une exposition de l'ordre de quelques millisieverts comme très faible. Les expositions à des doses supérieures à 3 ou 4 sieverts sont très élevées, leurs effets aigus et en général létaux.

Relativement peu d'études épidémiologiques ont montré des effets cliniques ou biologiques pour des **doses absorbées** inférieures à 100 milligrays (mGy). Néanmoins, des études réalisées par exemple sur des populations de travailleurs exposés à des rayonnements ionisants (gamma principalement) à des doses inférieures à 50 milligrays font apparaître une augmentation dose-dépendante des *anomalies chromosomiques* (Evans, 1987) et des *cancers* (Mancuso *et al.*, 1977 ; Kneale *et al.*, 1978). Plus récemment, Leuraud *et al.*, (2015) montrent que le risque de décès par *leucémie*, notamment par leucémie myéloïde chronique, chez les travailleurs exposés tout au long de leur carrière à de faibles doses de rayonnement, augmente linéairement avec la dose reçue. Il en est de même pour les cancers solides (Richardson *et al.*, 2015). Des études réalisées auprès des survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki ont également montré une augmentation dose-dépendante des *cancers solides* (Radford, 1986) et des *leucémies* (Pierce *et al.*, 1996). Plusieurs études conduites sur des populations (animales, humaines) exposées aux retombées de la catastrophe de Tchernobyl concluent à une augmentation de la fréquence des *mutations dans les cellules germinales* pour des doses faibles reçues de manière chronique (Dubrova *et al.*, 2000 ; Dubrova, 2003), à des corrélations entre *divers dommages* et une exposition à de faibles doses de contamination interne, ou à des *malformations congénitales* et diverses *pathologies* chez les descendants de première génération issus de parents irradiés.

Si ces études accréditent l'hypothèse d'une absence de seuil, certaines d'entre elles suggèrent également que l'effet serait renforcé aux doses les plus faibles et que la relation serait de type supra-linéaire et non de type linéaire comme le considère la CIPR.

Par ailleurs, des études ont par exemple été réalisées sur les cellules sanguines de populations exposées à des doses de rayonnement continues (d'origine environnementale) ou fractionnées (d'origine professionnelle) (Pohl-Rüling, 1990), sur des cellules de la moelle osseuse de rongeurs du site d'essais nucléaires de Semipalatinsk (Chenal *et al.*, 2001), ou sur des cellules d'organismes végétaux (Zaka *et al.*, 2002), des cellules de rongeurs (Saintigny *et al.*, 2008), des cellules sanguines ou des fibroblastes humains (Pohl-Rüling, 1990 ; Rothkamm et Löbrich, 2003) exposés expérimentalement à divers radionucléides ou à divers types de rayonnement. Ces études font apparaître que le facteur d'efficacité des *très faibles doses de rayonnement* serait pour certains types de rayonnements, certains types de matrices et certains types d'effets encore beaucoup plus important que celui des faibles doses.

De manière plus générale, cette question a été étudiée dans le cadre des travaux relatifs à l'*instabilité génomique transmissible*, à l'*effet de voisinage* et à la *réponse adaptative* menés *in vivo* et *in vitro*⁸⁰ (Little, 2002, 2006 ; Mothersill et Seymour, 2005 ; Dubrova, 2007).

L'ensemble de ces études concernent des **expositions chroniques à de (très) faibles doses d'irradiation externe et/ou de contamination interne à faible débit de dose.**

Or les instances internationales ont retenu le principe d'un facteur d'efficacité deux fois plus important, à dose totale équivalente, pour une exposition à forte dose et fort débit de dose, qu'à faible dose et faible débit de dose (facteur d'efficacité de la dose et du débit de dose « DDREF » = 2).

Les observations mentionnées plus haut seraient de nature à *entraîner une redéfinition de la relation dose-effet aux faibles doses et faibles débits de dose.* Cette question doit de toute évidence faire l'objet de recherches approfondies, notamment chez l'homme.

2- Énergie du rayonnement et effet biologique (Gazal et Amiard, 2010)

L'évaluation des dommages induits par un radionucléide peut se faire par comparaison avec les dommages induits par une dose identique d'un radionucléide ou d'un rayonnement de référence (en général rayons X ou gamma du césium 137 ou du cobalt 60). Cette mise en perspective donnera son efficacité biologique relative (EBR). Or la *cytotoxicité* des rayonnements X ou gamma chez l'homme *in vitro* serait significativement plus importante à faible énergie qu'à énergie plus importante. Ainsi, les rayons X de 20 keV sont plus « efficaces » que les rayons X de 200 keV, eux-mêmes plus efficaces que les rayonnements gamma de 1173 keV et 1333 keV du cobalt 60. De même, à partir de modèles mathématiques comme la méthode dite de Monte-Carlo, qui permettent de suivre les dépôts d'énergie dans la matière en fonction du spectre d'émission des électrons, et en utilisant un ADN modélisé, il apparaît que l'iode 125 (énergie moyenne émise en rayonnement gamma : 42 keV) produit beaucoup plus de cassures de brins d'ADN que l'iode 123 (énergie moyenne émise en rayonnement gamma : 173 keV)⁸¹.

Pour ce qui est de l'eau tritiée, son *impact sur la cellule* a fait l'objet de nombreuses études *in vivo* (animal) ou *in vitro* (animal, homme) : conversion de gènes chez des levures, survie cellulaire, micronoyaux, mutations ou transformation cellulaire chez la souris, aberrations chromosomiques chez les poissons, la souris ou dans les cellules humaines. Il a été constaté que l'irradiation due à l'eau tritiée est plus « efficace », en matière de cassures doubles brins, que celle due au césium 137. Or le tritium est un émetteur de rayonnement bêta de faible énergie (inférieure à 18,6 keV), très inférieure à l'énergie moyenne de désintégration du césium 137 en rayonnement gamma (566 keV).

Des constatations analogues ont été faites concernant l'induction de *cancers* chez l'animal. Selon divers auteurs, l'EBR du tritium administré sous forme d'eau tritiée à faible dose et faible débit de dose serait 1 à 5 fois plus élevée que celle des rayons gamma et 1,1 à 2,5 fois plus élevée que celle des rayons X délivrés de manière chronique.

Tous effets délétères confondus, l'EBR du tritium serait de l'ordre de 1 à 3 pour les rayons gamma et de 1 à 1,5 pour les rayons X (CIPR 103, 2007).

Pour ce qui est du tritium, il convient en outre d'ajouter que les énergies des rayons gamma utilisés pour la détermination expérimentale de l'EBR du tritium sont plus faibles que celles qui ont été délivrées à Hiroshima et Nagasaki, ce qui contribue à minimiser encore plus l'efficacité réelle de l'eau tritiée⁸².

À dose absorbée identique, **la toxicité d'un rayonnement serait donc plus importante à de faibles énergies qu'à des énergies plus importantes** : il serait plus « efficace » qu'un rayonnement de plus forte énergie, et cela serait particulièrement vrai pour les expositions à de faibles doses et faibles débits de dose.



77- Débit de dose : l'énergie absorbée par unité de temps. L'unité légale est le gray par seconde (Gy/s).

78- Adapté de Comité scientifique de l'ANCCLI (2014).

79- Souvent d'ailleurs en toute méconnaissance de cause (cf. les examens radiologiques ou le transport aérien).

80- Cf. annexe 6.

81- La désintégration des iodures 123 et 125 s'accompagne majoritairement de l'émission de rayonnements gamma de 32 ± 4 keV (rendement de fission total = 87% et 147 % respectivement), ainsi que pour l'iode 123 d'un rayonnement gamma de 159 keV (rendement de fission = 83%).

82- Cf. Gazal et Amiard, déjà cité, chap. 6.2.3 et 6.2.3.4.

Ces observations sont de nature à *modifier les coefficients de pondération W_r* , notamment pour les rayonnements X et gamma, pour lesquels ils sont considérés comme identiques et égaux à 1 par la communauté internationale. La valeur de ce coefficient W_r devrait en outre être une fonction inverse de la dose et du débit de dose.

3- En conclusion

L'ensemble des observations ci-dessus ne peut que conduire à s'interroger sur le bien-fondé des modèles actuellement utilisés pour évaluer la dose efficace engagée par une exposition aux rayonnements ionisants – notamment à de faibles doses et faibles débits de dose.

Il est au demeurant admis par la communauté internationale que l'évaluation des coefficients de dose est associée à une incertitude, selon certains auteurs particulièrement importante. Le débat sur l'effet des « faibles doses » ne contribue pas à réduire cette incertitude.

Cette question est d'autant plus pertinente que les niveaux d'intervention définis dans les PPI pour mettre en place des mesures de protection des populations se situent dans la gamme dite des faibles doses, et que la désintégration de certains isotopes tels que les iodes 131 et 129 s'accompagne d'un rayonnement gamma de faible et de très faible énergie.

Les niveaux d'intervention recommandés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour l'administration d'iode stable

Le niveau d'intervention recommandé par l'OMS (1999) pour l'administration d'iode stable est de 100 millisieverts pour l'*adulte entre 18 et 40 ans*. Il est dix fois moins élevé pour les *enfants* et les *adolescents* de moins de 19 ans, ainsi que pour les *femmes enceintes et allaitantes*, soit 10 millisieverts⁸³.

Le niveau d'intervention recommandé pour l'*adulte de plus de 40 ans* est de 5 sieverts⁸⁴. Cette recommandation se justifie par la plus grande sensibilité de cette tranche d'âge aux effets secondaires graves de la prise d'iode stable et par sa moindre sensibilité aux effets carcinogènes de l'iode radioactif. Le niveau de 5 sieverts est en lien avec le seuil des effets déterministes se manifestant par une hypothyroïdie. Néanmoins, le risque de développer un cancer thyroïdien dans la population âgée de plus de 40 ans n'est pas spécifiquement documenté (UNSCEAR, 2006). De son côté, la Commission européenne (2010) considère qu'aucun argument concret n'a pu être trouvé pour justifier, sur la base des effets secondaires observés, une restriction de l'administration d'iode stable chez les personnes de plus de 40 ans. Cependant et selon l'Agence de la santé et des services sociaux de la Mauricie et du Centre-Québec⁸⁵, les pays dans lesquels on trouve une déficience d'apport alimentaire en iode ne recommandent pas la prise d'iodure de potassium aux personnes âgées de plus de 40-45 ans.

83- À noter qu'il s'agit de la dose évitée, définie comme la différence entre la dose prévisionnelle et la dose résiduelle qui se produirait même si une mesure de protection était prise. La dose prévisionnelle peut donc être supérieure à ce niveau d'intervention.

84- Il s'agit de la dose prévisionnelle, c'est-à-dire de la dose qui est prévue en l'absence de la mise en œuvre de mesure de protection.

85- Chap. 4.3.2 et 4.5.5.3.

Niveaux maximaux admissibles de contamination des aliments destinés à la consommation humaine au niveau communautaire

Aliments destinés à la consommation humaine

Niveaux maximaux admissibles pour les denrées alimentaires (Bq/kg ou Bq/L)	Aliments pour nourrissons	Produits laitiers	Autres denrées alimentaires (à l'exception de celles de moindre importance)	Liquides destinés à la consommation
Isotopes de strontium, notamment ^{90}Sr	75	125	750	125
isotopes d'iode, notamment ^{131}I	150	500	2 000	500
Isotopes de plutonium et d'éléments transuraniens à émissions alpha, notamment ^{239}Pu et ^{241}Am	1	20	80	20
Tout autre nucléide de période radioactive supérieure à 10 jours, notamment ^{134}Cs et $^{137}\text{Cs}^*$	400	1 000	1 250	1 000

* Hors tritium, carbone 14 et potassium 40

(SOURCE : EURATOM, 2016)

Des niveaux d'intervention dix fois supérieurs sont fixés pour une liste de denrées alimentaires dites « de moindre importance » (c'est-à-dire de denrées dont la consommation n'excède pas 10 kg/an : thym, aulx, pâte de cacao, truffes, caviar, épices...).

Le présent règlement reconduit les valeurs adoptées en 1989.

Les études probabilistes de sûreté

Les études probabilistes de sûreté (EPS) contribuent à évaluer le niveau de sûreté des réacteurs, permettant ainsi d'identifier certains points faibles nécessitant des modifications de conception ou d'exploitation. Elles portent à ce jour sur le risque de fusion du cœur, et sont au nombre de trois :

- les EPS de niveau 1 (EPS 1), qui permettent d'identifier les séquences menant à la fusion du cœur et de déterminer leur probabilité ;
- les EPS de niveau 2 (EPS 2), qui permettent d'évaluer la nature, l'importance et la cinétique des rejets hors de l'enceinte de confinement en cas de fusion du cœur, ainsi que les probabilités associées aux différents scénarios de rejet ;
- les EPS de niveau 3 (EPS 3), qui permettent d'évaluer la probabilité de survenue des conséquences de ces rejets sur la population (doses efficaces voire effets sur la santé).

L'EPS de niveau 1 consiste à identifier tous les scénarios (combinaisons de défaillances matérielles et/ou humaines) conduisant à la fusion du cœur, et à évaluer la probabilité de celle-ci à partir de la probabilité de chacun des scénarios. Elle comprend trois volets :

- *l'évaluation probabiliste des initiateurs* (identifier et évaluer la probabilité des événements initiateurs) ;
- *l'évaluation probabiliste des systèmes de sûreté* (évaluer la fiabilité et/ou la disponibilité et/ou la maintenabilité des systèmes qui doivent intervenir en cas de survenue de chacun de ces initiateurs) ;
- *l'évaluation probabiliste des séquences accidentelles* (recenser et évaluer les séquences accidentelles menant à un accident grave).

L'EPS de niveau 2 a pour objet d'identifier quels sont les scénarios de fusion du cœur qui sont susceptibles de conduire à des rejets radioactifs à l'extérieur de l'enceinte et d'évaluer l'importance et la cinétique des rejets correspondants, ainsi que leurs probabilités. Sont pris en compte les phénomènes physiques et mécaniques pouvant mettre en cause l'intégrité de l'enceinte, ainsi que les interventions des équipes de crise. L'EPS 2 s'adosse aux résultats de l'EPS 1. Les rejets sont regroupés en un nombre limité de catégories qui sont associées à un mode de défaillance du confinement, à une cinétique et à une amplitude des rejets. Elles sont utilisées pour améliorer les systèmes et les procédures visant à réduire les risques de défaillance de l'enceinte de confinement et leurs conséquences éventuelles.

L'EPS de niveau 3 a pour but d'évaluer, à partir des résultats de l'EPS 2, les conséquences sur la population et sur l'environnement (dose efficace ou niveau de contamination / effets sur la santé), en considérant notamment les phénomènes de dispersion atmosphérique, les conditions météorologiques et les plans d'urgence (Lanore, 2003).

Au niveau des initiateurs, on distingue habituellement les événements *d'origine interne à l'installation* (défaillances d'origine matérielle ou humaine) et les *agressions d'origine interne* (incendie, inondation interne...) *ou externe* (séisme, incendie ou inondation externes, tornade...). Ils peuvent être étudiés dans *différents états du réacteur* (en puissance, à l'arrêt).

Enfin, les incertitudes associées à ces évaluations doivent être explicitées. Elles augmentent avec le niveau de l'étude (accroissement du nombre d'inconnues à prendre en compte) et sont (pour la même raison) plus importantes pour les agressions d'origine externe que pour les autres types d'événements.

Les premières EPS françaises de niveau 1 ont été réalisées en 1990 par EDF et par le CEA-IPSN. Les EPS de niveau 2 sont plus récentes.

La probabilité de fusion du cœur (partielle ou totale) a été estimée en 1990 pour l'ensemble des états de fonctionnement des réacteurs, à environ 5.10^{-5} et 10^{-5} par an et par réacteur pour les réacteurs de 900 MWe et 1300 MWe respectivement (EDF, 1990 ; CEA-IPSN, 1990)⁸⁶. Ces probabilités ont été revues à la baisse en 2002 (environ 10^{-5} et 5.10^{-6}) (Mac Lahan, 2003). Elles sont aujourd'hui d'environ $7,5.10^{-6}$ selon l'IRSN pour les 900 MWe, et de l'ordre de 10^{-5} selon EDF pour les 1300 MWe⁸⁷ dans le cadre de leur troisième réexamen décennal de sûreté⁸⁸. Cette dernière étude a donné lieu à de nombreuses demandes d'études complémentaires et d'améliorations (IRSN, 2012b ; ASN, 2013a).

Les premières EPS de niveau 2 ont été réalisées par EDF pour les réexamens de sûreté associés aux troisièmes visites décennales des réacteurs de 900 MW et 1300 MWe. L'analyse par l'IRSN des résultats de l'EPS 2 des 900 MWe a permis de mettre en évidence les principales séquences contribuant au risque de rejets radioactifs et les points sur lesquels des évolutions de la conception ou de l'exploitation devaient être étudiées ou mises en œuvre. Concernant l'EPS 2 réalisée par EDF pour les 1300 MWe, l'ASN (2013a) considère qu'étant donné les incertitudes et approximations qu'elle comporte, les résultats doivent en être considérés comme préliminaires. Les EPS 1 et 2 vont être reprises, en lien avec les réexamens de sûreté et les demandes de l'ASN (cf. 4.2.2).



86- Agressions internes et externes, fusion du combustible en piscine de désactivation non prises en compte.

87- Après prise en compte des modifications prévues lors des troisièmes visites décennales.

88- Incluant le risque de découverture de la piscine de désactivation du combustible et, selon les paliers, des risques d'agressions internes (incendie, inondation) et externes (séisme).

L'application des procédures ultimes « U » et autres dispositifs aux différents modes de défaillance de l'enceinte de confinement en cas de fusion du cœur

Le défaut d'étanchéité initial de l'enceinte (mode « β »)

En situation d'accident grave, un défaut d'étanchéité de l'enceinte de confinement présent au début de l'accident ou rapidement induit par celui-ci, pourrait conduire à des relâchements directs de radioactivité dans l'environnement, et ce très tôt au cours du déroulement de l'accident. Ce court délai ne permettrait pas une décroissance suffisante des radionucléides en suspension dans l'enceinte de confinement et conduirait à une exposition importante des populations.

La **procédure « U2 »** permet de surveiller l'étanchéité de l'enceinte de confinement en situation accidentelle et d'y remédier **dans la mesure du possible**.

L'explosion d'hydrogène dans l'enceinte de confinement (mode « γ »)

La dégradation du cœur consécutive à un dénoyage du cœur conduit très rapidement à l'oxydation des gaines de combustible en zirconium et des autres métaux présents dans la cuve ; ce processus peut être suivi d'un effondrement du cœur avec percement de la cuve, puis à une interaction entre le corium en fusion et le béton du radier (décomposition du béton sous l'effet de la chaleur transmise par le corium et oxydation de ses composants métalliques). Ces phénomènes d'oxydation conduisent à un relâchement d'hydrogène dans l'enceinte de confinement (et de monoxyde de carbone dans le cas de l'interaction corium-béton)⁸⁹. Sous certaines conditions, la combustion de cet hydrogène (et du monoxyde de carbone) peut être amorcée, puis se propager sous une forme explosive. Le risque de combustion suite à un percement de la cuve est plus élevé en l'absence d'eau dans le puits de cuve.

On distingue deux types de propagation (d'explosion) : la déflagration et la détonation. Ces phénomènes dépendent des conditions du milieu : énergie disponible dans les points chauds et caractéristiques du mélange hydrogène/air sec/vapeur d'eau dans l'enceinte de confinement notamment.

La **déflagration** « est une combustion qui, une fois amorcée, se propage sous l'effet de l'échauffement du gaz par conduction et de la diffusion des radicaux libres dans la zone des gaz non brûlés » (Céréfino, 2008), pour une concentration d'hydrogène égale ou supérieure à 4% et une concentration en vapeur d'eau inférieure à 55 ou 60% du volume des gaz contenus à l'intérieur de l'enceinte. Elle se propage à une vitesse de quelques mètres par seconde.

La **détonation** est une combustion qui se propage à une vitesse supersonique (1000 à 2200 m/s). Elle peut être directe ou résulter de l'accélération d'une déflagration d'hydrogène.

Un phénomène de détonation direct suppose réunies des conditions relatives notamment à la composition des gaz contenus dans l'enceinte, à la géométrie et à la taille du volume contenant ces gaz et à l'énergie d'amorçage disponible. Il est jugé peu probable dans une enceinte de confinement d'un réacteur REP en cas de fusion du cœur (Céréfino, 2008).

En cas de déflagration, une accélération de la flamme due à des instabilités hydrodynamiques et à des phénomènes de turbulence (induits notamment par la présence d'obstacles sur la trajectoire de la flamme) peut cependant conduire à une détonation (« transition déflagration-détonation »).

« La concentration moyenne d'hydrogène atteinte dans l'atmosphère de l'enceinte de confinement d'un REP français en cas d'accident grave est largement suffisante pour permettre la déflagration de l'hydrogène, dès lors que cette déflagration n'est pas rendue impossible par la présence de vapeur d'eau. Une telle déflagration se produirait vraisemblablement rapidement lors de la dégradation du cœur dans la cuve, bien avant la production d'hydrogène et de monoxyde de carbone due à l'interaction corium-béton. (...) Le pic de pression en résultant

89- Participent également à la production d'hydrogène : la radiolyse de l'eau du circuit primaire ou des puisards de récupération de l'injection de sécurité, l'oxydation des métaux de l'enceinte de confinement, le renoyage du cœur dégradé dans la cuve.

pourrait affecter l'étanchéité de l'enceinte de confinement des REP français. » (Cérénino, 2008). À noter que les enceintes de confinement des réacteurs de 1300 MWe (double enceinte béton) sont plus vulnérables à une combustion d'hydrogène que celles des réacteurs de 900 MWe (peau métallique + enceinte béton) (tenue ultime moindre) (IRSN, 2011).

Pour faire face au risque de surpression à l'intérieur de l'enceinte, des **recombineurs catalytiques passifs** ont été installés à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire dans toutes les centrales (installation achevée en 2007), avec pour objectif de recombinaison en vapeur d'eau l'hydrogène qui est mélangé dans l'enceinte à l'oxygène, à l'azote, au monoxyde de carbone et à la vapeur d'eau⁹⁰ (**annexe 14**). Ces dispositifs conduisent à exclure le risque de défaillance de l'enceinte de confinement par explosion d'hydrogène (terme-source S1).

L'explosion de vapeur dans la cuve ou dans le puits de cuve (mode « α »)

Une explosion de vapeur peut se produire après fusion du cœur lorsque du corium chaud et fragmenté entre en contact avec de l'eau, soit au fond de la cuve soit, après défaillance de celle-ci, dans le puits de cuve, du fait de la vaporisation quasi instantanée et massive de l'eau du système d'aspersion dans l'enceinte.

Si un effet de l'explosion de la cuve sur l'intégrité de l'enceinte de confinement est considérée comme peu plausible, tel n'est pas le cas en ce qui concerne le puits de cuve, où la tenue des murs et planchers attenants, de divers composants du circuit primaire et de l'enceinte pourrait être affectée (Jacquemain, 2013).

Ce mode de défaillance **ne fait pas aujourd'hui l'objet de procédures ou de dispositions particulières** sur les réacteurs du parc nucléaire français.

La mise en surpression lente de l'enceinte de confinement (mode « δ »)

Ce mode de défaillance de l'enceinte de confinement résulte d'un phénomène de surpression, lui-même consécutif à l'échauffement de son atmosphère dû à trois phénomènes concomitants : extraction insuffisante de l'énergie libérée par les produits de fission, formation progressive d'une très grande quantité de gaz pendant l'érosion du béton du radier par le corium, et vapeur résultant de l'évaporation de l'eau éventuellement utilisée pour refroidir le corium (système d'aspersion dans l'enceinte) (Jacquemain, 2013).

En l'absence de refroidissement de l'enceinte par le système d'aspersion dans l'enceinte, la pression augmenterait jusqu'à dépasser au-delà de 24 heures la pression de dimensionnement de celle-ci.

La **procédure « U5 »** a pour fonction de maîtriser la pression à l'intérieur de l'enceinte de confinement. Il s'agit d'un système d'éventage volontaire de l'enceinte avec filtration des rejets au travers d'un lit de sable (42 m² x 80 cm d'épaisseur), qui interviendrait au plus tôt 24 heures après le début de l'accident et pourrait durer 24 heures. Cette filtration intervient après un premier système de filtration (filtration simple, filtres à charbon actif) (rétention de l'iode moléculaire d'un facteur 1000). Son efficacité dépend de la forme physico-chimique des iodes présents dans l'enceinte (cf. encadré) : réduction d'un facteur supérieur à 100 pour les aérosols, de 10 à 100 selon les paliers et les tranches pour l'iode moléculaire, et réduction nulle pour les iodes organiques qui donc ne sont pas retenus par le système d'éventage-filtration. Le mode de défaillance « δ », initialement considéré comme un terme-source S1, relève dès lors de la catégorie S3. Il convient néanmoins de souligner que *la contribution des iodes organiques*, qui ne sont pas piégés par le dépressuriseur, est *majoritaire* dans l'activité rejetée en iodes (**annexe 22**, tableau 2).

Outre sa fonction d'écrêtage de la pression de l'enceinte, le dispositif de filtration permet de réduire les rejets radioactifs à un niveau compatible avec la mise en œuvre des plans particuliers d'intervention.

La traversée du radier en béton par le corium (mode « ϵ »)

Après l'éventuel percement de la cuve par le corium en fusion, le béton du radier se décompose sous l'effet de la chaleur transmise par celui-ci (« interaction corium-béton »).

Cela peut conduire au percement total du radier, dans un délai variable mais supérieur à 24 heures⁹¹.

La **procédure « U4 »** consiste en un ensemble de dispositifs qui ont pour objet d'empêcher le relâchement d'éléments radioactifs par le réseau de tuyauteries d'auscultation du radier disposé horizontalement dans celui-ci⁹².

Néanmoins, des rejets atmosphériques, et à plus ou moins long terme la lixiviation du corium, pourraient contaminer les cours d'eau. La construction d'une enceinte géotechnique serait mise en place pour limiter cette contamination. De terme-source S2, le mode de défaillance « ε » passe désormais dans la catégorie S3. Cette disposition n'était pourtant **pas opérationnelle en juin 2012** (ASN, 2012).

La **procédure U3** vise à permettre l'utilisation de moyens mobiles extérieurs pour suppléer la défaillance éventuelle de l'ensemble des systèmes d'injection de sécurité et d'aspersion dans l'enceinte de confinement. Il s'agit essentiellement de dispositifs de raccordement pré-installés et accessibles après un accident, permettant l'utilisation de moyens de pompage et si nécessaire d'échangeurs, qui ne sont pas à poste fixe sur les tranches. Elle intervient en prolongement de la procédure H4, laquelle repose sur le secours mutuel des systèmes ou sur un appoint à ces circuits pendant la phase de refroidissement. Elle ne correspond pas à une protection du confinement après une fusion du cœur. Elle a un caractère préventif ou limitatif.

Les formes physico-chimiques des iodes rejetés en cas de fusion du cœur et leur comportement dans l'enceinte de confinement

En ce qui concerne les gaz, les espèces à craindre à court terme sont essentiellement les gaz de fission et les produits de fission volatils (krypton, xénon, iode, césium, brome, rubidium, tellure, antimoine, argent) – avec prépondérance des iodes. Ceux-ci sont d'ailleurs parmi les premiers (avec les gaz rares) à être relâchés en cas de fusion du combustible. Dans l'enceinte de confinement, ils peuvent se trouver sous trois formes physico-chimiques :

les *iodes inorganiques* (iode moléculaire gazeux I_2^{93} , acides iodés tel que HOI), les *iodes organiques* (iodures d'alkyl notamment CH_3I) et les *aérosols* (particules formées avec d'autres produits de fission / adsorption ou absorption sur des particules liquides ou solides préexistantes / oxydes d'iode). La répartition des iodes entre ces différentes formes conditionne leur devenir et leur impact sur l'environnement. Ainsi, une fraction importante des aérosols se déposera sur les parois de l'enceinte ou sera rabattue vers l'eau des puisards, où ils seront dissous en fonction de leur solubilité. Contrairement à la majorité des produits de fission, l'iode peut également être présent dans l'enceinte de confinement en quantités significatives sous sa forme gazeuse I_2^{94} . Très réactif, cet iode moléculaire sera l'objet d'un phénomène d'adsorption surfacique important. Par ailleurs, des réactions complexes interviendront dans l'atmosphère de l'enceinte et dans le puisard sur les gaz et les iodes organiques, à l'origine de nombreux phénomènes (production/destruction d'iodures organiques, transferts entre phase gazeuse et phase liquide) (figure 1).

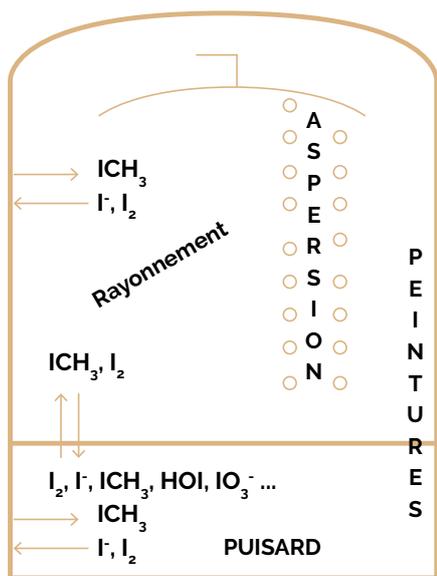


Figure 1 – Formes physico-chimiques de l'iode et leur comportement

(D'APRÈS MARCHAND, 1997 ; CÉRÉMINO, 2008)

90- Le monoxyde de carbone produit par l'interaction éventuelle corium/béton est également recombiné sur les plaques catalytiques des recombinateurs.

91- Ce point est à préciser pour le nouveau radier du CNPE de Fessenheim.

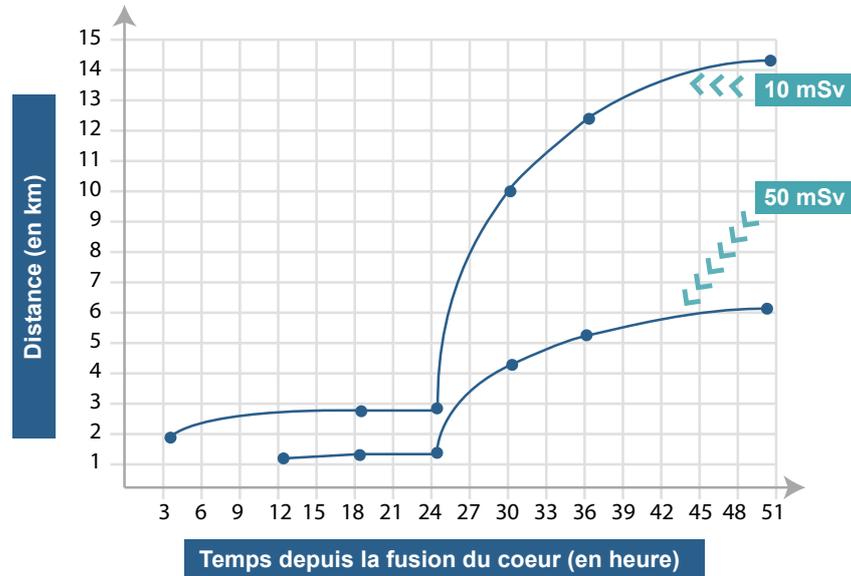
92- Existence de dispositions spécifiques pour le CNPE de Cruas, du fait de l'existence d'un deuxième radier et d'un espace entre les deux radiers qui communique avec l'atmosphère.

93- L'iode pur est une molécule di-atomique de formule I_2 .

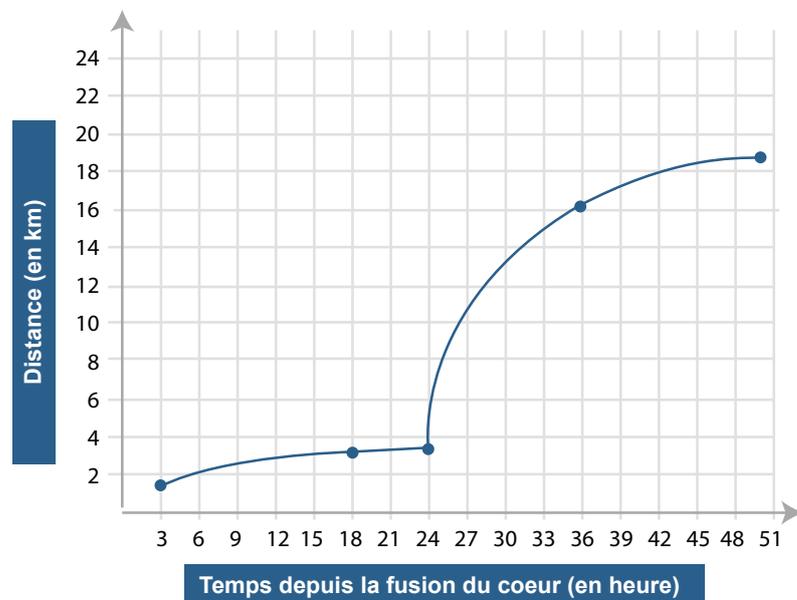
94- C'est également le cas du ruthénium, présent dans le combustible sous forme métallique peu volatil, et transformé en oxyde de ruthénium gazeux dans le circuit primaire.

Distances auxquelles seraient atteints les niveaux d'intervention pour un enfant de 1 an en fonction du temps écoulé depuis le début d'un rejet de type S3

Distance dans l'axe du vent à laquelle la dose efficace pour un enfant âgé d'un an présent durant le passage du nuage atteint 10 mSv et 50 mSv



Distance dans l'axe du vent à laquelle la dose à la thyroïde par inhalation pour un enfant âgé d'un an présent durant le passage du nuage atteint 100 mSv



(SOURCE : CHAMPION ET HERVIOU, 2006)

Les parades destinées à minimiser les risques associés aux modes « γ » et « δ » de défaillance de l'enceinte de confinement

Sur les recombineurs catalytiques passifs

En cas de fusion du cœur dans un REP et si les conditions énoncées à l'annexe 11 sont réunies, une déflagration se produirait rapidement, déflagration dont le pic de pression pourrait affecter l'étanchéité de l'enceinte de confinement (Céréfino, 2008). Par ailleurs, la mise en service du système d'aspersion dans l'enceinte, qui vise à diminuer la surpression et la température à l'intérieur de celle-ci (et donc à préserver son intégrité), peut augmenter le risque de déflagration.

Les recombineurs ont pour fonction de recombinaison en vapeur d'eau l'hydrogène et l'oxygène présents dans l'enceinte. Il ne s'agit pas d'éliminer tout l'hydrogène qui serait produit, mais de maintenir la pression résultant d'une éventuelle combustion d'hydrogène inférieure à la pression de dimensionnement de l'enceinte.

Les enceintes des réacteurs du palier CPY 900 MWe sont équipées de 24 recombineurs et les enceintes des réacteurs de 1300 MWe et 1450 MWe de 116 recombineurs, de types différents.

Leur capacité de recombinaison est fonction des conditions d'ambiance dans l'enceinte de confinement : pression, température, taux de vapeur d'eau, concentration en hydrogène et en oxygène notamment⁹⁶. Elle peut varier selon le type de recombineurs. La capacité globale de recombinaison installée sur les REP français de 1300 MWe et 1450 MWe est de l'ordre de 100-120 kg/heure pour une atmosphère à 4% en hydrogène, et de 250 kg/heure pour une atmosphère à 8% d'hydrogène, pour une production d'environ un kg d'hydrogène par MWe installé (Céréfino, 2008).

Les recombineurs démarrent automatiquement à partir d'une concentration en hydrogène de l'ordre de 1 à 2% de l'ensemble des gaz contenus dans l'enceinte.

Plusieurs questions se posent qui sont relatives à son efficacité en phase initiale de fusion du cœur, aux divers phénomènes susceptibles de se produire lors du processus de fusion du cœur et aux incertitudes associées, ainsi qu'à son fonctionnement.

Sur l'efficacité des recombineurs catalytiques passifs en phase initiale de fusion du cœur

Si l'interaction entre le corium et le béton peut produire en 48 heures une quantité d'hydrogène équivalente à celle produite par la réaction d'oxydation du zirconium contenue dans le cœur, les vitesses de relâchement ne sont élevées que lors de l'oxydation des métaux dans la cuve et dans les tous premiers instants de l'interaction corium-béton (quelques minutes à quelques heures). L'accident survenu à Three Mile Island (États-Unis) en 1979 a témoigné de la réalité du risque rapide de dénoyage, de fusion du cœur et d'explosion d'hydrogène (survenue à + 10 h et à 2 bars de pression). Or **la cinétique de recombinaison est lente** eu égard à la cinétique de production d'hydrogène lors de l'oxydation des métaux dans la cuve, et au tout début de la production d'hydrogène dans l'enceinte de confinement elle peut excéder celle de la recombinaison d'un facteur 10 (Céréfino, 2008).

Sur les divers phénomènes qui sont susceptibles de se produire lors du processus de fusion du cœur et les incertitudes qui leur sont associées

La capacité de recombinaison selon les critères définis par l'ASN a été étudiée pour les séquences accidentelles suivantes : petite brèche de 1, 2 et 3 pouces sur le circuit primaire de refroidissement, avec ou sans aspersion de l'enceinte, et perte d'eau alimentaire de générateurs de vapeur avec et sans aspersion dans l'enceinte (EDF in : CLI Saint-Laurent, 2014). Or l'accident grave est consécutif au cumul d'un initiateur (brèche sur un circuit, perte des alimentations électriques externes...) avec la perte des systèmes de sauvegarde ou de leurs systèmes supports (perte de l'injection de sécurité, des diesels de secours...). Cette problématique, qui n'a pas été totalement intégrée à la conception des tranches⁹⁷, n'est **pas intégralement prise en compte pour évaluer l'efficacité des recombineurs**. Certes, des dispositions d'ultime secours seront opérationnels sur les sites à l'horizon 2020 (appoint d'ultime secours en eau, diesel d'ultime secours notamment).

Au demeurant, l'efficacité des recombineurs d'hydrogène n'est pas acquise dans un certain nombre de situations : *renoyage en cuve pendant la dégradation du cœur* suite à une action inopportune (accélération de la production d'hydrogène, perte d'inertage de l'enceinte par condensation de la vapeur d'eau), *augmentation locale du débit vapeur, échauffement direct de l'enceinte de confinement* (montée en pression rapide de l'enceinte avec déclenchement de la combustion d'hydrogène), *phase tardive d'un accident de pressurisation lente de l'enceinte* (effet de la surpression), fuite d'hydrogène notamment vers *l'espace entre enceintes* (pour les 1300 et 1450 MWe). Ils seraient inefficaces dans l'hypothèse de la formation d'une *atmosphère explosive* dans l'enceinte de confinement (1300 MWe) (IRSN, 2013a ; Jacquemain, 2013).

« L'ASN considère que le risque de défaillance de l'enceinte interne par combustion d'hydrogène ne peut pas être considéré comme résiduel [dans les 1300 MWe et les 1450 MWe] » et qu'il y a lieu de « réévaluer la conception des recombineurs d'hydrogène sur une base de scénarios plus étendue que celle qui a servi à leur dimensionnement » (ASN, 2013c).

Sur le fonctionnement des recombineurs catalytiques passifs

Tout d'abord et pour différentes raisons⁹⁸, la distribution de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement en situation de fusion du cœur n'est pas homogène et sa répartition est incertaine. Des **concentrations locales d'hydrogène** supérieures au seuil d'inflammabilité peuvent ainsi se produire dans des zones éloignées des recombineurs.

Pour cette raison, l'OPSCST (1987) préconisait, outre l'installation de recombineurs autocatalytiques d'hydrogène, la mise en place d'un système de mesure de la concentration air sec/hydrogène/vapeur d'eau/gaz carbonique. EDF a renoncé à installer un système de mesure de la concentration en hydrogène dans l'enceinte (ASN, 2003), aucun des appareils existants ou développés spécifiquement n'ayant pu satisfaire au cahier des charges (EDF, 2002). À la demande de l'ASN, l'exploitant a simplement équipé deux recombineurs de thermocouples, qui donnent une indication sur leur activité de recombinaison⁹⁹. Une étude IRSN/CEA en cours vise à améliorer les outils d'évaluation du risque d'explosion d'hydrogène et à développer une instrumentation destinée à améliorer la mesure des gaz dégagés au cours d'un accident grave (Projet MITHYGENE).

De plus, le *monoxyde de carbone* produit lors de l'interaction corium-béton, de même que *l'iodure de césium* consécutif à la fusion du cœur, sont **eux aussi recombinaison** sur les plaques catalytiques, ce qui en réduit l'efficacité¹⁰⁰, divers **poisons** générés par l'accident (acide borique, iode organique, aérosols, fumées de câbles brûlés et autres projectiles) pouvant également contribuer à la réduction de cette efficacité (Arnould *et al.*, 2001). *Certaines conditions ambiantes* du bâtiment réacteur peuvent par ailleurs **en retarder le démarrage** (INERIS, 2014).

Il convient également de mentionner que du fait de la température élevée des plaques catalytiques, les recombineurs peuvent eux-mêmes, si le mélange gazeux est inflammable localement (supérieur à 10 %), être **à l'origine du démarrage d'une réaction de combustion d'hydrogène** (Jacquemain, 2013). Selon l'IRSN (2011a), cet effet pourrait néanmoins être positif en termes de sûreté dans la mesure où il favoriserait le déclenchement de combustions partielles de l'hydrogène présent avec un moindre impact sur la tenue des équipements.

La fiabilité et l'efficacité des recombineurs catalytiques fait l'objet de demandes d'études complémentaires de la part de l'Autorité de sûreté nucléaire dans le cadre des réexamens de sûreté et de la réalisation des études probabilistes de sûreté.

96- Ainsi, elle croit avec la pression et la fraction molaire en hydrogène, et décroît avec la température (Arnould *et al.* 2001).

97- EDF (1985). Textes du Rapport de Sûreté communs à toutes les tranches du palier 1300 MWe.

98- Nombreux équipements encombrant l'enceinte de confinement, effet des panaches de vapeur sortant des recombineurs...

99- La mise en place d'une instrumentation spécifique a été prévue sur les 900 MWe, 1300 MWe et 1450 MWe lors des troisièmes visites décennales afin d'améliorer la détection du risque d'explosion d'hydrogène dans l'enceinte et l'arrivée de corium dans le puits de cuve sur le radier. Il a été demandé à EDF d'anticiper leur déploiement.

100- Sauf pour le monoxyde de carbone dans un environnement riche en oxygène, pour lequel l'effet est inverse.

« Il est difficile, malgré l'implantation de recombineurs, de démontrer que la formation d'un mélange hydrogène-oxygène susceptible de conduire à des phénomènes d'accélération locale de la flamme peut être exclue en tous points de l'enceinte de confinement et à tout instant » (Jacquemain, 2013).

Sur la procédure U5

En cas de mise en surpression lente de l'enceinte de confinement, la procédure « U5 » a une fonction d'écrêtage de la pression de l'enceinte. Le dispositif de filtration permet également de réduire les rejets radioactifs à un niveau compatible avec la mise en œuvre des plans particuliers d'intervention (cf. [annexe 11](#)).

Plusieurs questions se posent, qui concernent les conditions d'utilisation du filtre à sable, ses performances et son niveau de fiabilité ainsi que sa disponibilité.

Sur les conditions d'utilisation du dépressuriseur à sable

Auparavant fixé à 5 bar absolus, l'extension de la plage d'ouverture du dispositif à 7 bar absolus (palier 900 MWe) et à 6 bar absolus (paliers 1300 MWe et 1450 MWe), correspond à une demande d'EDF de 2001. Elle conduit à **minimiser la marge de sécurité entre la pression de ruine de l'enceinte et la pression atteinte dans l'enceinte majorée du pic de pression éventuellement consécutif à une explosion d'hydrogène.**

L'argument avancé par l'exploitant pour justifier l'extension du critère de décision est la possibilité pour le personnel de continuer à intervenir sur le réacteur.

Suite à la demande de l'ASN (2012) d'étudier les conséquences radiologiques de l'ouverture du dispositif, notamment sur l'accessibilité du site et l'ambiance radiologique des locaux de crise et de la salle de commande (ECS-29), EDF (2015) indique qu'au regard des niveaux d'exposition pour les intervenants définis dans le Code de la santé publique, le niveau de dose atteint sur le site après un accident grave qui nécessiterait un éventage de l'enceinte ne remet pas en cause l'habitabilité permanente de la salle de commande et la capacité du personnel à réaliser les interventions nécessaires sur l'installation. C'est au demeurant ce qu'écrivait l'inspecteur général pour la sûreté nucléaire à EDF en 1990 : « Le débit de dose aux endroits les plus exposés du site est acceptable si les filtres sont munis de protections biologiques (...). Le parc sera muni de ces protections biologiques fin 92 » (Tanguy, 1990). **La justification avancée par l'exploitant en 2001 pour étendre la plage d'ouverture du filtre U5 ne semble donc pas fondée.**

À cet égard, l'IRSN (2013a) évoque l'existence de situations pour lesquelles le **perçement du radier** pourrait intervenir **avant l'atteinte des critères d'ouverture du dispositif d'éventage-filtration**. Il demande quel en serait l'impact sur les rejets et indique que l'exploitant doit vérifier le caractère résiduel de ce scénario.

Par ailleurs, les vannes du système de filtration sont commandées manuellement. Si l'éventage de l'enceinte ne remet pas en cause l'habitabilité permanente de la salle de commande et la capacité du personnel à réaliser les interventions nécessaires sur l'installation (ci-dessus), qu'en est-il précisément de l'**accessibilité des vannes du filtre aux opérateurs, notamment en phase de fermeture du filtre** (volants de manœuvre non motorisés situés derrière une protection biologique) ?

Ensuite, la décision d'ouverture du dispositif se base sur la mesure de pression enceinte en gamme élargie. En situation de perte totale des alimentations électriques avec défaillance du LLS (turbo-alternateur de secours), l'instrumentation concernée serait indisponible. L'IRSN (2011b) estime nécessaire de prévoir des **dispositifs mobiles** permettant aux équipes de site **d'accéder aux mesures de la pression enceinte et de la pression en cuve** dès les premières heures de l'accident et **en toutes circonstances**, sans attendre le secours des FARN, notamment tant que les diesels d'ultime secours ne sont pas installés.

Enfin et de manière générale, l'IRSN (2011b) indique que l'ouverture du dispositif d'éventage-filtration U5 est une situation qu'il convient d'**envisager** et de **savoir gérer**. Selon (APAVE, 2012) « La formation des agents de conduite reste un atout important dans la conduite en situation accidentelle. *Les interrogations que l'on peut avoir sont principalement sur le facteur humain dans une situation accidentelle* ».

Sur les performances et le niveau de fiabilité du dépressuriseur à sable

Le colmatage du réseau est limité par le pré-filtre métallique, la pression supérieure de fonctionnement et le diamètre des canalisations (APAVE, 2012). Un éventuel **colmatage du pré-filtre** n'est pas évoqué.

Concernant les **capacités de filtration** du dispositif,

- des éléments d'information sont-ils disponibles concernant la *saturation du filtre à sable dans la durée* ?
- dans un REP tel que celui de Golfech, le filtre peut absorber un volume important de fluide (3,5 kg/s) ; sachant que les canalisations ont un diamètre de 40 cm et que la perte de charge (différence entre la pression d'entrée et la pression de sortie du filtre) est de 0,1 bar, le temps qui serait nécessaire pour ramener la pression de l'enceinte de confinement à une valeur acceptable serait au minimum de l'ordre de 48 heures (GSIEN, 2004). *Son efficacité pose question*. Elle pourrait être encore réduite pour les aérosols dans le cas d'un accident grave survenant simultanément sur deux tranches jumelées de 900 MWe, qui disposent d'un unique filtre U5 ;
- le filtre à sable **ne retient pas l'iode organique gazeux**, qui peut être présent dans l'enceinte de confinement en quantité significative (cf. [annexe 11](#)).

Concernant le **risque d'explosion à l'intérieur du filtre**, EDF n'exclut pas le risque d'explosion dans le système d'événage-filtration U5 (EDF, 2014). Il indique qu'il existe deux séquences typiques de ce risque :

- le risque transitoire¹⁰¹ de combustion par condensation de la vapeur d'eau sur les structures initialement froides pouvant conduire, dans certaines conditions, à l'obtention d'un mélange combustible (perte d'inertage) ;
- le risque¹⁰² d'explosion dû à la combustion de l'hydrogène (et du monoxyde de carbone) issu(s) de l'interaction corium-béton, avec l'oxygène initialement présent dans le filtre, suite à la combustion totale de l'oxygène présent dans l'enceinte de confinement par les recombineurs catalytiques.

S'agissant de la première séquence, EDF indique qu'elle est réduite « drastiquement » par l'installation des recombineurs catalytiques d'hydrogène et par l'installation, depuis le début des années 90, d'un système de préchauffage des structures par de l'air chaud qui permet d'éviter tout risque de condensation de la vapeur (EDF, 1989). En cas de perte totale des sources électriques, ce système serait secouru par un diesel apporté par la FARN et à plus long terme par le diesel d'ultime secours (installé d'ici 2020 dans le cadre des prescriptions post-Fukushima). L'efficacité des recombineurs comportant des incertitudes majeures (ci-dessus), la réduction de ce risque repose sur le seul système de préchauffage.

S'agissant de la seconde séquence, EDF indique que « les dispositions envisagées dans le cadre de l'allongement de la durée de fonctionnement pour éviter la percée du radier permettront de garantir le renoyage du corium en cuve ou dans le puits de cuve, et de ce fait éviteront ou limiteront très significativement la production de gaz combustibles en phase d'interaction corium-béton. Les scénarios d'accumulation d'hydrogène ou de monoxyde de carbone consécutive à une consommation de tout l'oxygène présent dans le bâtiment réacteur seront donc écartés ». À condition que la mise en œuvre de ces dispositions ne conduise pas à une explosion vapeur (cf. [annexe 11](#)). L'IRSN (2011) précise néanmoins que les fortes quantités d'hydrogène (et de monoxyde de carbone) restant justifient de garantir l'étanchéité de l'enceinte pendant les phases tardives de l'accident, en évitant notamment une entrée brutale d'oxygène qui pourrait entraîner une déflagration d'hydrogène dans l'enceinte.

Enfin, l'IRSN (2013a) considère que le **risque d'échec de l'ouverture du dispositif d'événage-filtration** et de rupture de l'enceinte par pressurisation lente sont sous-estimés. L'ASN (2013b) demande à EDF d'étudier la redondance et la diversification de l'ouverture du dispositif d'événage-filtration U5.

101- Sur une heure environ.

102- Risque bref (environ 1 minute).

Sur la disponibilité du dépressuriseur à sable

Tout d'abord, les dispositifs U5 ne sont **pas dimensionnés** à certains phénomènes naturels extrêmes (séismes, vents violents).

Ensuite, sur les paliers 900 MWe, un **filtre à sable** est installé **par paire de tranches** (cf. ci-dessus). En cas d'accident survenant simultanément sur les deux tranches, la décompression enceinte subsisterait sur ces deux tranches mais l'utilisation simultanée du dispositif réduirait la filtration des iodes (EDF, 2014). À condition qu'il n'y ait pas de perte d'alimentation électrique sur les deux tranches.

Enfin, la question se pose du **chargement** qui pourrait être appliqué sur le filtre U5 en cas d'explosion localisée d'hydrogène dans l'enceinte de confinement (INERIS, 2014).

Perspectives

Suite à la demande de l'ASN, EDF (2013) a indiqué envisager, sous réserve de l'achèvement des études de faisabilité, la mise en œuvre d'une disposition permettant de préserver l'intégrité de l'enceinte de confinement sans ouverture du dispositif U5 (« EAS ultime »).

Dans l'attente de ces modifications (prévues pour la phase 3 du projet Post-Fukushima, c'est-à-dire après 2020), EDF envisage la mise en place d'un dispositif (« puisards basiques ») qui devrait limiter fortement les rejets en iodes lors de l'utilisation du dispositif U5.

De son côté, l'IRSN travaille sur la question de l'amélioration des moyens de filtration et de piégeage des produits de fission susceptibles d'être rejetés dans l'environnement (projet PASSAM).

Quelques phénomènes majeurs non pris en compte dans les études initiales d'accidents graves (Jacquemain, 2013)

Les phénomènes de by-pass

Il s'agit des situations qui, à la suite de dégradations d'équipements, entraînent une mise en communication directe du fluide primaire avec l'extérieur de l'enceinte de confinement (à l'intérieur de bâtiments périphériques ou directement dans l'environnement). Ils peuvent se produire lors d'un accident de fusion du cœur (*avec des rejets importants et précoces*) mais également en fonctionnement normal du réacteur ou lors d'un « simple » accident de dimensionnement susceptibles de nécessiter une mise à l'abri immédiate. Exemple de la rupture de tubes générateurs de vapeur (RTGV) : une rupture peut être (a) un initiateur, (b) consécutive à une brèche sur la tuyauterie vapeur du circuit secondaire de refroidissement (accident de dimensionnement), (c) induite par la montée en pression du circuit primaire suite à l'envoi d'eau sur le cœur en fusion (accident hors dimensionnement).

L'accident de criticité ou accident d'insertion rapide de réactivité dans le bâtiment réacteur (mentionné au niveau 5 de l'échelle INES)

Une insertion rapide de réactivité se traduit par un accroissement soudain et important de la puissance nucléaire dégagée dans le cœur. Elle pourrait faire suite à des scénarios divers tels que le retrait incontrôlé d'une grappe de contrôle ou une dilution hétérogène du bore dans le circuit primaire de refroidissement. Elle pourrait mener à une explosion susceptible d'endommager la cuve et l'enceinte de confinement. Elle pourrait également induire une rupture du circuit primaire (notamment RTGV) à l'origine d'une fusion du cœur. La question se pose également du retour en criticité du combustible fondu lorsqu'il est relocalisé dans le puits de cuve.

La glande thyroïde

Morphologie de la glande thyroïde

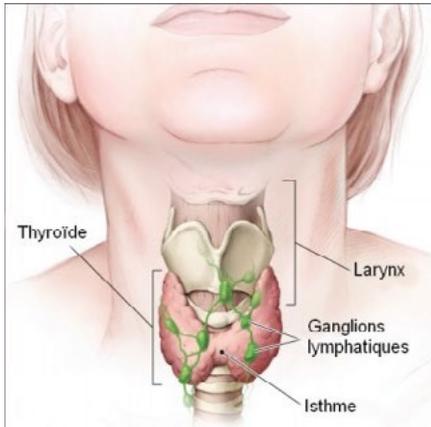


Figure 1 : Position anatomique de la glande thyroïde (Source : National Cancer Institute, 2014)

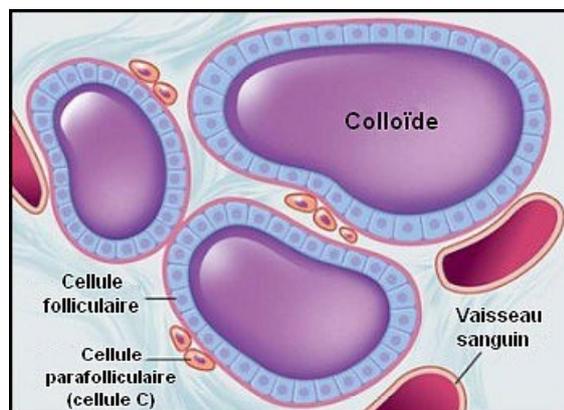
La glande thyroïde est située à la base du cou, en-dessous du cartilage thyroïdien (appelé pomme d'Adam) ; elle est moulée sur l'axe trachéo-laryngé et de consistance ferme. Elle est entourée d'une capsule avasculaire (ou gaine viscérale péri-thyroïdienne) qui lui est propre. La thyroïde se compose de deux lobes droit et gauche situés verticalement de part et d'autre du larynx. Une partie intermédiaire horizontale, l'isthme thyroïdien, forme un pont entre les deux lobes. Généralement, la glande thyroïde répond aux 2^{ème} et 3^{ème} anneaux trachéaux ; mais elle peut avoir une position plus haute ou plus basse. Les deux lobes ont un sommet supérieur, ainsi qu'une grande base inférieure. Chez l'adulte, sa longueur est d'environ 6 à 8 cm (figure 1).

La masse de la glande thyroïde augmente avec l'âge jusqu'à environ 50 ans. Elle pèse de 1 à 2-3 g chez le nourrisson et de 15 à 30 grammes chez l'adulte de moins de 50 ans selon les sources (sujets euthyroïdiens) (en cas de goitre sa masse peut augmenter jusqu'à 100-150 grammes). Son volume diminue progressivement après 50 ans, de même que sa capacité de fixation de l'iode. Il dépend de l'ingestion quotidienne d'iode stable (CIPR 30).

Structure histologique de la glande thyroïde (figure 2)

L'unité morpho-fonctionnelle de la glande thyroïde est le **follicule thyroïdien** (ou vésicule thyroïdienne), composé d'un épithélium unistratifié de *cellules folliculaires* (les thyrocytes), produisant les hormones thyroïdiennes et disposées autour d'un espace central contenant la *colloïde* ; cette substance fluide est principalement constituée du précurseur des hormones thyroïdiennes, la thyroglobuline.

Le follicule thyroïdien contient également 1 à 2 % de *cellules* dites *parafolliculaires* (ou cellules C, ou « cellules claires »), produisant la calcitonine.



**Figure 2
Structure histologique de la glande thyroïde
(Source : quizlet.com)**

Fonctions de la glande thyroïde et rôle de l'iode (Tubiana, 1982)

L'iode est capté et stocké sous forme d'iodure dans la colloïde du follicule thyroïdien, où va s'effectuer, par fixation des iodures sur la thyroglobuline, la synthèse des *hormones thyroïdiennes*. Après protéolysation par une cellule thyroïdienne, une partie d'entre elles (triiodothyronine ou T3, et thyroxine ou T4) sera alors libérée dans le sang.

Les hormones thyroïdiennes sont indispensables à la croissance et au développement de l'organisme, notamment du système nerveux central et du squelette. Elles accélèrent le métabolisme de base et donc la consommation d'oxygène et d'énergie. Elles régulent, entre autres, la ventilation pulmonaire ainsi que le débit et la fréquence cardiaques. Elles interviennent dans le métabolisme énergétique des protéines, des glucides et des lipides. Leur sécrétion est régulée en cascade par l'hypothalamus (via une hormone dite « TRH ») et par l'ante-hypophyse (via une hormone dite « TSH »).

La thyroïde fœtale commence à produire de la colloïde vers la 10^e ou 11^e semaine de la gestation. C'est à ce moment qu'apparaissent la capacité à concentrer l'iode et à synthétiser les iodothyronines (T3 et T4), et donc la sensibilité du fœtus à une exposition à l'iode radioactif.

La concentration en iode de la glande thyroïde

La concentration d'iode dans la glande thyroïde est de 0,5 à 1 mg (milligrammes) d'iode par gramme (Tubiana, 1982), ce qui correspond à une teneur totale de 0,5 à 1 mg pour une thyroïde de 1 gramme, teneur qui augmente jusqu'à environ 10 à 30 mg pour la thyroïde d'un adulte de moins de 50 ans et qui diminue après.

Contribution des 14 familles homogènes d'aliments aux apports en iode chez les femmes adultes normoévaluants* (sel iodé à 12,5 µg/g inclus)

Groupes d'aliments (14 familles)	F 15-19 ans (n = 85)		F 20-34 ans (n = 209)		F 35-44 ans (n = 136)		F 45-59 ans (n = 171)		F 60-69 ans (n = 83)		F ≥ 70 ans (n = 84)	
	moyenne (µg/j)	apport (%)	moyenne (µg/j)	apport (%)	moyenne (µg/j)	apport (%)	moyenne (µg/j)	apport (%)	moyenne (µg/j)	apport (%)	moyenne (µg/j)	apport (%)
Produits laitiers, desserts lactés, glaces	48,2	38,3	48,6	36,6	46,9	34,5	43,4	33,9	44,7	35,3	48,3	39,1
Poissons et crustacés	18,9	15,0	19,3	14,6	19,2	14,1	20,5	16,0	22,7	17,9	26,1	21,0
Pain, viennoiserie, pâtisserie, biscuits	13,0	10,3	13,8	10,4	12,9	9,6	13,1	10,3	12,2	9,5	12,9	10,5
Sous total (1-3)	80,1	63,6	81,7	61,6	79,0	58,2	77,0	60,2	79,6	62,7	87,3	70,6
Viande, volaille, charcuterie, abats	8,5	6,7	8,6	6,5	14,3	10,5	10,3	7,9	9,0	7,0	6,9	5,5
Boissons (eau, soda, café)	8,0	6,2	11,3	8,6	12,0	8,8	11,0	8,7	8,8	7,0	6,9	5,2
Plats préparés (plats composés, sauces)	7,5	6,0	7,5	5,7	7,6	5,5	6,3	4,9	5,7	4,5	5,1	4,1
Oeufs et dérivés	6,4	5,1	6,1	4,6	7,3	5,4	9,7	7,5	9,4	7,4	6,7	5,4
Snacks (sandwiches, pizzas, quiches)	5,9	4,6	7,1	5,3	5,4	3,9	3,7	2,8	3,2	2,4	2,2	1,8
Sous total (4-8)	36,3	28,6	40,6	30,7	46,6	34,1	41,0	31,8	36,1	28,3	27,8	22,0
Produits amylicés (pâte, riz, p. de terre)	4,2	3,3	3,9	2,9	3,3	2,4	3,1	2,5	2,9	2,3	2,5	2,0
Fruits et légumes	1,6	1,2	1,8	1,4	2,2	1,7	2,5	2,0	3,1	2,4	2,2	1,8
Sucres ajoutés et chocolat	0,6	0,5	0,8	0,6	0,5	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2
Soupes et entrées	1,3	1,1	1,5	1,1	1,9	1,4	1,9	1,5	2,2	1,8	2,2	1,8
Graisses (beurre, huile, margarine)	0,3	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3
Sous total (9-13)	8,0	6,3	8,3	6,2	8,3	6,0	8,3	6,6	9,1	7,1	7,5	6,1
Sel iodé	1,6	1,2	1,6	1,2	1,9	1,4	1,4	1,1	1,7	1,4	1,4	1,2
Total (sans sel iodé)	124,5	100,0	130,7	100,0	134,2	100,0	126,4	100,0	124,9	100,0	122,5	100,0
Total (sel iodé inclus)	126,7	100,0	133,0	100,0	136,8	100,0	128,3	100,0	127,4	100,0	124,5	100,0

SOURCE : AFSSA, 2005

* apports *normoévaluants* : apports moyens.

Ces apports correspondent à la « consommation » journalière d'iode par la glande thyroïde et contribuent à maintenir la concentration thyroïdienne en iode à son maximum de manière permanente ([annexe 16](#)).

Le cycle naturel de l'iode (figure 1) (Valeix, 2002)

Les eaux océaniques constituent le principal réservoir d'iode sur le globe terrestre ($7,9 \cdot 10^{16}$ g), soit 24 à $120 \mu\text{g} / \text{L}$ d'eau de mer. Le transfert de l'iode de la masse océanique vers l'atmosphère impliquerait plusieurs mécanismes chimiques et biochimiques au niveau des eaux marines de surface sursaturées en oxygène : oxydation photochimique des iodures sous l'effet du rayonnement solaire, libération d'iodométhane synthétisé par les algues et le phytoplancton, libération de nombreux aérosols océaniques riches en iode organique. De plus, l'iode atmosphérique d'origine océanique s'enrichit de l'iode émis naturellement par l'activité volcanique terrestre ou induit par la combustion des sources d'énergie fossile. Le pool atmosphérique ainsi constitué est estimé à $5 \cdot 10^{12}$ g d'iode qui seront répandus par les précipitations à la surface des continents et des océans ($1,5$ à $2,5 \mu\text{g} / \text{L}$ d'eau de pluie).

L'utilisation intensive d'engrais minéraux très riches en iode ou d'herbicides contenant de l'iode, et plus récemment l'épandage des boues de filtration, ont très largement modifié les concentrations en iode dans les sols, et de ce fait, dans les productions agricoles. Les industries agro-alimentaire et pharmaceutique peuvent également contribuer à un apport en iode non négligeable.

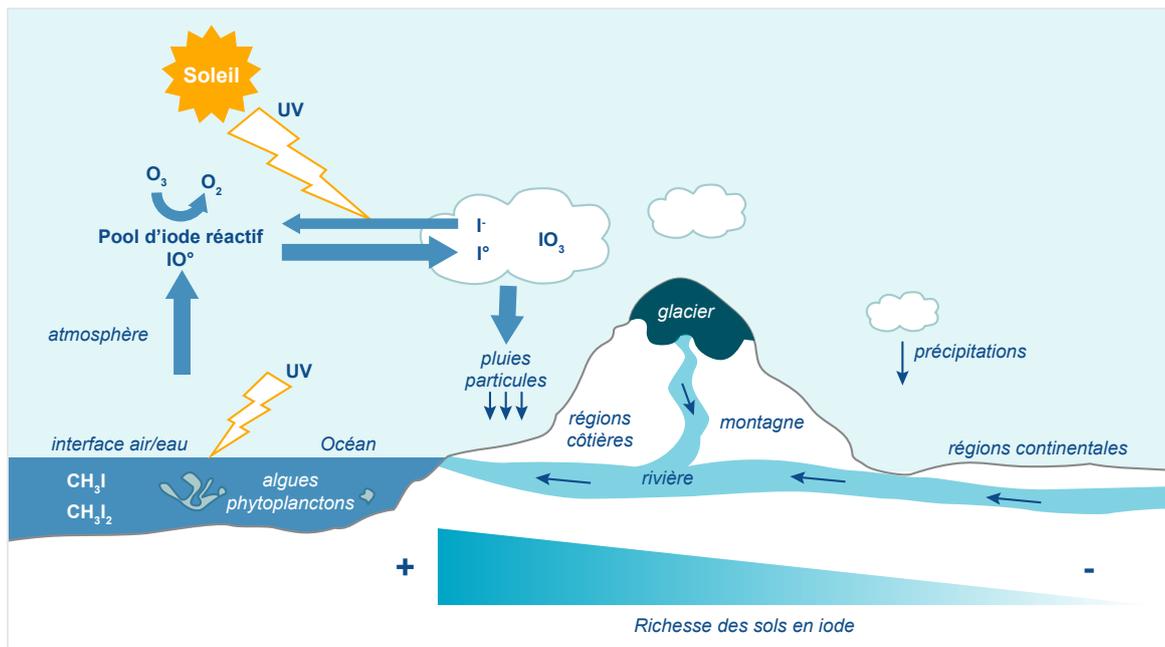


Figure 1 - Cycle de l'iode dans la nature.

(Source : <http://www.jle.com/en/revues/abc/e-docs/l'iode/Annales de biologie clinique>)

Sur le métabolisme de l'iode

L'iode incorporé sous forme libre dans l'alimentation est absorbé aux niveaux gastrique et intestinal en moins de trois heures. Il est distribué par le sang dans tout l'espace extra-cellulaire et de manière différentielle selon les tissus : rein, glande thyroïde, et dans une moindre mesure glandes mammaires et salivaires, muqueuse gastrique et autres tissus, une infime quantité étant éliminée par voie fécale.

L'iode capté par le rein est éliminé rapidement, alors que l'iode capté par la glande thyroïde est organisé, permettant ainsi à celle-ci d'assurer ses fonctions (**annexe 16**). La totalité de l'iode résiduel contenu dans le plasma en a disparu au bout d'environ 48 à 72 heures (période d'environ 6 heures).

Captation et organisation de l'iode stable

Lors de l'administration d'iode stable, la capture et l'organisation¹⁰³ de l'iode par la glande thyroïde augmentent avec sa *concentration plasmatique* et décroissent avec la *quantité d'iode présente dans l'alimentation*.

Taux de fixation de l'iode radioactif et concentration plasmatique en iode stable

L'importance de l'inhibition de la fixation de l'iode radioactif par la glande thyroïde dépend de la dose d'iode administrée.

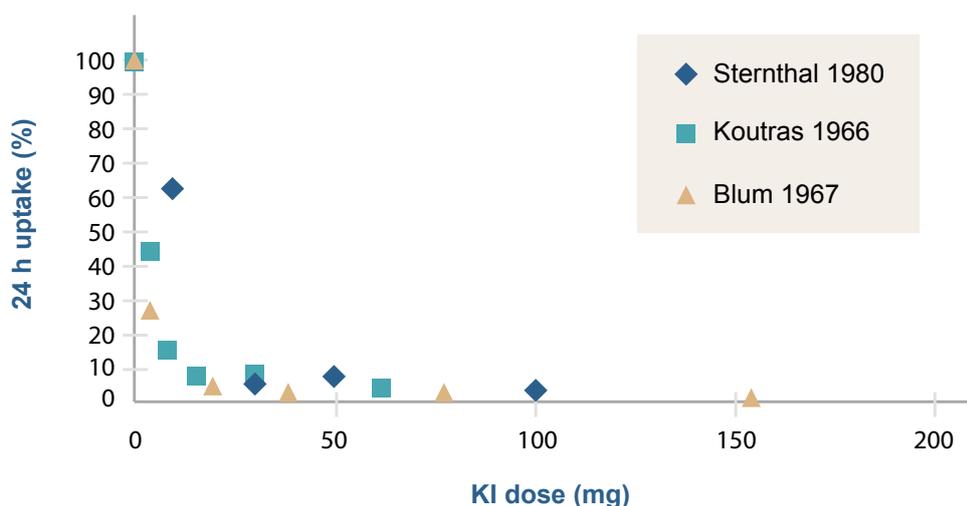


Figure 1 – Taux de fixation sur 24 heures de l'iode radioactif, en fonction de la dose d'iodure de potassium administrée simultanément

(SOURCE : VERGER ET AL. 2001, D'APRÈS STERNTHAL, 1980 ; KOUTRAS, 1966 ; BLUM, 1967)

Taux de fixation de l'iode stable administré et quantité d'iode présent dans l'alimentation

Le taux de fixation thyroïdienne est inférieur à 10% dans les régions où l'apport alimentaire en iode est très élevé (500 µg* d'iode par jour), de l'ordre de 25% dans les régions où cet apport est élevé (200 µg d'iode par jour) et de 75% dans le cas inverse (apport de 30 à 50 µg d'iode par jour) (Tubiana, 1982 ; Le Guen et Schlumberger, 2012). Dans le cas de l'iode 129, pour un même becquerel ingéré, le facteur de captage peut varier de 0,3 avec un apport quotidien de 165 µg d'iode, à 0,03 avec un apport de 2,2 mg (Malarbet *et al.*, 1998).

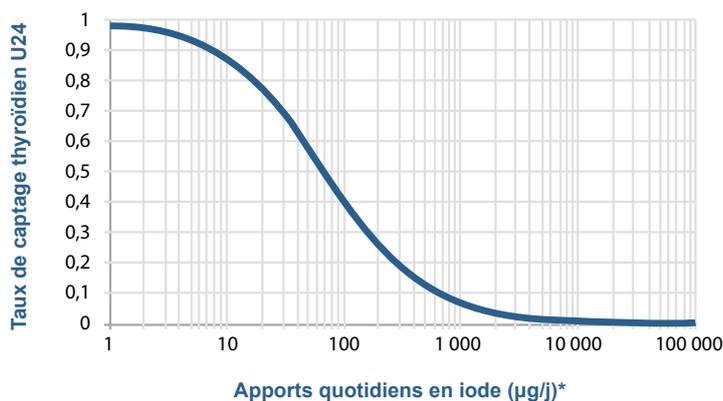


Figure 2 - Taux de captage (U24) de l'iode plasmatique par la glande thyroïde en fonction des apports iodés quotidiens

(SOURCE : LE GUEN ET SCHLUMBERGER, 2011, D'APRÈS ZVONOVA, 1989)

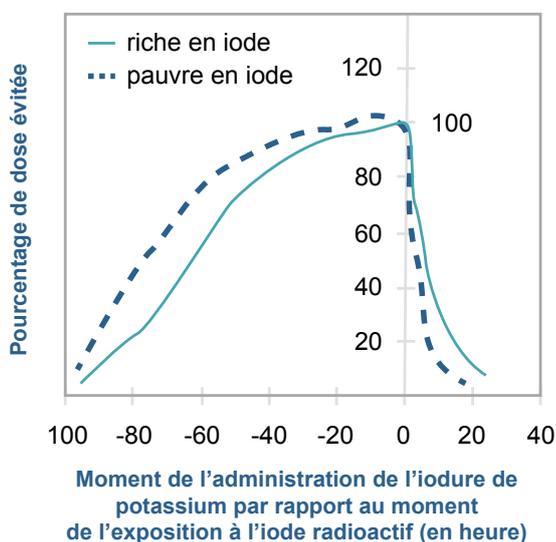
* 1 µg = 1 microgramme = 1 millionième de gramme

Le moment de l'administration d'iode stable

Pour être pleinement efficace, l'administration d'iode stable doit avoir lieu *au plus près* de la propagation du nuage radioactif (figure 3).

Figure 3 - Efficacité de la prise d'iodure de potassium en fonction du moment de son administration par rapport au moment de l'exposition à l'iode radioactif pour deux types d'alimentation (alimentation riche en iode / alimentation pauvre en iode)

(SOURCE : VERGER ET AL., 2001, D'APRÈS BERMAN ET AL. 1968)



La durée de la protection

Elle dépend de la posologie qui a été administrée. Quelques études, déjà anciennes, sont disponibles (Verger *et al.*, 2001).

Il est néanmoins difficile de les mettre en perspective car elles ont été réalisées avec très peu de sujets et selon des protocoles différents (administration de l'iodure de potassium avant ou après l'exposition à l'iode radioactif / délai variable entre l'administration d'iodure et l'exposition / mesure du taux de captation de l'iode radioactif réalisé dans des conditions différentes), ce qui peut expliquer les discordances observées au niveau des résultats.

Ainsi dans l'étude de Blum (1967), avec une prise préventive de 100 mg de KI (soit 77 mg d'iode utilisable par l'organisme), la dose évitée à la thyroïde est de 78% 48 heures après la prise de KI ; elle n'est plus que de 24% 72 heures après. Dans l'étude de Ramsden (1967), avec un apport de 130 mg de KI (soit 100 mg d'iode utilisable par l'organisme), la dose évitée à la thyroïde est de 49% 2 jours après la prise de KI ; elle n'est plus que de 23% 4 jours après.

103- *Organification* : mécanisme d'oxydation qui permet à l'iode incorporé de donner naissance aux précurseurs des hormones thyroïdiennes).

La question de l'administration répétée d'iode stable

Il semble exister un consensus sur l'opportunité d'une administration répétée d'iode stable répétée plusieurs jours de suite (environ 10-12 jours) en cas d'exposition prolongée, et ce depuis les années 1980 (Stenthal *et al.*, 1980 ; Circulaire DGS/PGE/1B, 1989 ; Schlumberger *et al.*, 1987, 2011). Administrée chez les sujets euthyroïdiens¹⁰⁴, elle permet de maintenir un blocage efficace du captage thyroïdien. Cette éventualité est également envisagée par SGDN (2014).

Lors de la catastrophe de Tchernobyl, les responsables ont distribué à la population polonaise environ 10,5 millions de doses à 87% des enfants et 7 millions de doses aux adultes. La distribution s'est étalée du 29 avril au 2 mai 1986 (début des rejets le 28 avril). Les autorités ont considéré qu'étant donné la diminution des rejets le 3 mai, il n'y avait pas lieu de procéder à une autre distribution d'iode stable. Des doses répétées ont néanmoins été administrées à environ 8% des enfants. Très peu d'effets secondaires semblent avoir dans l'ensemble été enregistrés.

Les avis semblent néanmoins diverger concernant les populations susceptibles d'être concernées par une administration répétée d'iode stable. Selon Verger *et al.* (2000), elle s'applique aux *adultes* et peut être étendue aux *adolescents de 15 ans et plus*, aux *adultes jeunes* et aux *femmes enceintes*. En cas de nourriture contaminée sans possibilité d'approvisionnement alternatif, l'OMS (1999, 2011) considère pour sa part qu'une dose quotidienne d'iode stable est à envisager *chez les enfants et les adolescents* « pendant la période nécessaire » (en l'absence de réactions secondaires). Une administration d'iode stable répétée pour les nouveaux-nés et les femmes enceintes ou allaitantes étant exclue, et déconseillée pour les adultes de moins de 40 ans (augmentation du risque d'effets secondaires), à plus forte raison pour les adultes de plus de 40 ans. L'administration canadienne considère quant à elle que, dans des conditions exceptionnelles (émission prolongée, conditions météorologiques exceptionnelles), une dose quotidienne pourrait être indiquée pour les enfants et les adolescents de 1 an à 18 ans, selon la durée prévue de l'exposition. Les doses seraient alors identiques à la dose de départ applicable aux groupes d'âge concernés (ASSMCQ, 2012). Selon Vidal (2014), une deuxième prise peut se justifier *sauf pour les femmes enceintes et les enfants de moins de 1 mois*. Wambersie *et al.* (2008) excluent également l'administration de doses répétées pour les femmes enceintes et les nouveau-nés. L'administration d'iode stable étant selon ces auteurs recommandée avec précaution chez les plus de 40 ans et déconseillée chez les plus de 60 ans, ces recommandations s'appliquent *a fortiori* à l'administration répétée d'iode stable.

La question se pose également de savoir quelle doit être la posologie administrée. Selon Sternthall (1980) cité par Verger (2000), une posologie plus faible (15 mg/j) qu'une première prise de 30 mg d'iodure de potassium paraît suffisante dans le cas d'une alimentation riche en iode. Verger propose une administration répétée d'iode stable équivalente au quart de la dose initialement administrée, ce qui selon lui permettrait de concilier protection efficace et minimisation du risque d'effets secondaires liés à une surcharge iodée. L'administration canadienne envisage pour sa part des doses identiques aux doses de départ (ci-dessus). Le dictionnaire Vidal (2014) et l'Agence nationale de sécurité du médicament (2014) considèrent que 100 mg/24 h (soit 130 mg d'iodure de potassium) pendant 15 jours ne provoquerait pas de désordre hormonal sérieux chez le sujet normal.

L'IRSN a pour sa part lancé avec cinq partenaires scientifiques un programme de recherche sur les modalités d'administration de l'iode stable en cas de rejets radioactifs répétés ou prolongés (Programme PRIODAC), dont les premiers résultats sont attendus dans les cinq ans (IRSN, 2014).

104- *Sujet euthyroïdien* : sujet dont la glande thyroïde fonctionne normalement.

Caractéristiques radiologiques des isotopes de l'iode

L'iode dans l'environnement

Caractéristiques radiologiques des isotopes de l'iode (tableau 1)

Tableau 1 - Les caractéristiques radiologiques des isotopes de l'iode les plus rémanents
(Guétat et al., 2004)

Isotope père (période)	Mode de décroissance (pourcentage d'embranchement)	Isotope	Période	Mode de décroissance (pourcentage d'embranchement)	Énergie totale émise par désintégration (MeV)		Isotope fils (période)
					Émission électronique	Émission photonique	
Isotope à vie très longue							
¹²⁹ Te (69,6 min) ^{129m} Te (33,6 j)	β^- (100%) β^- (35%)	¹²⁹ I	1,57.10 ⁷ a	β^- (100%)	0,064	0,025	¹²⁹ Xe (stable)
Isotope à vie courte							
¹²⁵ Xe (17 h)	EC, β^+ (100%)	¹²⁵ I	60,14 j	EC (100%)	1,019	0,042	¹²⁵ Te (stable)
¹³¹ Te (25 min) ^{131m} Te (30 h)	β^- (100%) β^- (77,8%)	¹³¹ I	8,04 j	β^- (1,11%) β^- (88,89%)	0,192	0,382	^{131m} Xe (11,9 j) ¹³¹ Xe (stable)
¹³³ Te (12,45 min) ^{133m} Te (55,4 s) ^{133m} I (9,2 s)	β^- (100%) β^- (87,1%) IT (100%)	¹³³ I	20,8 h	β^- (100%) β^- (87,1%)	0,411	0,607	^{133m} Xe (2,19 j) ¹³³ Xe (5,245 j)
Isotope à vie très courte							
¹²⁹ Xe (2,08 h)	EC, β^+ (100 %)	¹²⁹ I	13,2 h	EC (99,99%) EC (0,005%)	0,028	0,172	¹²⁹ Te (1.10 ¹³ a) ^{129m} Te (119,7 j)
^{130m} I (9,16 min)	IT (83%)	¹³⁰ I	12,36 h	β^- (100%)	0,297	2,139	¹³⁰ Xe (stable)
¹³⁵ Te (19,2 s)	β^- (100%)	¹³⁵ I	6,61 h	β^- (15,4%) β^- (84,6%)	0,367	1,576	^{135m} Xe (15,3 j) ¹³⁵ Xe (9,09 h)
^{132m} I (1,39 h) ¹³³ Te (78,2 h)	IT (86%) β^- (100%)	¹³² I	2,3 h	β^- (100%)	0,495	2,28	¹³² Xe (stable)
—	—	^{132m} I	1,39 h	IT (86%) β^- (14%)	0,159	0,322	¹³² I (2,3 h) ¹³² Xe (stable)
^{134m} I (3,8 min) ¹³⁴ Te (41,8 min)	IT (98%) β^- (100%)	¹³⁴ I	52,6 min	β^- (100%)	0,622	2,625	¹³⁴ Xe (stable)
—	—	^{134m} I	3,5 min	IT (98%) β^- (2%)	0,872	0,242	¹³⁴ I (52,6 min) ^{134m} Xe (0,29 s)

L'origine de l'iode dans l'environnement

La masse totale d'iode **naturel** sur terre est estimée à 40 milliards de tonnes. La quantité d'iode 129 présente dans l'atmosphère étant estimée à 1,7 térabecquerel (1700 milliards de becquerels) et à 7 gigabecquerels dans les océans.

La **production humaine** des isotopes de l'iode est liée pour une majeure partie d'entre eux à l'utilisation de la fission nucléaire : ils proviennent directement ou indirectement des réactions de fission qui se produisent dans le cœur des réacteurs nucléaires (voire au cours de la fabrication du combustible) ou lors d'explosions nucléaires. Leur dispersion dans l'environnement provient des essais nucléaires, des accidents et catastrophes nucléaires (Tchernobyl, Fukushima, Windscale Three-Mile-Island, Tokaï-Mura...) et des rejets des installations nucléaires lors d'incidents ou en fonctionnement de routine (tableau 2).

Tableau 2 – Activités rejetées en iodes (installations nucléaires) : quelques chiffres^{105,106}

(D'APRÈS HARDEMAN, 2006-2007 ; SCHLUMBERGER ET AL., 2011 ; IRSN, 2009A ; 2012A ; NEA, 2002 ; UNSCEAR, 2008 ; LÉGIFRANCE ARRÊTÉS D'AUTORISATION DE REJETS)

Rejets atmosphériques	Isotopes de l'iode	Iodes (total)	Iode 129	Iode 131	Iode 132	Iode 133	Iode 134	Iode 135
Essais nucléaires atmosphériques			3.10 ¹¹ Bq	6,8.10 ¹⁷ Bq				
Windscale (GB, 1957)				7,4.10 ¹⁴ Bq				
Three-Mile-Island (USA, 1979)				4,4.10 ¹¹ Bq				
Tchernobyl (ex-USSR, 1986)		20-50% de l'inventaire du cœur soit quelques 10 ¹⁸ Bq	5,0.10 ¹⁰ Bq	1,8.10 ¹⁸ Bq	1.10 ¹⁸ Bq	0,9.10 ¹⁸ Bq	2,5.10 ¹⁶ Bq	2,5.10 ¹⁷ Bq
Fukushima (Japon, 2011)		4,0.10 ¹⁷ Bq		2,0.10 ¹⁷ Bq	1,7.10 ¹⁷ Bq			
Rejets tous milieux								
Traitement du combustible utilisé (mondial, 1970-2000)			1,5.10 ¹³ Bq					
Réacteurs nucléaires de puissance (fonctionnement de routine)	mondial (rejets annuels)	1,0.10 ¹¹ Bq (environ)						
	France (limites annuelles pour une tranche)	5,0.10 ⁹ Bq						

La concentration des isotopes de très courte période (iodes 130 et 132 à 141) dans le cœur et dans les circuits primaire et secondaire de refroidissement d'un réacteur est plus importante que celle des isotopes 131 et 129. Cela est également le cas dans les rejets en situation d'accident grave ou d'explosion atomique pour lesquels aucun stockage ne contribue à la décroissance avant rejet. On considère ainsi que leur contribution à l'irradiation de la glande thyroïde des populations des Iles Marshall exposées aux essais nucléaires américains dans les années 50 a été majoritaire.

Concernant l'iode 129, il est dix à cent millions de fois moins abondant en fin de cycle dans un cœur de REP que l'iode 131, et il est présent dans les rejets en fonctionnement normal dans des proportions qui peuvent être jusqu'à dix mille fois moins importantes que l'iode 131 (ce qui n'est plus vrai des centres de traitement du combustible usé où l'iode 129 est majoritaire du fait de sa très longue période). De plus, son activité spécifique¹⁰⁷ dans la glande thyroïde est très inférieure à celle des autres isotopes de l'iode. Néanmoins, sa durée de séjour dans la thyroïde et son coefficient de dose efficace pour l'inhalation et pour l'ingestion¹⁰⁸ sont supérieurs de près d'un facteur 10 à ceux de l'iode 131.

Certains isotopes radioactifs de l'iode sont également fabriqués par activation pour un usage médical (radiothérapie, marqueurs *in vivo* ou *in vitro*). Ainsi, l'iode 131 est destiné aux traitements des dysfonctionnements et tumeurs de la thyroïde, l'iode 123 est utilisé en imagerie médicale et l'iode 125 en radio-immuno-analyse, en diagnostic et en thérapie.



105- 10⁹ = un million, 10⁹ = un milliard, 10¹² = mille milliards, 10¹⁵ = un million de milliards, 10¹⁸ = un milliard de milliards.

106- Activités auxquelles il convient d'ajouter les descendants de produits de fission à vie courte tel que le tellure 132.

107- *Activité spécifique* : nombre de désintégrations d'un radionucléide par unité de temps et par unité de masse.

108- *Coefficient de dose efficace* : la dose engagée à l'organisme par becquerel inhalé / ingéré (cf. annexe 2).

Sur les limites de l'administration d'iode stable

Sur le rôle des restrictions alimentaires dans la réduction de l'incorporation d'iode radioactif

Tableau 1 – Estimation de la contribution de l'iodure de potassium, de la consommation de lait en poudre et de la restriction de la consommation de légumes frais, à la réduction de la charge thyroïdienne en iode 131 chez les enfants polonais de moins de 5 ans au moment de l'accident de Tchernobyl¹

Date of KI prophylaxis	Dose reduction due to KI (%)	Dose reduction from milk ² and vegetables (%)	Total Dose reduction (%)
April 29	40	30	70
April 30	25	30	55
May 1	12	30	42
May 2	08	30	38

¹ Data are from 11 provinces with higher exposure.

² Calculated on the assumption that only powdered milk was used and that vegetables are avoided in children less than one year of age. There is an uncertainty as to the contribution of unprotected breast feeding to the thyroid burden.

(SOURCE : NAUMAN ET WOLFF, 1993)

Les radionucléides autres que l'iode susceptibles d'être rejetés en situation accidentelle

Parmi les radionucléides qui sont rejetés en fonctionnement normal et/ou en fonctionnement accidentel par une installation nucléaire, on peut mentionner :

Les produits de fission autres que les iodes (tableau 2)

Les produits de fission sont les atomes qui résultent de la fragmentation (de la cassure) d'un atome d'uranium 235 ou de plutonium (ce sont les *fragments de fission* et leurs *produits de désintégration*). Dans un réacteur nucléaire, la fission de l'atome d'uranium 235 produit en général deux fragments par fission, plus rarement trois (tritium). La part des atomes présents dans le combustible dans la production de produits de fission est la suivante : 57 % pour l'uranium 235, 35 % pour les plutonium 239 et 241 produits à partir de l'activation de l'uranium 238 et 8 % par fission directe de l'uranium 238.

Parmi les produits de fission radioactifs autres que les iodes : le césium 137, le strontium 90, les xénon 133 et 135, le krypton 85, etc.

Les produits d'activation

Dans un réacteur nucléaire, les neutrons qui accompagnent les phénomènes de fission peuvent être capturés par des noyaux stables qui se trouvent au voisinage du cœur - matériaux constitutifs des gaines de combustible, du circuit primaire ou des grappes de contrôle (zircalloy, nickel, fer, zinc, chrome, argent, cadmium ...) et corps chimiques présents dans le fluide primaire (bore, lithium, hélium...) - donnant des *produits d'activation*.

On peut citer divers isotopes du cobalt, de l'argent, de l'antimoine, du manganèse, du nickel, du zirconium, du chrome, etc., le tritium, le carbone 14.

En cas de fusion du cœur, la contribution aux rejets des produits d'activation liés aux matériaux de structure est relativement faible. Néanmoins, ils peuvent réagir chimiquement avec les produits de fission ou s'agglomérer dans l'enceinte de confinement avec les aérosols contenant des produits de fission.

Tableau 2 - Pourcentage de l'activité initiale du cœur en certains produits de fission rejetée pour les termes-sources S1, S2 et S3 (cf. 3.2.2)

Produits de fission	Terme source	S1	S2	S3
Gaz rares		80	75	75
Iode non organique		60	2,7	0,3
Iode organique		0,7	0,55	0,55
Césium		40	5,5	0,35
Tellure		8	5,5	0,35
Strontium		5	0,6	0,04
Iode organique		2	0,5	0,03

(SOURCE : JACQUEMAIN, 2013)

Les transuraniens formés dans le combustible¹⁰⁹

Ce sont des noyaux produits à partir de l'activation de l'uranium (essentiellement de l'uranium 238) : les isotopes du plutonium, de l'américium, du neptunium, du curium. Leur nombre atomique (nombre de protons contenus dans le noyau) est supérieur à celui de l'uranium.

Les isotopes de l'uranium (et leurs descendants naturels)

Présents à l'origine ou formés au cours du fonctionnement du réacteur, les isotopes de l'uranium (notamment 235 et 238) et leurs descendants naturels sont également susceptibles d'être rejetés en cas d'accident de fusion du cœur.

Certains de ces isotopes figurent parmi les plus rémanents : de 250 jours pour l'argent 110m à plusieurs années pour le césium 134 ou le cobalt 60, plusieurs dizaines d'années pour le césium 137 ou le strontium 90, une centaine d'années pour l'argent 108 ou le nickel 63, 5 000 ans pour le carbone 14, 24 000 ans pour le plutonium 239, 300 000 ans pour le chlore 36 à 4,5 milliards d'années pour l'uranium 238 (c'est d'ailleurs pourquoi ce dernier est toujours présent sur la terre)... D'autres sont de courte ou de très courte période, tels que les isotopes de l'iode déjà évoqués, mais n'en sont pas moins potentiellement toxiques.

La toxicité des radionucléides dépend de plusieurs facteurs, qui relèvent notamment de leurs caractéristiques physico-chimiques et des caractéristiques des sujets exposés¹¹⁰. Pour ce qui est des premières, on peut citer par exemple leur *capacité à se complexer*, leur *rythme de désintégration* (puisque chaque désintégration donne lieu à émission de rayonnements), l'*activité de la source* ou d'autres facteurs tels que les *types de rayonnements* émis (alpha, bêta, gamma, neutron...), leur *énergie* - les plus énergétiques étant considérés comme les plus toxiques (cf. **annexe 7** pour une discussion sur ce point).

Il s'agit donc de plus d'une centaine de substances, de période, de concentration et de toxicité variables.



109- Le rejet d'émetteurs alpha (uranium, transuraniens) par les CNPE est interdit en fonctionnement normal.

110- Des facteurs environnementaux peuvent également jouer un rôle dans la toxicité des radionucléides (exemple : les synergies avec d'autres polluants).

Perception du risque et stratégies de faire face

Le terme « déni » est utilisé ici de manière générique pour désigner une diversité de réponses (ou « stratégies »), tant conscientes qu'inconscientes, qui peuvent être apportées par les individus face à des conflits et à des sources de tension internes ou externes qui sont perçus comme menaçants pour leur équilibre psychique. Ces réponses peuvent se manifester tant verbalement qu'au niveau des comportements, elles peuvent être individuelles ou collectives (stratégies collectives de défense).

De manière générale, et face au risque nucléaire en particulier, on trouve souvent des stratégies qui relèvent du refoulement (effacement de la conscience), de la répression (oubli « volontaire »...), de la minimisation (dérision, comparaison avec d'autres risques...) ou du déni (dénégation, auto-illusion...) (Gazal *et al.*, 2008).

Qu'il s'agisse de comportements « à risque » ou de phénomènes d'origine naturelle ou anthropique, il a été montré que la perception du danger dépend de nombreux facteurs qui relèvent aussi bien du sujet que de la source de risque elle-même. Par exemple, les *bénéfices* attendus peuvent expliquer une certaine acceptation des risques encourus et la mise en œuvre des stratégies de « déni » décrites ci-dessus. C'est ainsi le cas pour les bénéfices économiques attendus ou retirés des installations nucléaires par les populations riveraines (Lemarchand *et al.*, 2003). Une explication pourrait être qu'il est psychologiquement insoutenable d'admettre simultanément l'existence d'un risque et d'un bénéfice importants. De la même manière, lorsque les bénéfices attendus ou réels sont minimes voire inexistantes, le déni du risque sera une réponse au détriment ou à l'inquiétude générée(e) par l'installation chez les populations riveraines (Lima, 2004).

Implication des professionnels de santé dans la gestion de la crise

La brochure Faculté de Médecine *et al.* (1988) présente les signes cliniques des différents types d'exposition aux rayonnements ionisants, les critères de tri des personnes impliquées, la conduite à tenir et les traitements correspondants. Il y est précisé que « *les médecins doivent savoir articuler leurs propres actions avec les actions développées par les autorités dans le cadre de ces plans [d'urgence]* ». Pour ce faire, trois cas de figure sont envisagés :

- le médecin a été explicitement prévu pour intervenir en cas de mise en œuvre du PPI : ayant reçu des consignes d'action, il sera alors alerté et tenu informé ;
- le médecin n'a pas été explicitement prévu pour intervenir dans le cadre d'un plan, mais compte tenu des circonstances de l'accident et de la situation, les autorités estiment que sa participation au dispositif est nécessaire : alerté en cours d'action, les autorités lui donnent des consignes d'action ;
- le médecin n'est ni prévu a priori dans le PPI ni sollicité en cours d'action par les autorités : son rôle est néanmoins de grande importance puisqu'il peut être consulté ou interrogé par la population ; il peut aussi prendre lui-même l'initiative d'informer ses patients habituels.

« *L'autorité morale qui s'attache à la qualité de médecin fait de celui-ci un relais d'information privilégié vers la population* ».

Impression :
La Maison du Document
33 avenue de la Côte de Nacre - 14 000 CAEN

Conception :
Juliette Thevenot
<http://juliettethevenot.ultra-book.com>



anccli

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE PARLONS EN !

www.anccli.org

ANCCLI – 3 allée des Muriers – 59229 TETEGHEM