CENTRE D'ETUDE SUR L'EVALUATION
DE LA PROTECTION DANS LE DOMAINE NUCLEAIRE

cepn

RAPPORT N° 252

PRINCIPES ET METHODES POUR L'EVALUATION ET LA SURVEILLANCE DES EXPOSITIONS INTERNES LIEES A L'INHALATION

J.P. DEGRANGE

Juin 1998

Contrat n° 381

SIEGE SOCIAL ET ADMINISTRATIF :

ROUTE DU PANORAMA BP 48 F-92263 FONTENAY AUX ROSES CEDEX
TEL : +33 1 46 54 74 67 FAX : +33 1 40 84 90 34
E-MAIL : sec@cepn.asso.fr WEB : http://www.cepn.asso.fr/

ASSOCIATION DECLAREE CONFORMEMENT A LA LOI DU 1 JUILLET 1901 SIRET : 310 071 477 00031 N° DE TVA : FR60310071477

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie le Docteur Benoît GIBERT et Monsieur Daniel BASIRE, respectivement médecin de travail et responsable radioprotection de l'usine de raffinage d'Uranium de COMURHEX-MALVESI, pour le soutien qu'ils lui ont apportés dans la réalisation du présent rapport.

Il tient également à remercier tout particulièrement Madame Monique ROY de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire pour sa relecture approfondie du manuscrit et ses remarques précieuses concernant le nouveau modèle pulmonaire de la CIPR.

SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE :
PRINCIPES ET STRATEGIES DE SURVEILLANCE

DEUXIEME PARTIE :
ELEMENTS D'EVALUATION DES MOYENS DE SURVEILLANCE DES EXPOSITIONS INTERNES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

La mise en oeuvre du principe d'optimisation de la radioprotection dans le cas des travailleurs soumis à des expositions internes soulève un certain nombre de problèmes tant au niveau des objectifs et des principes de mise en place et d'organisation de la surveillance, qu'au niveau de la nature des moyens de mesure utilisés et des méthodes d'estimation des doses à partir des résultats de mesure. En effet, cette mise en oeuvre nécessite non seulement l'interprétation dosimétrique réaliste d'incorporations pouvant être bien inférieures aux limites dérivées réglementaires mais aussi l'identification des principales sources d'expositions.

Ce rapport présente une première analyse de la capacité des moyens de mesure et des méthodes d'interprétation existantes à répondre aux exigences d'une telle mise en oeuvre. Il s'appuie sur un travail effectué au cours de l'année 1996 à l'occasion d'une réflexion sur l'optimisation de la radioprotection des travailleurs exposés à l'Uranium, menée en collaboration avec l'établissement COMURHEX de Malvési.

Dans une première partie, le rapport décrit les objectifs, les principes et les moyens de la surveillance des travailleurs exposés à la contamination interne. Les principes et stratégies de surveillance proposés dans les principales publications de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) sont tout d'abord présentés. Les modèles dosimétriques sous-jacents aux diverses publications de la CIPR, ainsi qu'aux réglementations Françaises, Helvétiques et des Etats Unis, font ensuite l'objet d'une présentation comparative, de même que les caractéristiques essentielles des principaux codes de calcul d'estimations dosimétrique.

Dans une deuxième partie, l'enchaînement de modèles nécessaire au calcul des doses internes est présenté pour chacun des principaux moyens de surveillance (Appareils de prélèvements d'air ambiant et individuel, mesures d'*excréta* fécaux, mesures d'*excréta* urinaires, et comptages d'activité pulmonaire), ainsi que les principales sources d'incertitude rencontrées lors des estimations dosimétriques réalisées par ces moyens. En ce qui concerne l'incorporation de composés d'uranium, des éléments d'interprétation quantitative des résultats de mesure sont exposés pour les deux derniers moyens de surveillance, sur la base des publications 30 et 54 de la CIPR. Sont notamment présentées les fonctions de rétention et d'excrétion, ainsi que les fonctions d'interprétation

fournissant, pour des expositions isolées ou chroniques aux composés d'uranium, la dose engagée en fonction du résultat de mesure. Enfin, en fonction des composés d'uranium considérés, des limites de détection, et de la périodicité des examens, les seuils d'enregistrement et d'investigation recommandés par la CIPR sont calculés et comparés à la dose détectable par examen dans le cas d'une exposition isolée et la dose annuelle moyenne détectable en cas d'exposition chronique.

L'annexe du rapport présente les principes et stratégies de surveillance exposés dans les réglementations Françaises, Helvétiques et des Etats-Unis.

PREMIERE PARTIE :
PRINCIPES ET STRATEGIES DE SURVEILLANCE

1. RAPPEL DES PRINCIPES FONDAMENTAUX DE RADIOPROTECTION

Le système de protection radiologique recommandé par la CIPR 60 [17] pour les pratiques existantes ou envisagées repose sur trois principes : le principe de justification, le principe d'optimisation et le principe de limitation.

1.1. Le principe de justification

La CIPR 60 définit ainsi le principe de justification :

- "Aucune pratique impliquant des expositions aux rayonnements ne doit être adoptée à moins qu'elle n'apporte un avantage suffisant, aux individus exposés ou à la société, qui contrebalance le détriment radiologique qu'elle induit".

La CIPR recommande que le détriment radiologique soit explicitement inclus dans le processus décisionnel visant à justifier une pratique impliquant une exposition certaine ou potentielle aux rayonnements.

Dès lors qu'une pratique humaine est considérée comme justifiée, sa mise en oeuvre va induire une exposition. Les deux autres principes répondent aux problèmes posés par la gestion de cette exposition.

1.2. Le principe d'optimisation

La CIPR 60 énonce ainsi le principe d'optimisation :

- "Pour toute source associée à une pratique, le niveau des doses individuelles, le nombre de personnes exposées, ainsi que la probabilité de subir des expositions quand ces dernières ne sont pas certaines d'être reçues, doivent être maintenus aussi bas qu'il

est raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux. Cette procédure devrait être réalisée sous la contrainte de restrictions sur les doses individuelles (contraintes de dose), ou sur les risques encourus par les individus en cas d'exposition potentielles (contraintes de risque), afin de limiter les iniquités susceptibles de résulter des jugements économiques et sociaux associés à la pratique".

Ce principe découle de la problématique posée par la gestion des effets stochastiques. En effet, compte tenu de l'hypothèse prudente d'absence de seuil pour ces effets, l'objectif logique d'un système de gestion du risque radiologique devrait être de réduire les expositions aussi bas que possible, voire de les supprimer. Toutefois, il apparaît rapidement que l'objectif du risque nul n'est pas une attitude responsable tant sur le plan éthique, que sur le plan de l'allocation des ressources sociales :

- D'un point de vue éthique, il importe de considérer le fait qu'atteindre le risque nul pour une population donnée, sans supprimer l'activité humaine correspondante, revient la plupart du temps à déplacer le problème et à transférer le risque sur d'autres groupes. Dès lors qu'une activité est justifiée socialement, toute demande d'un groupe visant à supprimer totalement le risque résiduel qu'il subit relève plus de l'individualisme que de la responsabilité collective, puisque le risque sera plus ou moins totalement transféré ailleurs et/ou sur d'autres groupes.

- D'un point de vue économique, dès lors qu'une activité humaine impliquant l'utilisation des rayonnements ionisants a été jugée socialement justifiée au sens de la CIPR, il n'est pas raisonnable de vouloir réduire ces risques à un niveau tel que les dépenses de protection remettent en cause la viabilité même de l'activité. Ceci exclut donc l'objectif de risque nul, car dans le domaine de la protection, comme dans bien d'autres domaines, on se heurte en effet très rapidement à la "loi des rendements décroissants" (Figure 1). Cette loi précise que les premières actions de protection sont généralement peu coûteuses et très efficaces, puis, qu'au fur et à mesure que l'on cherche à réduire encore le risque résiduel, il faut mettre en œuvre des ressources ΔC_i de plus en plus importantes pour un résultat ΔS_i de plus en plus faible. Il devient alors difficile de justifier que les ressources de protection soient monopolisées pour des bénéfices marginaux très réduits alors qu'on pourrait les affecter à d'autres situations où des réductions significatives du risque pourraient être obtenues avec moins de dépenses.

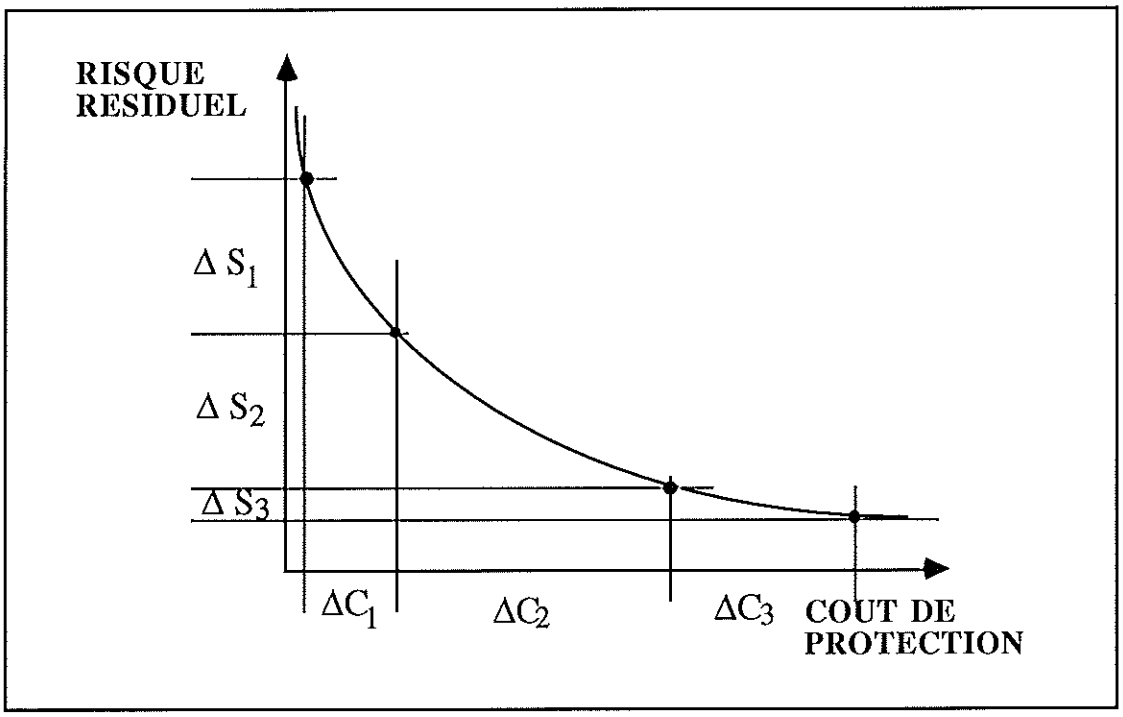

Figure 1. La loi des rendements décroissants

Il convient donc de savoir où s'arrêter dans la réduction du risque pour que les ressources sociales ne soient pas dilapidées et que les transferts de risques ne deviennent pas inacceptables au plan éthique. C'est cette problématique que les experts membres de la CIPR ont traduite sous la forme du principe d'optimisation : "réduire les expositions aussi bas que raisonnablement possible, compte tenu des contraintes économiques et sociales". L'adoption d'un tel principe, appelé également "principe ALARA", acronyme de "As Low As Reasonably Achievable", a pour objectif la recherche du meilleur compromis entre le risque résiduel et les facteurs économiques et sociaux.

1.2.1. Optimisation et équité

Dans ses dernières recommandations [17], la CIPR a mis un accent particulier, dans la formulation du principe d'optimisation, sur la volonté de limiter l'iniquité dans la distribution des doses individuelles. Ceci peut se traduire par le fait que l'objectif de l'optimisation n'est plus seulement de réduire globalement l'exposition collective aussi bas que raisonnablement possible en tenant compte des contraintes économiques et sociales mais aussi de veiller en priorité à réduire les expositions des personnes ayant les niveaux de dose individuels les plus élevés.

1.2.2. Les implications du principe d'optimisation

La mise en oeuvre du principe d'optimisation suppose une véritable prise de conscience collective, par tous les acteurs de la radioprotection, des hypothèses et attitudes sur lesquelles il est fondé :

- attitude prudente qui conduit aux hypothèses d'absence de seuil de risque aux faibles expositions et de linéarité du risque par rapport au niveau d'exposition,

- attitude responsable qui conduit à rejeter l'objectif du risque nul pour rechercher le meilleur compromis entre le risque résiduel et les facteurs économiques et sociaux.

Une telle prise de conscience constitue la première étape de la diffusion d'une culture "ALARA" ou culture du "risque résiduel", qui représente l'assise du développement de comportements responsables des individus pour gérer le risque radiologique.

L'adoption du principe d'optimisation se traduit par la mise en oeuvre d'une démarche prédictive et analytique pour :

- identifier les activités donnant lieu à des expositions,
- évaluer les expositions collectives (niveaux d'exposition individuels et nombre de personnes exposées) associées aux activités,
- identifier les options de protection possibles,
- quantifier ces options sur les plans dosimétrique et économique,
- sélectionner les options compatibles avec les contraintes économiques et sociales dans le cadre d'un processus impliquant les divers acteurs concernés.

La formalisation de cette démarche prédictive est appelée procédure d'optimisation ou procédure ALARA [27] et est présentée en Figure 2. Le système de valeurs monétaires de l'unité de dose collective est un outil indispensable à la mise en oeuvre de la procédure ALARA lors de la sélection des options optimales.

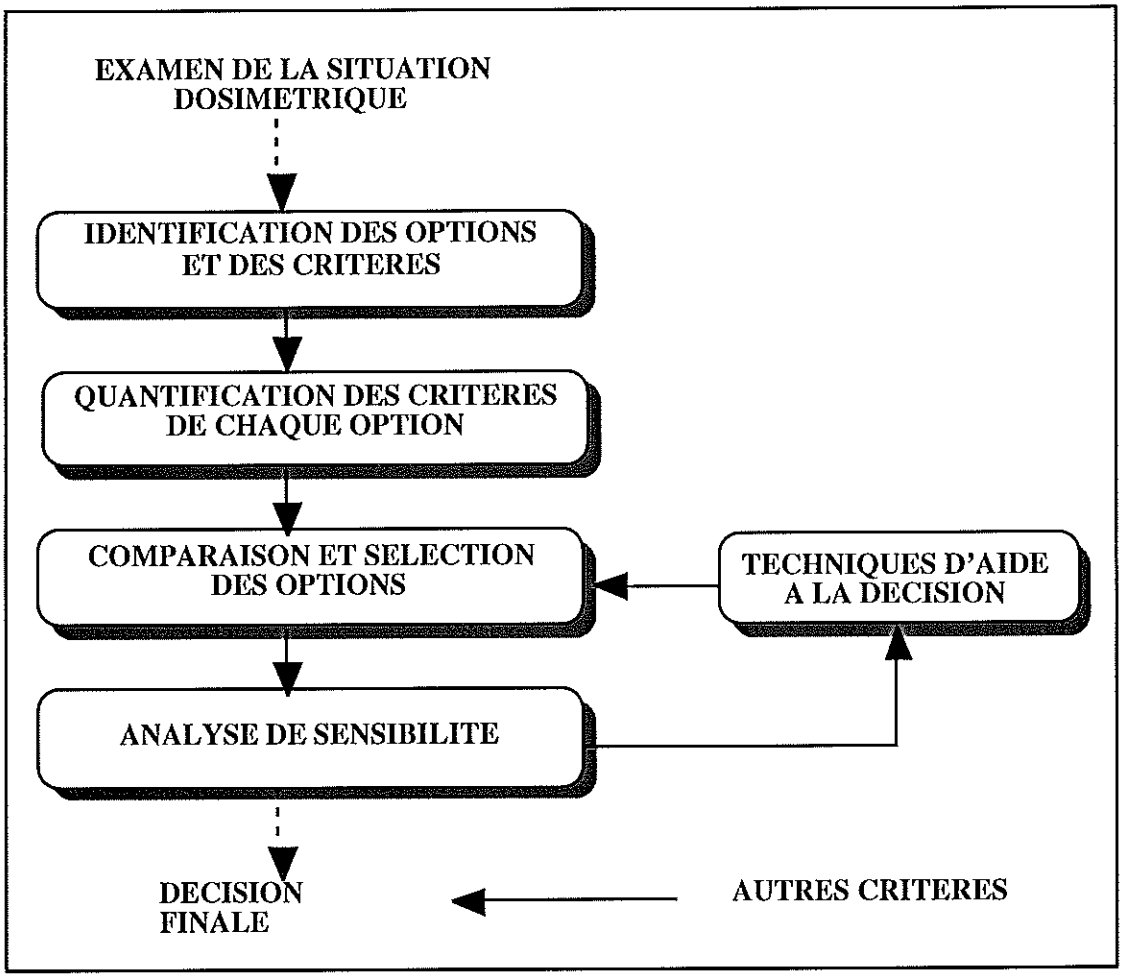

Figure 2. La procédure ALARA

La procédure d'optimisation est une démarche d'aide à la décision pour éclairer les choix d'options de radioprotection. D'autres critères non quantifiables peuvent être pris en compte dans la décision finale. Ainsi, les options considérées comme optimales par l'application stricte de la procédure ne seront pas nécessairement celles retenues par le décideur car ce dernier prendra également en compte d'autres critères non quantifiables tels que la faisabilité technique ou la sûreté de l'installation.

1.3. Le principe de limitation

Etant donné la présence d'un seuil d'apparition des effets déterministes, la gestion du risque pour ce type d'effet est finalement très simple à mettre en œuvre : la fixation d'une limite de dose individuelle inférieure aux valeurs seuils d'apparition des effets déterministes est suffisante pour garantir la non apparition de ces effets dans des

conditions normales d'exploitation. Dans la pratique, il convient alors de dimensionner les sources et les protections de telle sorte que les expositions résultantes restent inférieures aux valeurs fixées. La traduction dans des textes réglementaires de cette approche ne pose pas de difficultés particulières et il est alors possible de développer une démarche classique de prévention des risques qui vise à éliminer toutes les situations susceptibles de conduire à un dépassement des limites réglementaires. Dans un tel contexte, seuls des accidents peuvent être à l'origine d'expositions impliquant des effets déterministes.

Dans le cadre de la gestion des effets stochastiques, la limite se fonde sur des considérations relatives à l'acceptabilité du risque résiduel. Etant donné l'hypothèse prudente d'une relation dose/effet sans seuil, la limite ne peut plus être la garantie que des effets n'apparaîtront pas, mais elle assure que le risque résiduel peut être considéré comme supportable compte tenu du contexte économique et social. Ainsi, dans sa Publication 60 [17], la CIPR précise les fonctions relatives des concepts de limite et d'optimisation pour la gestion des effets stochastiques en les articulant dans le modèle dit de la "tolérabilité du risque" La limite d'exposition est définie comme la frontière entre le niveau de risque jugé "inacceptable" et celui qui est "tolérable" :

- "L'exposition des individus qui résulte de la combinaison des pratiques impliquées doit être soumise à des limites de dose ou à une certaine maîtrise du risque dans le cas des expositions potentielles. Ces limites ont pour but d'assurer qu'aucun individu n'est exposé à des risques radiologiques jugés inacceptables dans le cadre de ces pratiques, dans des circonstances normales. Toutes les sources ne sont pas susceptibles d'être maîtrisées par des actions au niveau de la source et il est donc nécessaire de spécifier les sources qui doivent être prises en compte avant de fixer une limite de dose."

Le respect de la limite garantit donc à l'individu que non seulement il ne subira aucun dommage de type déterministe, mais qu'en plus sa probabilité de développer à terme un cancer radio-induit est socialement tolérable si l'on compare cette probabilité avec celles associées à d'autre risques de nature industrielle ou technologique.

Dans le domaine du risque "tolérable", il convient d'introduire une distinction supplémentaire entre les situations qui ne sont pas réellement satisfaisantes mais considérées néanmoins comme "tolérables" et celles qui sont non seulement "tolérables" mais également "acceptables" c'est-à-dire les situations pour lesquelles la protection est optimisée. L'ensemble du modèle est schématisé sur la Figure 3.

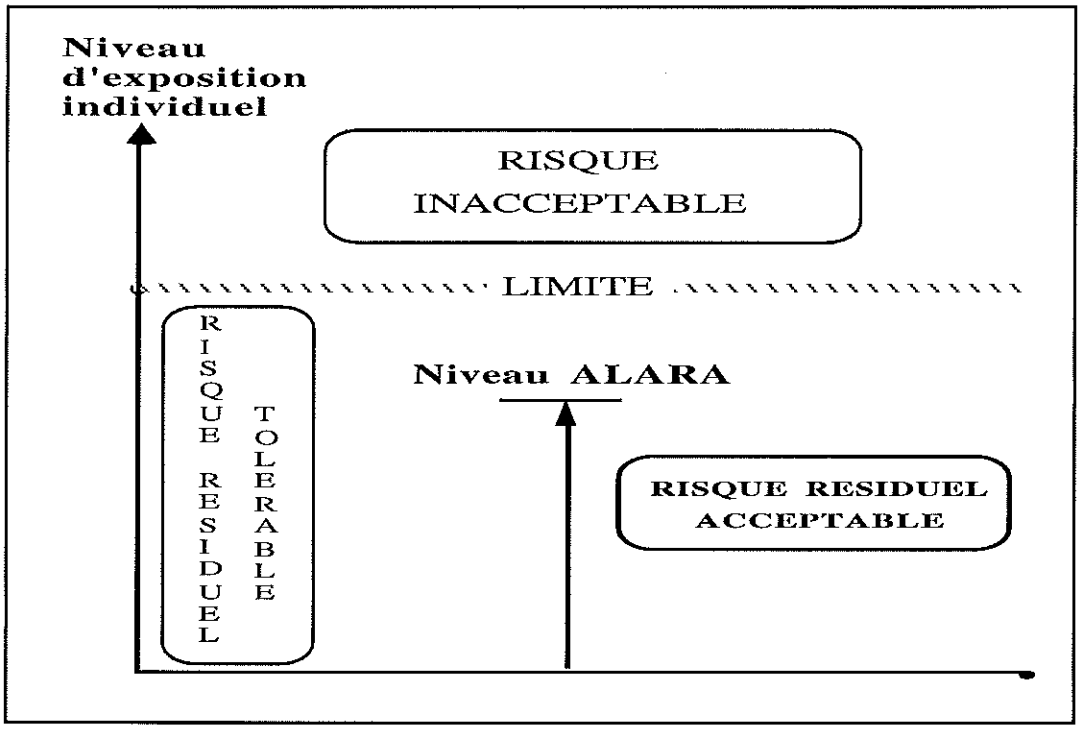

Figure 3. Le modèle d'acceptabilité du risque

Les limites de dose recommandées par la CIPR 60 [17] pour la protection des individus contre les effets déterministes et la gestion des effets stochastiques sont présentées dans les tableaux suivants.

Tableau 1. Limites de dose recommandées par la CIPR 60 pour les effets déterministes

Organe ou tissu	Limite de dose équivalente annuelle pour les travailleurs[2]
• Cristallin	150 mSv
• Peau	500 mSv
• Mains et pieds	500 mSv

[1] Les limites sont fixées pour les organes les plus radiosensibles et s'appliquent à la somme des doses provenant d'expositions externes durant la période indiquée, et de la dose engagée sur 50 ans provenant d'incorporations pendant la même période.

[2] Les limites s'appliquent à la somme des doses provenant d'expositions externes durant la période indiquée, et de la dose engagée sur 50 ans provenant d'incorporations pendant la même période.

Tableau 2. Limites de dose recommandées par la CIPR 60 pour les effets stochastiques

Organe ou tissu	Limite de dose équivalente annuelle pour les travailleurs[2]
Corps entier	20 mSv par an, en moyenne sur des périodes déterminées de 5 ans[3]

[3] A la condition supplémentaire que la dose efficace ne dépasse pas 50 mSv pour une année donnée.

2. RECOMMANDATIONS DE LA CIPR

2.1. Introduction

Les objectifs de la surveillance ont trait, d'une part, à la gestion des expositions et, d'autre part, à l'estimation *a posteriori* des doses reçues.

La gestion des expositions permet l'optimisation des expositions résultant du fonctionnement normal, par une estimation prédictive réaliste des expositions individuelles et collectives permettant l'identification des sources principales d'exposition et le choix des actions de protection optimales. Elle permet également la réduction des expositions pouvant résulter du fonctionnement dégradé ou incidentel des installations, par la détection au plus tôt des incidents et la décision d'éventuelles actions correctrices.

L'estimation *a posteriori* des doses reçues permet quant à elle la vérification du respect des limites de doses individuelles réglementaires ainsi que la quantification et l'archivage du niveau d'exposition des travailleurs pouvant être utiles dans des contextes d'études épidémiologiques ou d'éventuelles demandes de compensation pour maladies professionnelles.

Les principes de surveillance pouvant être mis en oeuvre sont multiples et pourront varier en fonction des objectifs visés et des circonstances particulières d'exposition.

La stratégie de surveillance pourra en effet combiner des principes de surveillance collective ou individuelle, effectués de façon habituelle (surveillance de routine), de façon générique (surveillance d'opérations usuelles) ou de façon plus ponctuelle.

Les moyens de surveillance utilisés dépendront largement des principes de surveillance retenus. Ainsi, la surveillance collective s'appuiera généralement sur des appareils de prélèvement d'air plus ou moins représentatifs de l'air respiré par les travailleurs. La surveillance individuelle s'appuiera quant à elle plus particulièrement sur les équipements individuels de prélèvement d'air portés par les travailleurs ainsi que sur les mesures de rétention corporelle et d'excrétion des matières radioactives.

Ce chapitre présente les recommandations de la CIPR relatives aux principes fondamentaux de surveillance, exposées dans les publications 35, 54 et 60 ([23], [21] et [17]). L'annexe du rapport présente, à titre d'exemple, une description des principes et stratégies de surveillance proposés dans les réglementations françaises, helvétiques, et des Etats Unis.

2.2. La publication CIPR 35

La CIPR 35 [23], publiée en 1982, définit les principes généraux de surveillance pour la radioprotection des travailleurs. Cette publication révise la CIPR 12, publiée en 1968, afin de mettre ses recommandations en cohérence avec celles de la CIPR 26 [25], publiée en 1977.

2.2.1. Les recommandations de la commission

2.2.1.1. Limites d'équivalents de dose

Les limites primaires d'équivalent de dose recommandées par la commission pour les effets non stochastiques font référence à la somme de l'équivalent de dose délivré à un organe ou un tissu dû à l'irradiation externe pendant une année et de l'engagement d'équivalent de dose résultant de l'incorporation de radionucléides au cours de cette même année.

En pratique, on utilise, en lieu et place des limites primaires, les deux limites secondaires relatives à l'irradiation externe (limite annuelle pour les équivalent de dose en profondeur et superficiel) ainsi que la limite secondaire pour l'incorporation de radionucléides, la limite annuelle d'incorporation (LAI).

2.2.1.2. Classement des travailleurs

Les recommandations de la CIPR 35 reprennent les propositions de la CIPR 26 [25], en matière de classement des travailleurs en deux catégories A et B en fonction de leurs conditions d'exposition potentielles :

- Les conditions de travail de la catégorie A sont telles que les équivalents de dose annuels pourraient dépasser 3/10 de la limite annuelle.

- Les conditions de travail de la catégorie B correspondent à des situations d'exposition au cours desquelles il est très improbable que les équivalents de dose annuels puissent dépasser 3/10 de la limite annuelle.

Ces définitions sont associées à la possibilité d'atteindre un niveau d'exposition et non aux niveaux d'exposition réellement atteints. La grande majorité des niveaux d'exposition des travailleurs de catégorie A sont donc, en pratique, bien inférieurs aux 3/10 de la limite annuelle.

Un des buts de cette classification est de simplifier les procédures de contrôle :
Pour les travailleurs de la catégorie A (contrairement à ceux de la catégorie B), la CIPR 35 considère que les limites d'équivalent de dose ne peuvent pas être respectées, ou leur respect démontré, sans recourir à des moyens de surveillance individuelle. Elle remarque par ailleurs que la surveillance individuelle des travailleurs de catégorie B peut quelquefois être effectuée afin de confirmer que les conditions de travail sont satisfaisantes ou pour le recueil de données statistiques sur la distribution des doses.

2.2.1.3. Limite dérivée

Une limite dérivée est une limite associée à des quantités autres que l'équivalent de dose, l'engagement d'équivalent de dose ou l'incorporation, qui, par l'utilisation d'un modèle adapté, est sensée refléter les limites fondamentales dans le cadre de conditions de travail particulières. Une telle limite peut établir un lien quantitatif entre les quantités mesurées par le programme de surveillance et les limites d'équivalents de dose ou les limites annuelles d'incorporation recommandées par la Commission.

Lors de l'établissement d'une limite dérivée, le but devrait être de fixer une valeur telle que son respect assurera de façon quasi certaine le respect des limites primaires recommandées par la Commission ou des contraintes dosimétriques obtenues comme résultat d'une procédure d'optimisation.

De plus, alors que le non-respect d'une limite dérivée n'impliquera pas nécessairement des équivalents de dose dépassant les limites annuelles, la conduite des opérations devrait être effectuée dans l'intention de ne pas les dépasser. Des résultats supérieurs à la limite dérivée constituent donc une défaillance du système de protection et devraient être suivis, dans la mesure du possible, d'actions correctrices.

2.2.1.4. Niveaux de référence

Un niveau de référence est une valeur prédéfinie de l'une des quantités qui peuvent être rencontrées dans un programme de radioprotection qui, si elle est dépassée, de façon réelle ou supposée, nécessitera la mise en oeuvre d'actions particulières.

Les formes les plus habituelles de niveaux de référence introduites par la CIPR 26 [25] sont les niveaux d'enregistrement, d'investigation et d'intervention.

Niveau d'enregistrement

Le niveau d'enregistrement est le niveau au dessus duquel le résultat d'un programme de surveillance présente suffisamment d'intérêt pour être conservé. La commission a recommandé que ce niveau, en ce qui concerne la surveillance individuelle, soit fondé sur le 1/10 de la fraction de limite annuelle correspondant à l'intervalle de temps auquel la mesure de surveillance individuelle se réfère.

La mise en oeuvre de l'optimisation de la radioprotection peut justifier des niveaux d'enregistrement inférieurs à ceux recommandés par la commission, dans le but d'estimer l'exposition collective. Des valeurs inférieures peuvent être également appropriées en raison de considérations particulières telles que les relations publiques ou le recueil de données à caractère scientifique.

L'utilisation d'un niveau d'enregistrement signifie que tout résultat d'un programme de surveillance inférieur au seuil d'enregistrement peut être abandonné et devrait être considéré comme égal à zéro lors de l'estimation de l'équivalent de dose annuel à des fins de radioprotection. Un tel résultat peut être simplement mémorisé dans les fiches individuelles de suivi dosimétrique comme inférieur au seuil de détection.

Niveau d'investigation

Le niveau d'investigation est la valeur d'équivalent de dose ou d'incorporation associé à une mesure particulière au dessus de laquelle le résultat est jugé suffisamment important pour justifier des investigations supplémentaires.

La commission a recommandé qu'il était souvent approprié de fonder le niveau d'investigation pour la surveillance individuelle sur les 3/10 de la fraction de limite annuelle correspondant à l'intervalle de temps auquel la mesure de surveillance

individuelle se réfère. Pour d'autres types de surveillance, le niveau d'investigation dépendra des objectifs du programme de surveillance et du type d'investigation devant être conduite.

L'objectif de la fixation d'un niveau d'investigation est d'assurer que les niveaux d'exposition seront certainement inférieurs aux 3/10 de la fraction de limite annuelle correspondant à la période de mesure, sans pour cela nécessiter une interprétation détaillée des résultats.
Le concept de niveau d'investigation peut être également utile dans certains programmes de surveillance où des variations des niveaux mesurés, même si ceux-ci sont bien inférieurs à la limite dérivée, peuvent être importants pour identifier à la fois des défaillances des systèmes de contrôle et la détérioration des procédures d'exploitation.

Les investigations faisant suite au dépassement d'un tel niveau consisteront souvent en la simple reconnaissance des circonstances du dépassement, mais pourront aller jusqu'à une enquête approfondie des causes et des conséquences d'un tel dépassement.

Niveau d'intervention
Le niveau d'intervention est une valeur prédéfinie d'un résultat de surveillance pour lequel, si cette valeur n'est pas atteinte, de façon réelle ou supposée, il est très improbable qu'une intervention sera nécessaire afin de porter remède à une situation d'exposition détériorée ou apparemment inacceptable.

2.2.2. Les méthodes de surveillance

La CIPR 35 présente de façon séparée la surveillance des conditions d'exposition par les moyens collectifs de mesure de la contamination de l'air, et la surveillance des incorporations individuelles par les moyens individuels de mesure de la contamination de l'air ainsi que par les examens biologiques. Elle distingue par ailleurs, dans chacun de ces deux cas, les fonctions de surveillance de routine, de surveillance opérationnelle, et de surveillance spéciale.

La surveillance de routine est associée aux opérations effectuées de manière habituelle, la surveillance opérationnelle a pour but d'obtenir de informations sur une opération particulière, et la surveillance spéciale est effectuée dans le cadre de situations de fonctionnement anormal, réelles ou supposées.

2.2.2.1. *Surveillance de l'environnement de travail*

Surveillance de routine

La surveillance de routine a pour but de montrer que l'environnement de travail associé aux opérations normales est satisfaisant, et qu'aucun changement n'est intervenu qui rendrait nécessaire une nouvelle évaluation des procédures d'exploitation. Ce type de surveillance est donc utilisée essentiellement dans un but de confirmation mais peut également comporter l'utilisation de dispositifs permettant de détecter la survenue de conditions anormales ou d'incidents.

Surveillance opérationnelle

La surveillance opérationnelle a pour but la vérification d'une opération particulière et, si nécessaire, de fournir les éléments de décision permettant d'agir immédiatement sur la conduite de l'opération. Elle est particulièrement appropriée au contrôle de procédures à court-terme effectuées dans des conditions qui ne pourraient être satisfaisantes dans le cadre d'une utilisation à long-terme. Il n'y a pas de séparation absolue entre la surveillance de routine et la surveillance opérationnelle car un environnement de travail comprend les opérations qui y sont menées, mais il y a en pratique une différence de fonction suffisante pour justifier cette distinction.

Surveillance spéciale

La surveillance spéciale peut concerner une situation de l'environnement de travail pour laquelle les informations ne sont pas suffisantes pour assurer un contrôle adéquat, ou bien une opération menée dans des circonstances anormales, qui peuvent inclure des accidents réels ou supposés. Cette surveillance a pour but de fournir des informations détaillées permettant d'élucider les problèmes et de définir de futures procédures. Tout programme de surveillance spéciale devrait donc avoir une durée limitée ainsi que des objectifs précis, et devrait être remplacée par une surveillance de routine ou opérationnelle dès lors que ses objectifs ont été atteints.

2.2.2.2. *Surveillance individuelle*

La notion de surveillance individuelle est associée aux mesures effectuées par des équipements individuels portés par les travailleurs ainsi qu'aux mesures de rétention corporelle et d'excrétion des matières radioactives, ainsi qu'à leur interprétation.

L'objectif principal d'une telle surveillance est l'estimation de l'équivalent de dose moyen et de l'équivalent de dose efficace dans les tissus exposés. Cette information est utile à la limitation des doses individuelles reçues par les travailleurs ainsi que pour la démonstration du respect du système de limitation recommandé par la Commission.

Ce but est le plus souvent atteint de façon indirecte par la mesure de quantités qui peuvent être reliées de façon suffisamment précise aux équivalents de dose en profondeur et superficiels, à l'équivalent de dose engagée délivré à certains tissus, à l'incorporation de radionucléides ou, dans certains cas, à la rétention corporelle de radionucléides.

Les résultats de la surveillance individuelle peuvent être utilisés pour fournir des informations relatives à l'environnement de travail et, avec des méthodes de surveillance individuelle suffisamment peu coûteuses et faciles à interpréter, ces résultats pourront souvent fournir un moyen simple de vérifier que les conditions générales de travail font l'objet d'un contrôle satisfaisant ou d'établir si des changements de procédure d'exploitation ont conduit à une amélioration ou une dégradation des conditions de travail.

Surveillance de routine

La surveillance individuelle de routine est constituée par des mesures continues ou répétées effectuées sur un même travailleur.

Si les estimations des équivalent de dose ou des incorporation annuelles sont bien en dessous des limites d'équivalent de dose ou des limites annuelles d'incorporations recommandées par la Commission, il sera souvent suffisant d'évaluer la limite supérieure de ces estimations plutôt que leurs valeurs véritables, et d'évaluer leur importance par l'utilisation de niveaux d'investigation.

Néanmoins, comme une telle procédure d'estimation peut conduire à une surestimation de l'équivalent de dose délivré aux travailleurs surveillés par cette méthode, cette limitation dans la précision de l'évaluation devrait être présente à l'esprit dans le cas où les résultats de la surveillance individuelle de routine seraient utilisés à des fins d'optimisation des expositions.

Enfin, dans le cas où les techniques de surveillance individuelle ou l'instrumentation ne sont pas capables de permettre l'évaluation des équivalents de dose ou des incorporations individuelles avec une précision suffisante, des programmes de surveillance de l'environnement de travail peuvent devoir être mis en place afin de fournir des estimations des indicateurs individuels d'exposition.

Surveillance opérationnelle

La surveillance individuelle opérationnelle, c'est à dire la surveillance individuelle au cours d'une opération particulière, peut contribuer de façon significative aux programmes de surveillance opérationnelle, surtout si les appareils utilisés comportent des fonctions de lecture directe ou d'alarme. Cependant, une telle surveillance est limitée dans le temps et ne sera mise en oeuvre que pour une opération particulière, ou une série d'opérations. Dans certaines situations, enfin, il peut être utile d'entreprendre une surveillance individuelle opérationnelle de façon à établir l'éventuelle nécessité d'une surveillance individuelle de routine.

Surveillance spéciale

La surveillance individuelle spéciale devrait être mise en oeuvre dans le cas de circonstances de fonctionnement anormal, réel ou supposé, ainsi que dans les cas d'accidents.

2.2.3. Critères de sélection des travailleurs justifiant une surveillance individuelle de la contamination interne

La CIPR 35 propose de répartir les situations d'exposition en fonction de la fréquence des événements de contamination de la manière suivante :

a. Contamination variable, mais essentiellement continue, résultant du fonctionnement normal

Dans cette situation, la source d'information principale réside dans les résultats des programmes de surveillance de l'air.

Si les mesures sont effectuées dans la zone respiratoire des travailleurs, les incorporations individuelles seront distribuées autour de la moyenne en fonction essentiellement des différences d'opérations et d'habitudes des travailleurs.

La CIPR 35 considère que si le programme de surveillance de l'air a été bien conçu et implémenté, on peut établir, au moyen de programmes de surveillance opérationnelle ou spéciale, qu'il est peu probable que l'incorporation annuelle d'un travailleur soit supérieure à trois fois la valeur moyenne de l'incorporation du groupe de travailleurs.

Donc, si la moyenne annuelle des résultats de la surveillance de l'air dans la zone respiratoire des travailleur est inférieure au 1/10 de la LDCA, la CIPR 35 considère que l'incorporation des travailleurs a très peu de chance d'être supérieure à 3/10 de la LAI, et que la surveillance individuelle ne sera pas nécessaire de façon permanente.

b. Contamination discontinue, mais relativement fréquente, résultant d'incidents mineurs
Dans cette situation, les sources de contamination sont moins bien identifiées que dans la situation précédente, et les résultats de la surveillance de l'air sont habituellement obtenus dans l'atmosphère générale des postes de travail, plutôt que directement dans la zone respiratoire.

La CIPR 35 considère qu'il y a typiquement un ordre de grandeur entre les moyennes à long terme de ces mesures avec la moyenne à long terme des résultats des systèmes de prélèvement d'air individuels.

Elle conclut donc que si la moyenne à long terme des résultats de la surveillance de l'air est inférieure à 1/30 de la LAI, l'incorporation des travailleurs a peu de chance d'être supérieure à 1/3 de la LAI, et la surveillance individuelle ne sera pas nécessaire de façon permanente.

c. Evénements très peu fréquents, habituellement aléatoires
Dans cette dernière situation, l'estimation de la probabilité de dépasser 3/10 de la LAI ne peut reposer sur les résultats passés mais doit faire l'objet d'une estimation particulière, fondée sur un examen général des opérations, à la lumière de l'expérience. Si cette estimation confirme que cette probabilité est suffisamment faible, la surveillance individuelle peut ne pas être nécessaire. Un tel programme de surveillance individuelle peut néanmoins s'avérer nécessaire à la suite de la détection d'un incident de fonctionnement, cet incident pouvant être détecté par le système de surveillance des postes de travail, ou découler directement de la situation opérationnelle.

Si, dans les deux premières situations, les résultats de la surveillance de l'air suggèrent que l'incorporation de certains travailleurs pourrait excéder le 1/30 de la LAI, il sera nécessaire d'évaluer les expositions individuelles avec plus d'attention.

Ceci n'implique pas nécessairement le recours à la surveillance individuelle. Une étude expérimentale - pendant une durée limitée - comportant un échantillonnage d'air plus étendu et, si possible, une part de surveillance individuelle, donnera souvent une

information suffisante à une meilleure interprétation des résultats de la surveillance de l'air, et donc de meilleurs éléments de décision quant à la nécessité d'un programme de surveillance individuelle de la contamination interne.

2.2.4. Surveillance de la contamination de l'air

La forme la plus courante de surveillance de la contamination de l'air consiste à placer des échantillonneurs dans une sélection d'emplacements destinés à être représentatifs de la zone respiratoire des travailleurs. Plus rarement, il est nécessaire de rendre les échantillons plus représentatifs en utilisant des systèmes individuels de prélèvement d'air.

Dans certaines circonstances, où la contamination apparaît régulièrement et découle d'opérations de fonctionnement normal, il est approprié d'effectuer des études détaillées de la contamination de l'air en des points représentatifs de la zone respiratoire des travailleurs à différentes étapes de ces opérations et d'estimer par la suite l'incorporation totale de chaque travailleur pour un cycle complet d'opérations.

Afin de détecter une contamination atmosphérique inattendue, il peut être nécessaire d'utiliser des appareils de prélèvement d'air continus qui peuvent donner l'alarme en cas de changement soudain de concentration. Il n'est pas facile d'associer l'importance de telles variations avec l'exposition d'un travailleur individuel, et il est important de localiser ces appareils à des endroits où ils peuvent détecter de façon fiable un rejet de matières radioactives, plutôt que dans une position où ils seraient représentatifs de la zone respiratoire.

Etudes opérationnelles

Si les cycles étudiés peuvent être considérés comme représentatifs des opérations de fonctionnement normal sur une période prolongée, une estimation de l'incorporation totale du travailleur peut être réalisée sur une période appropriée.

Echantillonneurs d'ambiance

Les échantillonneurs d'ambiance, même s'ils sont situés dans la zone respiratoire des travailleurs peuvent ne pas toujours représenter de façon adéquate l'incorporation de chaque travailleur individuel.

Ceci est particulièrement vrai dans le cas où les sources de contamination sont localisées et variables dans le temps, ou dans le cas où la distribution de la granulométrie n'est pas

uniforme. C'est particulièrement le cas de certains radionucléides pour lesquels quelques particules dans le volume échantillonné peuvent représenter une large fraction de la LAI après la mise à l'échelle avec le débit respiratoire des travailleurs.

Dans ces cas, la représentativité des échantillons est très dépendante des taux d'échantillonnage, des particularités de sélection en granulométrie de l'appareil de prélèvement d'air, et des mouvements du travailleur au poste de travail. Une mesure du manque de représentativité devrait donc être obtenue par comparaison avec les résultats à long-terme de la surveillance par appareil de prélèvement d'air individuel, ou par d'autres moyens. En général, si la principale source de contamination résulte de l'action du travailleur, des facteurs importants seront trouvés.

Alors que la comparaison de ces deux méthodes de surveillance de l'air est satisfaisante pour l'interprétation à long-terme des résultats moyens, elle n'est pas appropriée à l'interprétation des résultats isolés d'échantillons associés à un poste horaire ou moins. Pour des échantillons de si courte durée, les résultats des appareils de prélèvement d'air individuel peuvent différer de ceux des échantillonneurs d'ambiance par deux ou trois ordres de grandeur. Il n'est pas possible dans ces conditions d'interpréter les résultats à court terme des échantillonneurs d'ambiance en termes d'incorporations individuelles des travailleurs. Il est donc nécessaire dans ce cas d'établir un niveau d'investigation suffisamment bas pour détecter les anomalies significatives mais suffisamment élevé pour ne pas être atteint trop souvent en fonctionnement normal.

Echantillonneurs individuels

Si les moyennes à long terme des résultats des échantillonneurs d'ambiance dépassent les limites dérivées appropriées ou les limites autorisées, ou si le niveau d'investigation des échantillons isolés est fréquemment dépassé, il peut être nécessaire, afin de déterminer l'exposition des travailleurs de façon plus précise, de prélever des échantillons qui soient beaucoup plus représentatifs de la zone respiratoire des travailleurs. Le moyen de mesure le plus efficace est alors l'échantillonneur individuel, à moins que les expositions soient essentiellement continues et prévisibles.

Cependant, les échantillonneurs individuels ont un faible taux de prélèvement et les résultats isolés d'un poste horaire, ou même d'une semaine, sont très sensibles au biais résultant du prélèvement d'une seule particule non représentative. Cet effet est beaucoup moins important dans le cas des moyennes à long terme des résultats et il est approprié de comparer ces moyennes à long terme avec les limites secondaires associées à l'air inhalé.

Néanmoins, ceci ne fournit qu'un contrôle à long terme après l'événement, alors que la situation rendant nécessaire l'utilisation d'échantillonneurs individuels est souvent telle que l'identification du besoin d'une action correctrice à court terme est plus importante que l'estimation des moyennes à long terme. Il est donc nécessaire d'utiliser les résultats d'échantillons isolés, bien qu'ils puissent ne pas être représentatifs de l'air inhalé.

2.2.5. Surveillance individuelle de la contamination interne

2.2.5.1. Conception d'un programme de surveillance

Les programmes de surveillance de la contamination interne sont habituellement limités par les coûts en main d'oeuvre scientifique et technique, ainsi que par les coûts d'équipement, et il est par conséquent important de sélectionner de façon appropriée les travailleurs devant faire l'objet d'une surveillance individuelle (Cf. supra).

L'expérience a montré que la surveillance individuelle de routine de la contamination interne est presque toujours nécessaire dans les conditions de travail suivantes :

- Transformation d'uranium naturel et enrichi et fabrication de combustible nucléaire dans des conditions de contamination fréquente des postes de travail.
- Extraction et raffinage de l'uranium.

<u>Surveillance spéciale</u>

La surveillance individuelle spéciale devrait être mise en oeuvre quand les résultats de la surveillance de la contamination de l'air indiquent que des incorporations importantes peuvent avoir eu lieu, ou quand des travailleurs ont été associés à des incidents pouvant avoir induit des incorporations importantes de composés radioactifs. De simples tests de contamination de la peau ou d'excrétion nasale pourront quelquefois éviter la nécessité d'études immédiates plus détaillées.

Les résultats de la surveillance individuelle spéciale peuvent être utilisés dans le but d'étudier le métabolisme des radionucléides chez l'homme. Cet objectif justifiera souvent des mesures effectuées à des niveaux d'activité corporelle inférieurs à ceux directement concernés par la surveillance individuelle. Ce type d'étude devrait être encouragé.

Choix des méthodes de surveillance

Les deux méthodes de surveillance de la contamination interne sont l'estimation, au moyen de mesures externes, de la rétention des radionucléides dans le corps ou les tissus, et l'analyse d'excréta ou d'échantillons de fluides corporels.

Le choix entre les deux méthodes est en grande partie déterminé par les rayonnements émis par le composé contaminant. En général, des mesures directes telles que le comptage du corps-entier, des poumons ou de la thyroïde sont appropriées aux émetteurs de rayonnement gamma et de rayons X, alors que pour les autres émetteurs, l'analyse du rayonnement de freinage ou celle d'échantillons biologiques est la seule méthode possible.

Un autre facteur à prendre en compte est la facilité d'accès du service de surveillance. Si ce service est fourni de façon centralisée, il peut être plus facile d'expédier les échantillons à analyser que d'envoyer les travailleurs à l'endroit où sont situés les appareils de mesure.

Fréquence des mesures de routine

Les facteurs les plus importants qui influencent la fréquence des examens de routine sont la forme de la distribution dans le temps des incorporations de composés radioactifs, le temps de résidence du contaminant dans le corps, et le niveau du seuil de détection par rapport aux niveaux dérivés d'investigation et d'enregistrement.

Si des mesures de routines sont nécessaires et sont mises en oeuvre de façon à estimer les incorporations ou les équivalents de dose individuelle annuelles, elles devraient être espacées de façon à ce que toute incorporation significative soit détectée.

Pour les composés de très faible demi-vie effective, tels que des composés insolubles dans l'appareil gastro-intestinal, la surveillance de routine devrait être si fréquente qu'elle en serait impossible. Un contrôle adéquat peut être maintenu dans ce cas par le programme de surveillance de la contamination de l'air.

Pour les composés de longue demi-vie effective, la rétention associée à l'incorporation d'une LAI est couramment bien inférieure aux seuils de détection associés aux techniques de mesures externes ou d'analyse des échantillons biologiques. L'intervalle entre les mesures est alors gouverné par la nécessité d'effectuer une vérification périodique de l'accumulation à long-terme dans le corps de composés radioactifs. Il n'y a pas de méthode pratique de surveillance individuelle de routine pour les composés à longue demi-vie effective qui puisse être utilisée pour la détection précoce de conditions de travail

dégradées. Pour une telle détection, un programme de surveillance de la contamination de l'air est nécessaire.

Dans certaines situations, l'estimation des incorporations et des équivalents de dose associés n'est plus nécessaire une fois que des conditions de travail satisfaisantes ont été établies et peuvent être vérifiées par une surveillance de routine de la contamination de l'air. De plus, une détérioration lente des conditions de travail peut être détectée par la réalisation ponctuelle de mesures ou le prélèvement d'échantillons appropriés. Ces mesures ne sont pas destinées à l'évaluation des doses individuelles et leur fréquence est déterminée par les conditions de travail.

2.2.5.2. Interprétation des résultats

Surveillance de routine

Puisque la surveillance individuel de routine est conduite à des intervalles qui ne sont pas nécessairement reliés à des circonstances d'incorporation connues, il est nécessaire de faire l'hypothèse d'un profil d'incorporation afin d'établir un modèle dosimétrique de référence.

A des fins de surveillance de routine, les estimations peuvent être fondées sur une hypothèse d'exposition continue uniforme ou bien faire l'hypothèse d'une incorporation isolée s'étant produite au milieu de l'intervalle de surveillance.

Quant les mesures associées à la surveillance individuelle de routine sont effectuées à des intervalles presque réguliers, le niveau d'investigation peut être défini comme l'incorporation correspondant à 0,3 /N de la LAI recommandée, où N est égal au nombre annuel d'intervalles de surveillance. Bien que dans la pratique les incorporations soient rarement continues, et puissent se produire à tout instant entre deux mesures, cette procédure pourra être utilisée, dans la plupart des situations, pour l'estimation à long-terme de l'incorporation moyenne.

Si des informations relatives au profil d'incorporation sont disponibles, des calculs plus précis doivent être effectués en utilisant les fonctions d'excrétion appropriées, mais ceux-ci ne sont indispensables que dans le cas où une incorporation significative est suspectée.

Les niveaux d'enregistrement appropriés sont dans tous les cas égaux au tiers des niveaux d'investigation recommandés. Quand un résultat individuel est inférieur au seuil

d'enregistrement correspondant, il n'est pas nécessaire de calculer l'incorporation ou l'équivalent de dose engagée, et les résultats de surveillance individuelle inférieurs à ce seuil ne doivent pas nécessairement être consignés dans les fiches de suivi dosimétrique individuel.

Précision requise dans la surveillance de routine de la contamination interne

De façon idéale, les incertitudes associées à la surveillance individuelle de la contamination interne devraient être comparables à celles relatives à la surveillance de l'irradiation externe, soit 50% (à 95% de degré de confiance) pour des niveaux d'exposition de l'ordre de la limite annuelle, et 100% pour des niveaux de l'ordre du 1/5 de cette limite.

Cependant, des niveaux d'incertitude aussi faibles que 50% ne peuvent pas être atteints en pratique, en raison des incertitudes relatives au manque de connaissances sur les profils d'incorporation et de rétention, combinées aux incertitudes de mesure et il n'est pas approprié dans ces conditions de définir en termes généraux un objectif précis en la matière.

Il sera donc important, dans l'utilisation de ces mesures, et particulièrement dans l'information des personnel concernés à propos des incorporations et des équivalents de dose engagées, de ne pas sous-estimer les incertitudes.

Surveillance spéciale

Les méthodes d'interprétation utilisées dans ce cas sont les mêmes que celles utilisées pour la surveillance de routine mais une information plus précise sera généralement disponible quant au moment et aux circonstances de l'incorporation ainsi que, peut-être, sur la forme physico-chimique du composé radioactif impliqué.

Si elles s'avèrent disponibles, des données métaboliques individuelles devraient être utilisées en lieu et place du modèle standard pour calculer les LAI et pour estimer les équivalents de dose engagée dans les organes et les tissus, ainsi que l'équivalent de dose efficace engagée, pour une comparaison directe avec les limites primaires.

Les estimations ne devraient normalement pas reposer sur un seul type de surveillance, et l'estimation finale de la rétention corporelle ou de l'équivalent de dose aux tissus devrait prendre en compte toutes les données de surveillance disponibles, aussi bien individuelles que collectives.

2.3. La publication CIPR 54

La CIPR 54 [21], publiée en 1988, expose les recommandations de la CIPR relatives à la conception et à l'interprétation des programmes de surveillance individuelle de l'incorporation de radionucléides par les travailleurs. Elle révise la publication 10 de la CIPR, publiée en 1968, afin de la mettre en cohérence avec les recommandations générales de la CIPR 26 [25], publiée en 1977. Cette publication complète les principes généraux de surveillance de la radioprotection des travailleurs, exposés dans la CIPR 35 [23] en fournissant des recommandations supplémentaires relatives à la surveillance individuelle de l'incorporation des radionucléides.

Après un rappel général des méthodes de surveillance et des niveaux de référence pouvant être utilisés, la CIPR 54 présente tout d'abord de façon détaillée et par ordre de préférence les méthodes pouvant être mises en oeuvre pour la surveillance individuelle : mesures d'activité corporelle, analyse des excréta et autres matériaux biologiques, mesures par appareils de prélèvement d'air individuels.

Des éléments de réflexion relatifs à la conception d'un programme de surveillance sont ensuite exposés. Le problème du rapport existant entre la fréquence des mesures de surveillance de routine et le niveau d'incertitude acceptable dans les estimations dosimétriques est tout d'abord évoqué. Par ailleurs, les conditions d'utilisation de niveaux de référence dérivés sont étudiées dans les différents cas de la surveillance de routine, de la surveillance spéciale et opérationnelle, et de la surveillance confirmative.

Les conditions d'implémentation des programmes de surveillance sont ensuite présentées, en ce qui concerne notamment les actions à entreprendre en cas de dépassement des niveaux dérivés d'enregistrement et d'investigation, ainsi que les limites de l'utilisation des modèles dosimétriques standard.

Enfin, en supplément des informations relatives aux fonctions de rétention et d'excrétion précédemment évoquées, des informations qualitatives et quantitatives sur les moyens de surveillance pouvant être mis en oeuvre ainsi que sur les seuils de détection des examens biologiques sont fournies pour chacun des principaux radioéléments.

2.3.1. Les méthodes de surveillance

De la même manière que la CIPR 35, la CIPR 54 distingue la surveillance de routine, la surveillance opérationnelle, et la surveillance spéciale, respectivement associées à des conditions de surveillance continue des opérations, de surveillance d'une opération particulière, et de surveillance particulière déclenchée par la survenue d'un événement tel que la mise en évidence d'une perte de confinement par une alarme ou la reconnaissance de conditions anormales par un résultats inhabituel du programme de surveillance individuelle de routine.

Les surveillances opérationnelles et spéciales se réfèrent toutes deux à des événements de contamination distincts plutôt qu'à une exposition potentielle chronique, et sont traitées de façon similaire dans cette publication.

La CIPR 54 distingue de plus la surveillance confirmative qui vise à vérifier le caractère satisfaisant des conditions d'exposition de travailleurs qui ne sont pas supposés être exposés à des incorporations significatives de radionucléides.

2.3.2. Les niveaux de référence

La CIPR 54 fait référence aux mêmes niveaux d'investigation et d'enregistrement que la CIPR 35 en ce qui concerne la surveillance de routine et précise leurs valeurs dans le cas de la surveillance spéciale (et opérationnelle).

<u>Niveau d'investigation</u>

En ce qui concerne la surveillance de routine, le niveau d'investigation est égal à 3/10 de la fraction de limite annuelle d'incorporation correspondant à l'intervalle de surveillance et, pour N intervalles de surveillance annuels, le niveau d'investigation NI_r est donc donné par $NI_r = 3\ LAI / 10\ N$.

Pour d'autres type de surveillance, le niveau d'investigation dépendra des objectifs du programme et du type d'investigations en cours. Dans ce rapport, le niveau d'investigation pour la surveillance spéciale (et opérationnelle) est pris égal à 1/10 de la fraction de limite annuelle d'incorporation car il est peu probable que plus de quelques événements inhabituels concerneront une même personne au cours d'une année. Le niveau d'investigation NI_s est donc donné par $NI_s = LAI / 10$.

Niveau d'enregistrement

Pour la surveillance de routine, la Commission a recommandé que le niveau d'enregistrement soit égal au 1/10 de la fraction de limite annuelle d'incorporation correspondant à l'intervalle de surveillance et, pour N intervalles de surveillance annuels, le niveau d'enregistrement NE_r est donc donné par $NE_r = LAI / 10\ N$.

Dans ce rapport, le niveau d'investigation pour la surveillance spéciale (et opérationnelle) est pris égal à 1/30 de la fraction de limite annuelle d'incorporation et le niveau d'enregistrement NE_s est donc donné par $NE_s = LAI / 30\ N$.

Bien que la Commission recommande ces valeurs de niveaux d'enregistrement, il est nécessaire de considérer les objectifs secondaires du programme de surveillance et de vérifier que les résultats enregistrés sont appropriés à ces objectifs. De tels objectifs peuvent être liés au besoin d'enregistrement à des fins d'évaluation de la dose collective ou d'optimisation des expositions ou, pour les individus, au besoin de conserver la trace de données pouvant être nécessaires dans le cas de demande de compensation. La Commission reconnaît que de telles considérations peuvent justifier l'utilisation de niveaux d'enregistrement inférieurs à ceux recommandés de façon générale.

2.3.3. Les méthodes de surveillance individuelle

La surveillance individuelle de l'incorporation des radionucléides peut être réalisée par des mesures de l'activité corporelle, la surveillance des excréta, le prélèvement d'air par des échantillonneurs individuels, ou une combinaison de ces techniques. Les programmes de surveillance de routine n'utilisent généralement qu'un seul type de mesure, dès lors qu'une sensibilité suffisante peut être atteinte. Cependant, une seul type de mesure est possible pour certains radionucléides et une combinaison de techniques doit être employée pour d'autres, qui présentent à la fois des difficultés de mesure et d'interprétation.

Quand différentes méthodes de sensibilité appropriée sont disponibles, leur classement décroissant en termes de précision d'interprétation est le suivant : mesure d'activité corporelle, analyse d'excréta, et prélèvement d'air individuel. Les résultats de la surveillance de la contamination de l'air peuvent être quelquefois utilisés pour l'estimation des incorporations individuelles, mais les incertitudes sont considérables et, dans la plupart des cas, cette procédure n'est adéquate que lorsque les incorporations estimées sont bien inférieures au seuil d'enregistrement.

La surveillance spéciale comporte souvent, afin d'effectuer la meilleure évaluation d'une situation inhabituelle, l'utilisation de plusieurs techniques telles que la mesure de l'activité corporelle et des mesures d'excréta, ainsi que, dans certaines circonstances, le prélèvement d'air individuel.

2.3.3.1. Mesure de l'activité corporelle

Une grande sensibilité est rarement requise pour la surveillance des radionucléides émetteurs de rayonnements gamma. De tels émetteurs peuvent être détectés par des appareillages relativement simples, à des niveaux correspondant à de petites fractions des niveaux de référence dérivés.

L'avantage d'un équipement simple est de pouvoir être mis en oeuvre sur le lieu de travail, évitant ainsi le temps consacré à la visite d'un site de mesure éloigné. Les mesures peuvent être alors réalisées de façon plus fréquente de telle manière qu'une incorporation puisse être décelée peu de temps après sa survenue.

Cependant, des techniques de grande sensibilité sont nécessaires à la surveillance de quelques radionucléides qui présentent des difficultés de mesure aux niveaux de référence dérivés. C'est notamment le cas des radionucléides émetteurs alpha à longe demi-vie effective, tels que les isotopes de l'uranium.

2.3.3.2. Analyse des excréta et des autres matériaux biologiques

Dans certains cas, la surveillance des excréta peut être la seule technique de mesure pour les radionucléides qui n'ont pas d'émission gamma et ne présentent des émissions de photons qu'à basse énergie. Les programmes de surveillance utilisent le plus souvent le prélèvements d'urine, bien que les prélèvements fécaux puissent être utiles dans certaines circonstances, quand un composé est excrété de façon préférentielle dans les fèces, ou pour évaluer l'épuration pulmonaire d'un composé de faible solubilité.

En ce qui concerne la collecte des urines, il est souvent nécessaire d'évaluer l'activité totale excrétée par unité de temps dans l'urine sur la base de l'échantillon prélevé. Pour la plupart des analyses, une durée de collecte de 24 h est préférable mais, si cela n'est pas possible, on doit reconnaître que des échantillons collectés sur une durée plus restreinte peuvent ne pas être représentatifs.

L'analyse d'échantillons fécaux à des fins de surveillance de routine comporte une incertitude liée aux fluctuations journalières de l'excrétion fécale et, de façon idéale, la collecte devrait être effectuée sur plusieurs jours. Cependant, une telle collecte peut être difficile et l'interprétation peut devoir être fondée sur un échantillon unique.

La surveillance des excréta fécaux est souvent utilisée au cours d'investigations spéciales, particulièrement à la suite d'incorporation par inhalation, réelle ou suspectée, de composés moyennement (W) ou faiblement (Y) solubles. Dans de telles circonstances, la mesure des quantités journalières excrétées peut être utile dans l'évaluation de l'épuration pulmonaire et dans l'estimation de l'incorporation. Les résultats précoces peuvent être également utiles à l'identification des individus exposés.

L'interprétation de l'activité excrétée par unité de temps comporte des incertitudes considérables. En effet, les fonctions d'excrétions de nombreux radionucléides sont mal connues et peuvent présenter des variations importantes d'un individu à l'autre et même d'un jour à l'autre chez le même individu.

Pour les radionucléides à longue demi-vie effective, l'activité excrétée reflète l'accumulation à long-terme de radionucléides dans le corps et, dans le cas d'une exposition chronique au long de plusieurs années, l'activité excrétée peut être dominée par des incorporations s'étant produites bien avant la période de surveillance à laquelle l'échantillon se rapporte. Dans de tels cas, l'analyse des excréta peut ne pas pouvoir fournir l'information nécessaire à l'estimation de l'incorporation sur une période donnée. Elle peut néanmoins être utile pour estimer l'accumulation à long-terme des radionucléides dans le corps et fournir une valeur de comparaison pour les estimations d'incorporation obtenues par d'autres moyens de surveillance.

2.3.3.3. Mesures par appareils de prélèvement d'air individuels

Certains radionucléides présentent des difficultés de mesure particulières car il n'émettent par décroissance alpha, en faible abondance, que des photons de faible énergie, facilement atténués dans le corps.

Les appareils de prélèvement d'air individuels peuvent être utilisés dans les programmes de surveillance de routine pour évaluer l'incorporation de la plupart des isotopes de l'uranium, du thorium, et du plutonium, qui sont difficiles à mesurer par d'autres techniques. Ils peuvent être également utilisés pour déterminer, à la fin d'une période

d'exposition, si les conditions de travail ont été satisfaisantes, ou si un événement de contamination imprévu s'est produit.

L'activité collectée sur le filtre peut être mesurée à la fin de la période d'exposition par une technique simple et non-destructive, afin de fournir une alarme précoce en cas de survenue d'un événement imprévu. Les filtres peuvent être utilisés pendant une période plus longue, d'une semaine ou d'un mois, et l'activité du radionucléide déterminée par des techniques appropriées de séparation radiochimique et de mesure de haute sensibilité.

L'évaluation de l'incorporation sur la base de l'activité collectée par les filtres d'échantillonneurs individuels nécessite d'estimer dans quelle mesure les échantillons prélevés sont représentatifs de la concentration d'activité inhalée par le travailleur. En effet, les mesures de concentrations de l'air au cours d'une période d'échantillonnage peuvent varier d'un ordre de grandeur sur une distance d'un mètre, et les mouvements du travailleur peuvent créer des concentrations importantes dans son voisinage immédiat. La zone de prélèvement d'air des échantillonneurs d'air individuels devrait être en conséquence aussi proche que possible du visage. Enfin, l'activité collectée peut ne représenter que quelques particules, et le résultat nécessite alors la prise en compte statistique de la collecte des particules.

2.3.4. Les programmes de surveillance

2.3.4.1. Fréquence de mesures pour la surveillance de routine

La fréquence de mesure nécessaire dans un programme de surveillance de routine dépend de la rétention et de l'excrétion du radionucléide, de la sensibilité de la technique de mesure, et du niveau d'incertitude acceptable dans l'estimation de l'incorporation ou de l'équivalent de dose engagé.

La technique de mesure devrait être sélectionnée de façon à ce que les incertitudes de mesure soient faibles en comparaison des sources principales d'incertitude qui résident dans le manque de connaissance sur les instants d'incorporation ainsi que dans les écarts de la rétention et de l'excrétion des individus avec les valeurs correspondantes des modèles standard.

Comme la surveillance de routine est effectuée à des instants qui ne sont pas reliés aux instants d'incorporation, il est nécessaire de faire l'hypothèse d'un profil temporel d'incorporation afin d'être en mesure de relier les incorporations aux résultats de mesure.

La CIPR 54 propose de retenir l'hypothèse d'une incorporation ayant eu lieu au milieu de l'intervalle de surveillance, car cette hypothèse représente de façon acceptable aussi bien les incorporations chroniques que les incorporations aléatoires ayant pu se produire au long des intervalles de surveillance. Néanmoins, le plus important est que la fréquence des mesures d'un programme de surveillance de routine peut être choisie de façon à minimiser l'incertitude associée au manque de connaissance sur les instants d'incorporation.

La CIPR 54 considère qu'un facteur trois d'incertitude dû au manque de connaissance du temps d'incorporation au cours d'un intervalle de surveillance est acceptable. Si plusieurs mesures sont effectuées chaque année, l'incertitude totale associée à l'estimation de l'incorporation annuelle sera inférieure au facteur trois. Un facteur trois d'incertitude est suggéré car c'est le facteur qui sépare les niveaux d'investigation et d'enregistrement. De cette façon, même dans le cas d'une sous-estimation maximale de l'incorporation ayant eu lieu au cours d'un intervalle de surveillance, l'information relative à une incorporation en réalité supérieure au niveau d'investigation ne sera pas perdue et sera au moins enregistrée.

Si l'incorporation a lieu vers la fin de l'intervalle de surveillance, la surestimation de l'incorporation peut dépasser le facteur trois en raison de l'excrétion précoce due aux composants à court-terme de la rétention. Une telle surestimation peut être évitée si une période de non-exposition précède les mesures ou la prise d'échantillon, comme c'est le cas si la surveillance est effectuée après un week-end ou une période de congés. Cependant, de telles périodes de non-exposition ne sont pas toujours réalisables et ne sont donc pas explicitement recommandées dans ce rapport.

2.3.4.2. Utilisation des niveaux de référence dérivés

Les fonctions m(t) de rétention et d'excrétion présentées dans la CIPR 54 prédisent, en fonction du temps t écoulé depuis l'incorporation et pour une unité d'incorporation, les valeurs des différentes quantités pouvant être mesurées : activité du corps ou d'un organe, ou activité excrétée par unité de temps.

Le niveau d'investigation pour une surveillance de routine effectuée par N périodes de surveillance de T jours par an est donné par NI_r = 3 LAI / 10 N, soit 3 LAI T / 10 x 365 et le niveau dérivé d'investigation pour la surveillance de routine NDI_r est donc donné par $NDI_r = NI_r\ m(T/2)$ puisque l'incorporation est supposée avoir eu lieu au milieu de l'intervalle de surveillance.

De même, le niveau d'enregistrement de routine NE_r est donné par NE_r = LAI / 10 N, soit LAI T / 10 x 365 et le niveau dérivé d'enregistrement pour la surveillance de routine NDE_r est donc donné par $NDE_r = NE_r\ m(T/2)$.

Enfin, et à des fins de vérification à long-terme, il peut être utile de comparer les résultats de la surveillance individuelle aux valeurs qui résulteraient d'une incorporation journalière égale à LAI / 365. Des résultats approchant régulièrement cette valeur indiqueraient la nécessité de réexaminer les programmes de surveillance ainsi que les procédures de contrôle de l'environnement de travail.

2.3.4.3. Surveillance spéciale et opérationnelle

Beaucoup de problèmes rencontrés dans l'interprétation des résultats de la surveillance de routine ne se posent pas dans les mêmes termes en ce qui concerne la surveillance spéciale et la surveillance opérationnelle. En effet, ces opérations de surveillance font référence à des événements de contamination isolés, réels ou suspectés. En particulier, il est probable que le temps d'incorporation soit connu et que l'on dispose d'informations supplémentaires relatives à la forme physico-chimique du contaminant.

Dans le cas de la surveillance spéciale ou opérationnelle, le temps d'incorporation est supposé connu et les mesures sont le plus souvent effectuées dans les jours qui suivent l'incorporation.
Le niveau d'investigation pour une surveillance spéciale ou opérationnelle est donné par NI_s = LAI / 10 et le niveau dérivé d'investigation correspondant NDI_s est donné par $NDI_s = NI_s\ m(t)$ pour une incorporation supposée avoir eu lieu t jours avant la mesure.

De même, le niveau d'enregistrement pour une surveillance spéciale ou opérationnelle est donné par NE_s = LAI / 30 et le niveau dérivé d'enregistrement correspondant NDE_s est donné par $NDE_s = NE_s\ m(t)$ pour une incorporation supposée avoir eu lieu t jours avant la mesure.

2.3.4.4. Surveillance confirmative

Une façon de vérifier que les conditions de travail sont satisfaisantes est d'effectuer de façon occasionnelle des mesures de surveillance individuelle. De telles mesures peuvent n'être interprétées que de façon qualitative, mais des résultats imprévus devraient conduire à des investigations supplémentaires et pourraient suggérer la nécessité de la mise en place d'un programme de surveillance conçu pour l'estimation des doses et incorporations individuelles. De telles procédures de confirmation ne sont utiles que pour des radionucléides qui peuvent être facilement détectés dans le corps et les excréta à de faibles niveaux.

2.3.5. Implémentation des programmes de surveillance

2.3.5.1. Surveillance de routine

Si la valeur mesurée M est inférieure au niveau dérivé d'enregistrement NDE_r, il n'est pas nécessaire de procéder à l'estimation de l'incorporation ou de l'équivalent de dose engagée. Il est simplement nécessaire d'enregistrer le fait qu'une mesure a été réalisée et que son résultat était inférieur au niveau dérivé d'enregistrement. Le résultat peut être considéré comme nul lors de l'évaluation et de l'enregistrement des doses. La valeur mesurée devrait être néanmoins enregistrée dans la fiche individuelle de suivi dosimétrique.

Si la valeur mesurée M est supérieure au niveau dérivé d'enregistrement NDE_r, il est nécessaire de prendre en compte la part de M provenant d'incorporations s'étant produites dans des intervalles de surveillance précédents et il sera implicite, dans toute référence aux valeurs mesurées M, que cette correction aura été appliquée lorsqu'elle était nécessaire.

Pour appliquer cette correction, il est nécessaire de connaître ou de faire un hypothèse sur le moment de l'incorporation : Si les incorporations précédentes ont été estimées dans le cadre d'une surveillance spéciale, les temps d'incorporation devraient être connus. Dans le cas de la surveillance de routine, on peut supposer que les incorporations oint eu lieu au milieu des intervalles de surveillance.

La CIPR 54 présente deux règle générales qui peuvent être utilisées afin de limiter les cas où cette correction est nécessaire : Aucun résultat inférieur au seuil d'enregistrement NDE_r n'a besoin d'être corrigé, et aucun résultat, de quelque niveau qu'il soit, n'a besoin d'être

corrigé si la mesure précédente était inférieure à NDE_r, ou s'il n'existe pas de mesure précédente.

Si la valeur mesurée M excède le niveau dérivé d'enregistrement NDE_r, tout en restant inférieure au niveau dérivé d'investigation NDI_r, elle devrait être interprétée sur la base des modèles standard, en termes d'incorporation d'équivalent de dose engagée, ou d'équivalent de dose efficace engagée, et l'incorporation ou la dose estimées devraient être enregistrées dans la fiche individuelle de suivi dosimétrique.

L'estimation de l'incorporation est réalisée sur la base de la fonction m(t) de rétention ou d'excrétion et est donnée par M / m(T/2) puisque l'incorporation est supposée avoir eu lieu au milieu de l'intervalle de surveillance.

Si la valeur mesurée M excède le niveau dérivé investigation $NDI_{r,s}$, des investigations supplémentaires sont nécessaires.
La nature de celles-ci dépendra des circonstances et du niveau de dépassement, mais les points suivants devraient être considérés :

- La répétition des mesures afin de confirmer ou de préciser l'évaluation initiale,
- l'utilisation de techniques de surveillance additionnelles, pour déterminer par exemple les niveaux de rétentions et d'excrétions,
- l'étude critique des conditions de travail et des circonstances de l'exposition,
- l'étude critique de le fréquence des mesures de routine.

Par ailleurs, un ensemble d'examens peuvent être pratiqués sur la personne contaminée afin de déterminer ses caractéristiques individuelles de rétention et d'excrétion qui peuvent être utilisées pour affiner les estimations dosimétriques.

2.3.5.2. Surveillance spéciale et opérationnelle

Si la valeur mesurée M est inférieure au niveau dérivé d'enregistrement NDE_s, il n'est pas nécessaire de procéder à l'estimation de l'incorporation ou de l'équivalent de dose engagée. Il est simplement nécessaire d'enregistrer le fait qu'une mesure a été réalisée et que son résultat était inférieur au niveau dérivé d'enregistrement. Le résultat peut être considéré comme nul lors de l'évaluation et de l'enregistrement des doses. La valeur mesurée devrait être néanmoins conservée pendant quelques années.

Si la valeur mesurée M excède le niveau dérivé d'enregistrement NDE_s, tout en restant inférieure au niveau dérivé d'investigation NDI_s, elle devrait être interprétée sur la base des modèles standard, en termes d'incorporation d'équivalent de dose engagée, ou d'équivalent de dose efficace engagée, et l'incorporation ou la dose estimées devraient être enregistrées dans la fiche individuelle de suivi dosimétrique.

L'estimation de l'incorporation est réalisée sur la base de la fonction m(t) de rétention ou d'excrétion et est donnée par M/m(T) puisque l'instant de l'incorporation connu.

Si la valeur mesurée M excède le niveau dérivé investigation NDI_s, des investigations supplémentaires sont nécessaires, dont la nature et l'importance seront fonction de l'importance de l'incorporation par rapport à la LAI.
Les points suivants devraient être considérés :

- La répétition des mesures afin de confirmer ou de préciser l'évaluation initiale,
- l'utilisation de techniques de surveillance additionnelles, pour déterminer par exemple les niveaux de rétentions et d'excrétions,
- l'utilisation de paramètres adaptés à la granulométrie réelle des particules, si les estimations initiales ont pris en compte une granulométrie standard.

Par ailleurs, un ensemble d'examens peuvent être pratiqués sur la personne contaminée afin de déterminer ses caractéristiques individuelles de rétention et d'excrétion qui peuvent être utilisées pour affiner les estimations dosimétriques.

La CIPR 54 fait remarquer que certain radionucléides sont facilement mesurables à des niveaux bien inférieurs aux niveaux dérivés d'enregistrement et, quant un tel radionucléide est incorporé de façon accidentelle, une série de mesures effectuées sur la personne contaminée peut apporter des informations importantes sur le comportement du contaminant. Devant le manque de données relatives au métabolisme humain, de telles études, lorsqu'elles sont réalisables, devraient être encouragées.

2.3.5.3. Utilisation des modèles standard

Les niveaux dérivés d'investigation présentés dans les annexes de la CIPR 54 ont été établis pour l'inhalation par l'homme standard de la CIPR d'un aérosol de référence (AMAD = 1μm), pour les classes de solubilité appropriées.

Si la granulométrie du composé est connu, le modèle respiratoire ainsi que les modèles standard d'absorption et de métabolisme peuvent être utilisés pour calculer les niveaux d'investigation appropriés.

Même si la forme chimique du composé est connue, il faut bien reconnaître que le comportement d'un composé particulier peut différer de façon notable de celui prévu par les modèles et paramètre standard. Si des informations biologiques adaptées sont disponibles, et si elles ont été utilisées afin de déterminer de nouvelles LAI, elles devraient être également utilisées pour déterminer les niveaux d'investigation et pour interpréter les résultats de la surveillance individuelle.

Si l'estimation de l'incorporation associé à un résultat de surveillance est supérieure au niveau d'investigation, l'incorporation cumulée relative à l'année en cours devrait être évaluée :

- Si cette incorporation cumulée dépasse les 3/10 de la LAI, on devrait considérer la possibilité d'utiliser des modèles ou des paramètres qui représentent mieux les caractéristiques de la personne exposée et de son exposition que les modèles standard.
- Si cette incorporation cumulée dépasse la LAI, de telles considérations devraient être obligatoires et les efforts nécessaires devraient être entrepris afin de déterminer les éléments les plus appropriés à l'estimation de la dose.

2.4. CIPR 60

La CIPR 60 [17], publiée en 1990, expose les nouvelles recommandations de la CIPR en matière de radioprotection. Ces recommandations ont été développées afin de prendre en compte les nouvelles informations biologiques relatives au détriment associé à l'exposition aux radiations, et remplacent les précédentes recommandations de la CIPR 26 [25], publiées en 1977.

Cette publication développe notamment de nouveaux critères relatifs à la classification des lieux et des conditions de travail ainsi qu'à la classification des travailleurs justifiant une surveillance individuelle de la contamination interne.

Elle reprend néanmoins à son compte les considérations relatives au niveau d'incertitude acceptable précédemment exposées par la CIPR 54.

2.4.1. Classification des lieux et des conditions de travail

La CIPR 60 considère toujours que le contrôle des sources est facilité en exigeant que les lieux de travail les contenant soient clairement identifiés et utilise pour cela les mêmes termes, zone contrôlée et zone surveillée, que les publications précédentes.

La frontière entre les zones contrôlées et les zones surveillées, si ces dernières sont utilisées, a généralement été établie dans le but de s'assurer que les doses reçues par les travailleurs dans les zones surveillées puissent être prévues raisonnablement et qu'elles représentent moins de 3/10 des limites de dose professionnelles.

La Commission considère maintenant que cette définition est trop arbitraire et recommande que l'identification des zones contrôlées et surveillées soit décidée soit au moment de la conception, soit localement par l'exploitant sur la base de l'expérience opérationnelle et du jugement. Ce jugement doit prendre en compte le niveau attendu, les variations probables des doses et des incorporations ainsi que le risque d'accidents.

Une zone contrôlée est une zone dans laquelle les conditions de travail normales, y compris l'occurrence possible d'incidents mineurs, imposent que les travailleurs respectent des procédures et des pratiques bien établies visant précisément à contrôler les expositions aux rayonnements.

Une zone surveillée est une zone dans laquelle les conditions de travail sont suivies de près mais où des procédures spéciales ne sont normalement pas nécessaires.

Les meilleures base pour les définitions de ces zones sont constituées par l'expérience opérationnelle et le jugement. Il faudrait prendre en compte à la fois les niveaux attendus des expositions ainsi que les variations probables de ces expositions.

Le but devrait être de s'assurer que personne en dehors des zones identifiées n'aura besoin d'être considéré comme professionnellement exposé. Les limites de dose recommandées par la Commission sont destinées à s'appliquer à l'ensemble des travailleurs, mais l'utilisation de zones identifiées devrait permettre aux doses réelles reçues en dehors de celles-ci d'être maintenues en dessous des limites de dose de l'exposition du public.

2.4.2. Critères de sélection des travailleurs justifiant une surveillance individuelle de la contamination interne

La Commission avait précédemment défini deux catégories de conditions de travail, basées sur le seul niveau attendu de la dose individuelle annuelle, qui avait pour but d'aider au choix des travailleurs soumis à une surveillance individuelle, afin d'éviter une mauvaise allocation des ressources de surveillance et d'enregistrement.

La CIPR 60 ne recommande plus une classification brute des conditions de travail fondée sur la seule dose attendue, mais considère néanmoins que ce niveau reste le premier facteur à prendre en compte.

Elle a identifié trois facteurs techniques principaux qui peuvent influencer cette décision : le niveau attendu de la dose ou de l'incorporation par rapport aux limites appropriées correspondantes, les variations probables de la dose et des incorporations, la complexité des procédures de mesures et d'interprétation.

En ce qui concerne le troisième facteur, la CIPR 60 reconnaît que la surveillance individuelle est généralement bien plus difficile pour l'incorporation de matières radioactives que pour l'irradiation externe, et ne devrait être pratiquée de façon systématique que pour les travailleurs employés dans les zones désignées comme zones contrôlées spécialement pour la surveillance de la contamination et pour lesquelles on a des raisons de s'attendre à des incorporations importantes.

2.4.3. Précision requise dans l'évaluation des doses

La CIPR 60 considère que, dans l'idéal, les modèles et les valeurs choisies pour les paramètres devraient être réalistes afin que les résultats qu'ils fournissent puissent être qualifiés de 'meilleures estimation'.

Elle reconnaît toutefois que les modèles réalistes sont rarement disponibles et propose de distinguer les deux situations suivantes :

- Si les objectifs des modèles incluent l'établissement ou la vérification du respect de limites, et si des modèles réalistes ne sont pas disponibles, il est recommandé d'utiliser des modèles dont les résultats ne sont pas susceptibles de sous-estimer les conséquences d'une exposition, sans toutefois les sous-estimer de façon excessive.

- Pour la justification d'une pratique, l'optimisation de la protection, ou pour décider d'une intervention après un accident, toute erreur d'estimation est susceptible de provoquer une mauvaise utilisation des ressources disponibles. Si les modèles doivent être utilisés uniquement à ces fins, il devraient alors être choisis en donnant priorité au réalisme.

La CIPR 60 reprend par ailleurs à son compte les considérations relatives au niveau d'incertitude acceptable précédemment exposées par la CIPR 54. Elle considère en effet, en s'y référant, que des incertitudes allant au moins jusqu'au facteur trois doivent être admises et sont acceptables.

3. LES MODELES D'EVALUATION DOSIMETRIQUE DES EXPOSITIONS INTERNES

Ce chapitre présente un résumé des modèles dosimétriques recensés dans les diverses publications de la CIPR ou sous-jacents aux publications réglementaires et aux pratiques internationales.

3.1. Le calcul des doses internes liées à l'inhalation

Contrairement au cas des expositions externes, les doses internes liées à l'inhalation de composés radioactifs ne sont pas directement mesurables. L'estimation des doses internes impose donc le recours à une séquence de modèles permettant de déduire celles-ci des grandeurs physiques descriptives de l'exposition. Le modèle d'exposition permet tout d'abord de décrire l'ensemble des caractéristiques de l'exposition. Les modèles pulmonaires, digestifs, biocinétiques et d'irradiation permettent d'évaluer, dans un second temps, la réponse de l'individu à cet environnement d'exposition.

La Figure 4 présente la séquence de modèles permettant l'estimation des doses internes liées à l'inhalation de composés radioactifs.

3.1.1. Le modèle d'exposition

Le rôle du modèle d'exposition est l'évaluation, en fonction du temps, de l'activité inhalée de chaque catégorie de composés radioactifs.

Il comporte la caractérisation des composés, la description de l'environnement de travail, et enfin les autres caractéristiques de l'exposition.

Les caractéristiques physico-chimiques et radiologiques des composés forment le premier ensemble de paramètres du modèle d'exposition. Ces paramètres permettent de caractériser les composés radioactifs pouvant être incorporés par leur granulométrie et leur forme chimique ainsi que par leurs spectres isotopiques, leurs activités spécifiques, leurs demi-vies, et les rayonnements α et β émis....

Les caractéristiques de l'environnement constituent le deuxième ensemble de paramètres, et concernent la description des concentrations atmosphériques des différents composés à chaque poste de travail.

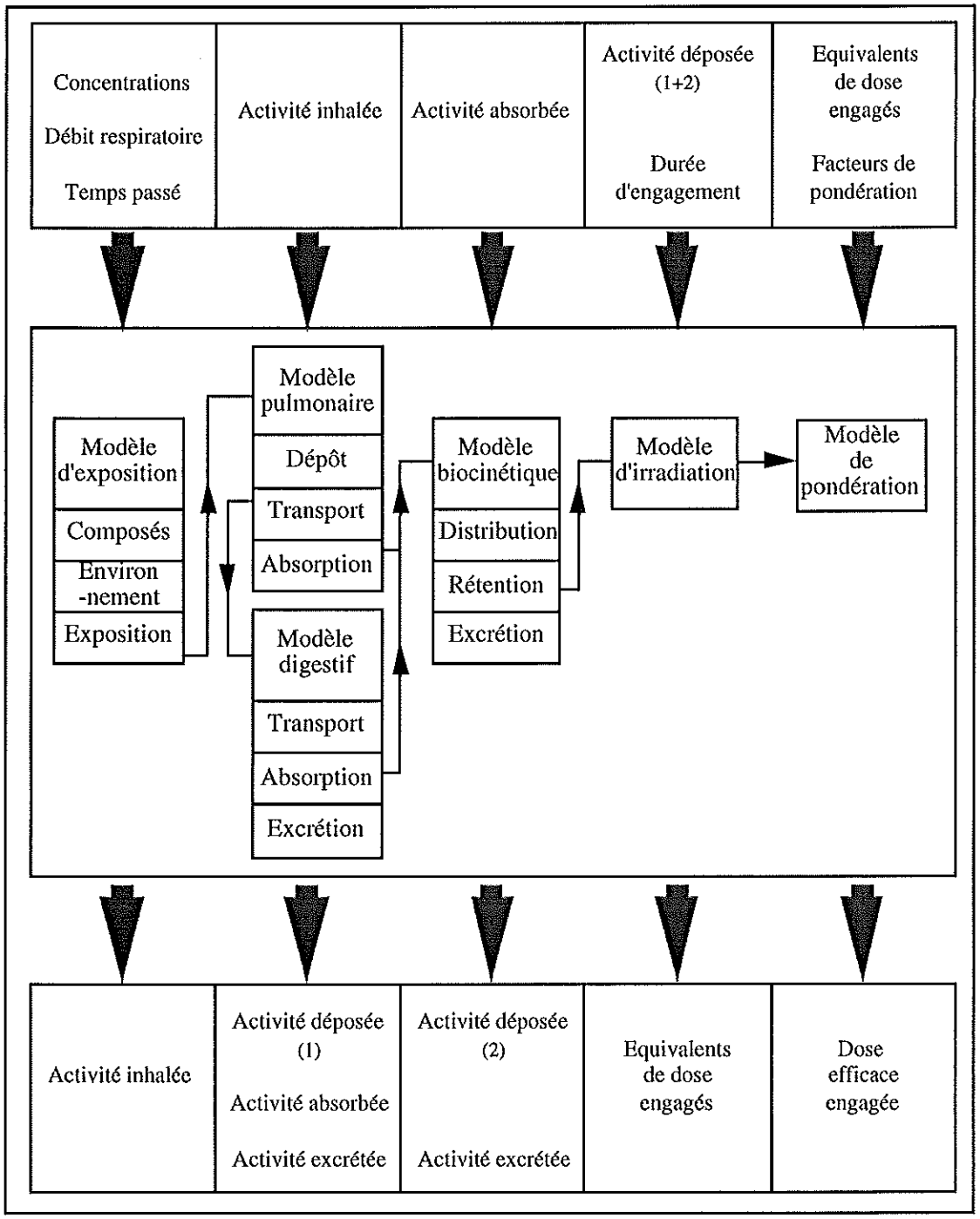

Figure 4. Le calcul des doses internes liées à l'inhalation

Les caractéristiques de l'exposition forment le dernier ensemble des paramètres, et décrivent le type de travail effectué (et donc le débit respiratoire) ainsi que le temps passé par la personne exposée aux différents postes de travail.

3.1.2. Le modèle pulmonaire

Le modèle pulmonaire permet d'évaluer, en fonction du temps, la fraction de l'activité inhalée retenue dans l'appareil pulmonaire, la fraction transportée vers l'appareil digestif et le milieu lymphatique et la fraction absorbée par le sang.

Ce modèle décrit donc le dépôt des particules inhalées dans l'appareil respiratoire, ainsi que l'épuration de celui-ci par les phénomènes concurrents de transport et d'absorption par le sang.

Le modèle de dépôt permet d'évaluer les quantités de particules déposées dans les différentes régions de l'appareil respiratoire en fonction essentiellement de la granulométrie des particules et des modes et débits respiratoires de la personne exposée.

Le modèle de transport décrit le transport des particules déposées vers l'appareil gastro-intestinal et les nodules lymphatiques.

Le modèle d'absorption décrit la dissolution des particules puis l'absorption des particules solubilisées par le sang, en fonction des caractéristiques chimiques gouvernant la solubilité des composés inhalés.

3.1.3. Le modèle digestif

Le modèle digestif permet d'évaluer la fraction f_1 de l'activité ingérée absorbée par le sang.

Ce modèle décrit le transport dans l'appareil digestif ainsi que l'absorption vers le sang, en fonction de leurs caractéristiques chimiques, des particules inhalées puis ingérées. Il comporte une modélisation spécifique de l'excrétion vers les fèces.

3.1.4. Le modèle biocinétique

Le modèle biocinétique permet d'évaluer la distribution et la rétention dans chaque organe de la fraction d'activité absorbée par le sang.

Ce modèle décrit l'ensemble des phénomènes d'absorption et de recyclage entre le sang, le squelette, les reins et les autres tissus mous, ainsi que les phénomènes de décroissance radioactive. Il comporte une modélisation spécifique de l'excrétion vers les urines.

La distribution de l'activité dans le corps pourra être, selon les composés, diffuse et homogène ou bien localisée dans certains organes, les éléments d'une même famille chimique présentant souvent une distribution systémique analogue.

3.1.5. Le modèle d'irradiation

Le modèle d'irradiation permet l'évaluation, en fonction de l'activité de chaque organe, de l'équivalent de dose délivré à l'organe lui-même ainsi qu'aux autres organes.

Ce modèle s'appuie sur des hypothèses décrivant d'une part, la répartition de l'activité dans chaque organe pour le calcul de l'auto-irradiation (rayonnements α et β) et, d'autre part, l'atténuation apportée par les organes voisins pour le calcul de l'inter-irradiation des organes (rayonnements γ)

3.1.6. Le modèle de pondération des équivalents de dose aux organes

Ce modèle permet de prendre en compte la sensibilité différente des organes aux effets stochastiques, au moyen de coefficients de pondération. L'agrégation des équivalents de dose pondérés conduit à l'équivalent de dose efficace.

3.2. Les modèles de la CIPR

3.2.1. CIPR 30

La CIPR 30 [24], publiée en 1979, a pour objet la dérivation de limites secondaires (LAI et LDCA) pour l'exposition des travailleurs à la contamination interne sur la base des limites primaires de dose de la CIPR 26 [25] publiée en 1977 et comporte notamment la description de modèles pulmonaires et digestifs spécifiques.

<u>Le modèle pulmonaire :</u>
La structure du modèle pulmonaire est pratiquement la même que celle du modèle introduit par la CIPR en 1966, et comporte dix compartiments. Ce modèle décrit la dépendance du dépôt vis à vis de la granulométrie des particules inhalées et définit par ailleurs trois

classes de rétention-solubilité qui reflètent en partie les caractéristiques chimiques des composés.

Le dépôt initial dans les trois régions pulmonaires (naso-pharynx, arbre trachéo-bronchial, et région pulmonaire.) est relié au diamètre aérodynamique médian en activité (AMAD), pour une distribution log-normale de ce dernier. Les calculs sont effectués pour un AMAD égal à 1µm, et une formule correctrice est proposée pour la prise en compte d'AMAD différents.

L'épuration du système pulmonaire (transport et absorption confondus) est décrite par trois classes de solubilité D, W et Y qui se réfèrent aux caractéristiques de la rétention des composés dans la région pulmonaire et s'appliquent à des plages de demi-vie inférieures à 10 jours pour la classe D (Day), comprises entre 10 et 100 jours pour la classe W (Week), et supérieures à 100 jours pour la classe Y (Year). Par ailleurs, le transport vers les nodules lymphatiques n'est pris en compte que pour les composés de classe Y.

Le modèle digestif :
La structure du modèle digestif est ici encore la même que celle du modèle introduit par la CIPR en 1966.
L'appareil digestif est divisé en quatre régions : l'estomac, l'intestin grêle, et les parties supérieures et inférieures du gros intestin. Les caractéristiques chimiques du composé ingéré sont prises en compte par l'intermédiaire de la fraction absorbée (f1).

Les modèles biocinétiques ne dépendent que de l'élément considéré et supposent, à de rares exceptions près, que les produits de filiation ont le même comportement que leurs parents. Il est reconnu par ailleurs que le manque de connaissances sur le métabolisme des composés incorporés représente le plus grand facteur d'incertitude dans l'estimation de la dose engagée.

Le modèle d'irradiation regroupe les trois régions pulmonaires pour le calcul de la dose délivrée au système pulmonaire, et suppose donc que l'ensemble des tissus du poumon présentent la même sensibilité au cancer radio-induit.

Le modèle de pondération des doses aux organes est celui de la CIPR 26 [25]. Les valeurs sont recommandées pour tout travailleur sans distinction d'âge ou de sexe et sont rappelées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Coefficients de pondération (W_t) considérés par la CIPR 30

Organe ou tissu	W_t
Gonades	0,25
Sein	0,15
Moelle osseuse rouge	0,12
Poumons	0,12
Thyroïde	0,03
Surfaces osseuses	0,03
Reste de l'organisme	0,30
Total	1,00

D'après la CIPR 26 [25], on suppose qu'aucun tissu appartenant au reste de l'organisme ne contribue à plus de 20% du risque total associé à l'ensemble des tissus non spécifiés. Une valeur de W_t égale à 0,06 s'applique donc à chacun des cinq organes ou tissus du reste de l'organisme recevant les plus forts équivalents de dose, et l'exposition de tous les autres tissus de ce groupe est négligée. Quand l'appareil digestif est irradié, l'estomac, l'intestin grêle, ainsi que les parties supérieures et inférieures du gros intestin sont considérées comme quatre organes séparés.

Hypothèses et résultats pour l'uranium :

En ce qui concerne l'uranium, les isotopes à vie longue tels que U_{234}, U_{235} et U_{238} sont supposés distribués uniformément dans le volume des os. Les principales hypothèses et résultats du modèle sont présentés dans leTableau 4.

Tableau 4. Principales hypothèses et résultats de la CIPR 30 pour l'uranium (AMAD = 1μm)

Forme chimique	Solubilité	Demi-vie d'épuration pulmonaire (j)	Fraction ingérée absorbée f1	Isotope	LAI [1] stochastique (Bq)	LAI [2] déterministe (Bq)
UF_6, UO_2F_2, $UO_2(NO_3)_2$	Day	0,5	0,05	U_{234} U_{235} U_{238}	7E4 7E4 8E4	5E4 5E4 5E4
UO_3, UF_4, UCl_4	Week	50	0,05	U_{234} U_{235} U_{238}	3E4 3E4 3E4	
UO_2, U_3O_8	Year	500	0,002	U_{234} U_{235} U_{238}	1E3 2E3 2E3	

[1] Limite Annuelle d'Incorporation liée aux effets stochastiques correspondant à un équivalent de dose efficace engagé sur 50 ans égal à 50 mSv (CIPR 26 [25])

[2] Limite Annuelle d'Incorporation liée aux effets déterministes correspondant à un équivalent de dose engagé sur 50 ans égal à 300 mSv pour le cristallin et 500 mSv pour les autres organes (CIPR 26 [25]). L'organe le plus exposé est ici la surface des os.

3.2.2. CIPR 54

La CIPR 54 [21], publiée en 1988, remplace les publications 10 et 10A de la CIPR, (publiées respectivement en 1968 et 1971) concernant l'estimation des doses résultant de la contamination interne, afin de rendre ces estimations cohérentes avec les recommandations de radioprotection de la CIPR 26 [25] publiée en 1977.

Cette publication est essentiellement consacrée aux problèmes posés par la conception d'un programme de surveillance individuelle de la contamination interne des travailleurs, ainsi que par l'interprétation de ses résultats. Elle s'appuie sur la CIPR 35 [23], publiée en 1982, quant aux principes généraux de surveillance pour la radioprotection des travailleurs, et sur la CIPR 30 [24], publiée en 1979, en ce qui concerne le modèle dosimétrique. Les annexes de cette publication reprennent, pour chaque radionucléide, les données dosimétriques présentées dans la CIPR 30 (Solubilité, LAI, LDCA), en y ajoutant les facteurs de dose au corps entier et à l'organe le plus exposé (voir Tableau 5).

Tableau 5. Principales hypothèses et résultats de la CIPR 54 pour l'uranium (AMAD = 1μm)

Forme chimique	Solubilité	Fraction ingérée absorbée fl	Isotope	Facteur de dose au corps entier [1] (Sv/Bq)	Facteur de dose à l'organe le plus exposé [2] (Sv/Bq)	LAI stochastique [3] (Bq)	LDCA stochastique [4] (Bq/m³)
UF_6,	Day	0,05	U_{234}	7,2E-7	1,1E-5 (surfaces des os)	5E4 *	2E1 **
UO_2F_2,			U_{235}	6,6E-7	1,0E-5 (surface des os)	5E4 *	2E1 **
$UO_2(NO_3)_2$			U_{238}	6,4E-7	9,8E-6 (surface des os)	5E4 *	2E1 **
UO_3, UF_4,	Week	0,05	U_{234}	1,9E-6	1,6E-5 (poumons)	3E4	1E1
UCl_4			U_{235}	1,8E-6	1,5E-5 (poumons)	3E4	1E1
			U_{238}	1,7E-6	1,4E-5 (poumons)	3E4	1E1
UO_2, U_3O_8	Year	0,002	U_{234}	3,6E-5	3,0E-4 (poumons)	1E3	6E-1
			U_{235}	3,3E-5	2,8E-4 (poumons)	2E3	6E-1
			U_{238}	3,2E-5	2,7E-4 (poumons)	2E3	7E-1

[1] Equivalent de dose efficace engagée sur 50 ans / Activité inhalée
[2] Equivalent de dose à l'organe engagée sur 50 ans / Activité inhalée

[3] Limite Annuelle d'Incorporation liée aux effets stochastiques correspondant à un équivalent de dose efficace engagé sur 50 ans égal à 50 mSv (CIPR 26 [25])
[4] Limite de Concentration dans l'Air liée aux effets stochastiques.

* Limite Annuelle d'Incorporation liée aux effets déterministes correspondant à un équivalent de dose engagé sur 50 ans égal à 300 mSv pour le cristallin et 500 mSv pour les autres organes (CIPR 26 [25]).
** Limite de Concentration dans l'Air liée aux effets déterministes.

Ces annexes fournissent également des informations détaillées concernant la distribution, la rétention, et l'excrétion des radionucléides incorporés et décrivent notamment l'évolution en fonction du temps de l'excrétion journalière urinaire ou fécale, ainsi que celle de la rétention du corps entier et des poumons, correspondant à des scénarios d'incorporation isolée ou chronique.

Les annexes relatives aux isotopes U_{234}, U_{235} et U_{238} de l'uranium présentent les données d'excrétion urinaire correspondant à une incorporation unique et une exposition chronique. L'annexe relative à l'U_{235} présente également les données concernant l'évolution de la rétention corps-entier faisant suite à une incorporation unique.

3.2.3. CIPR 61

Les nouvelles recommandations de la CIPR 60 [17] en matière de radioprotection, publiée en 1990, ont été développées afin de prendre en compte les nouvelles informations biologiques relatives au détriment associé à l'exposition aux radiations, et remplacent les précédentes recommandations de la CIPR 26 [25], publiées en 1977. L'adoption des recommandations de la CIPR 60 nécessite une révision des limites secondaires publiées dans la CIPR 30 [24].
La CIPR 61 [19] a été publiée en 1990 pour permettre l'application immédiate des nouvelles recommandations de la CIPR 60 et proposer des valeurs révisées des LAI fondées sur la méthode et les informations biocinétiques de la CIPR 30, mais incorporant les nouvelles limites et les nouveaux facteurs de pondération (W_t).

Les modèles respiratoires, digestifs, biocinétiques :
Les modèles respiratoires, digestifs, et biocinétiques pris en compte dans la CIPR 61 sont identiques aux anciens modèles de la CIPR 30, dans l'attente d'une révision complète de la CIPR 30 prenant en compte un nouveau modèle respiratoire, un nouveau rapport sur l'homme de référence, et de nouveaux modèles biocinétiques et digestifs.

Le modèle de pondération des doses aux organes :
La CIPR associe maintenant explicitement des facteurs de pondération de dose à un certain nombre d'organes (colon, estomac, foie, oesophage et vessie) qui étaient regroupés dans la catégorie 'reste de l'organisme' dans les CIPR 26 et 30. L'ensemble de ces facteurs de pondération, dont les valeurs ont été estimées sur la base d'études épidémiologiques, est présenté dans le Tableau 6.

La méthode de traitement du reste de l'organisme a été modifiée depuis la CIPR 30. Les tissus du reste de l'organisme sont constitués des glandes surrénales, du cerveau, de l'intestin grêle, du gros intestin supérieur, des reins, des muscles, du pancréas, de la rate, du thymus et de l'utérus, et le facteur de pondération associé au reste de l'organisme est appliqué à la moyenne (pondérée en masse) des équivalents de doses engagées délivrées à chacun de ces tissus. Par ailleurs, dans le cas exceptionnel où un organe isolé parmi les organes ou tissus du reste de l'organisme recevrait un équivalent de dose supérieur à la plus forte dose de l'un quelconque des douze organes pour lesquels un facteur de pondération est spécifié, un facteur de pondération de 0,025 (la moitié du coefficient associé au reste de l'organisme) devrait être associé à cet organe, ainsi qu'à la dose

moyenne (pondérée en masse) délivrée aux autres organes ou tissus constitutifs du reste de l'organisme.

Les LAI :

Dans le cadre des expositions professionnelles, les recommandations de la CIPR 60 limitent la dose efficace à 100 mSv par période 5 ans (soit une valeur moyenne de 20 mSv), avec une limite de 50 mSv par an, et comporte des limites annuelles des équivalents de dose à la peau et aux mains (500 mSv), ainsi qu'au cristallin (150 mSv).
La LAI portant sur tout radionucléide est donc obtenue en divisant la valeur moyenne sur 5 ans de la limite de dose efficace annuelle (20 mSv) par la dose efficace engagée résultant de l'incorporation d'1 Bq de ce radionucléide.

Les nouvelles LAI présentées à la suite des recommandations de la CIPR 60 sont pour la plupart plus restrictives que celles présentées dans les précédentes publications. Cependant, contrairement aux précédentes recommandations qui visaient à la limitation des effets stochastiques et déterministes par des limites portant respectivement sur la dose efficace (50 mSv) et sur la dose aux organes (300 mSv pour le cristallin, 500 mSv pour les autres organes), la limitation de la dose engagée ne porte plus dorénavant que sur la seule dose efficace (20 mSv) et permet des incorporations dont peuvent résulter des équivalents de dose à la surface des os (ou aux reins) de l'ordre de 1 Sv. Néanmoins, en raison de la nature prolongée de l'exposition résultant de ces dépôts, il est peu probable que l'équivalent de dose délivré sur la vie entière puisse aboutir à des effets déterministes. De plus, les calculs d'équivalents de dose des émetteurs alpha prennent en compte un facteur de pondération de rayonnement (égal à 20), basé sur les effets stochastiques, ce qui surestime de façon presque certaine le risque d'effets déterministes.

Hypothèses et résultats pour l'uranium :

Les principales hypothèses et résultats du modèle pour les isotopes U_{234}, U_{235} et U_{238} sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6. Principales hypothèses et résultats de la CIPR 61 pour l'uranium (AMAD = 1μm)

Solubilité	Fraction ingérée absorbée f1	Isotope	Facteur de dose au corps entier [1] (Sv/Bq)	LAI [2] (Bq)
Day	0,05	U_{234}	2,5E-7	8E4
		U_{235}	2,5E-7	8E4
		U_{238}	2,2E-7	9E4
Week	0,05	U_{234}	2,0E-6	1E4
		U_{235}	2,0E-6	1E4
		U_{238}	2,0E-6	1E4
Year	0,002	U_{234}	3,3E-5	600
		U_{235}	3,3E-5	600
		U_{238}	3,3E-5	600

[1] Facteur de dose implicite = 20 mSv / LAI

[2] Limite Annuelle d'Incorporation correspondant à une dose efficace engagée de 20 mSv

On pourra remarquer que les valeurs implicites des facteurs de dose proposées par la CIPR 61 sont quasiment identiques aux valeurs de facteurs de dose proposées par la CIPR 54 pour les composés de classe de solubilité Week et Year. Les valeurs proposées pour les composés de classe Day sont néanmoins inférieures d'un facteur trois à celles présentées dans la CIPR 54.

3.2.4. CIPR 66

Le nouveau modèle pulmonaire de la CIPR 66 ([7], [13] et [7]), publié en 1994, prend en compte les critiques adressées au modèle de la CIPR 30 [24] ainsi que les nouvelles connaissances acquises dans ce domaine depuis la publication de ce dernier en 1979.

Les raisons d'un nouveau modèle pulmonaire :

Le modèle pulmonaire publié dans la CIPR 30 [24] en 1979 a stimulé la recherche sur les phénomènes de dépôt, de rétention, d'épuration et de distribution vers d'autres tissus de l'organisme des aérosols inhalés, aussi bien chez l'animal que chez l'homme. Il a aussi

conduit à la publication de nombreuses comparaisons entre les résultats expérimentaux et les prédictions basées sur le modèle pulmonaire de la CIPR. Comme on pouvait s'y attendre, ces différentes études ont mis en évidence les lacunes de ce modèle dans de nombreux domaines.

Les critiques les plus fréquentes ont été dirigées à l'encontre du système de classification du phénomène d'épuration en trois classes D, W et Y. En effet, de nombreux composés radioactifs, étudiés de façon expérimentale chez l'animal ou dans le cadre d'expositions humaines, ont montré des vitesses d'épuration de l'appareil respiratoire substantiellement différentes de celles qui leur étaient assignées. La vitesse d'épuration des poumons de certains composés hautement insolubles est apparue nettement inférieure à celle associée à la classe Y. Il est apparu par ailleurs difficile d'associer d'autres composés à l'une des trois classes de solubilité proposées.

Les recherches sur le dépôt des aérosols inhalés ont étendu la plage de dimensions des particules au delà de celle considérée par la CIPR 30, ce qui est d'une importance toute particulière dans le cas des particules de dimensions inférieures au micromètre, telles que les produits de décroissance du radon, ou les poussières résultant de certaines opérations de démantèlement.

La dose délivrée à l'appareil respiratoire calculée par la CIPR 30 est moyennée sur la masse totale des poumons remplis de sang et le contenu des nodules lymphatiques est agrégé à celui des poumons. Cependant, un certain nombre d'études portant sur les expositions humaines au radon, ainsi que sur des expérimentations animales ont montré que la dose délivrée à l'appareil respiratoire à la suite de l'inhalation est rarement uniforme, et ces observations ont posé la question de la validité de la moyenne de la dose sur la masse totale des poumons. La réalité de cette question a été reconnue en 1987 dans la CIPR 50 [22] qui, dans le cadre de la détermination de limites d'expositions professionnelles aux descendants du radon, a comparé les approches épidémiologiques et dosimétriques et a séparé en deux composantes, dans l'approche dosimétrique, les doses délivrées à l'appareil respiratoire.

Les caractéristiques du nouveau modèle :

La modélisation des phénomènes de dépôt est plus précise, notamment en ce qui concerne les particules de dimensions inférieures au micromètre. Le nouveau modèle prend en

compte le débit respiratoire, ainsi que la respirabilité des matériaux en suspension, qui dépend de la taille des particules.

Par ailleurs, à la partition des voies d'épuration entre les régions pulmonaires réalisée dans le modèle de la CIPR 30, le nouveau modèle préfère une modélisation (dépendante du temps) de la compétition entre les phénomènes de transport et d'absorption des particules dans la circulation sanguine. Des valeurs de référence sont fournies en ce qui concerne les phénomènes de transport, les taux d'absorption vers le sang étant quant à eux supposés être dérivés de l'observation des composés radioactifs spécifiques, chez l'homme ou chez l'animal. En l'absence de telles informations, des valeurs par défaut sont recommandées (types Fast, Moderate et Slow).

Le modèle d'irradiation tient compte de l'hétérogénéité de l'exposition et de la différence de radiosensibilité des différentes régions de l'appareil respiratoire. Ce modèle prend également en compte la dépendance des débits de dose et des doses reçus par ces tissus vis à vis des propriétés physiques des matériaux inhalés. Enfin, comme la dose moyenne au poumon n'a que peu de relation avec les doses délivrées aux tissus les plus sensibles de l'appareil respiratoire, et que l'observation des fréquences de cancers spontanés pour chaque région pulmonaire a montré une forte prédominance pour la région bronchique, le nouveau modèle prévoit le calcul de la dose délivrée aux tissus spécifiques aussi bien intra qu'extrathoraciques.

Le modèle de pondération des doses prend en compte les doses délivrées à ces tissus spécifiques en pondérant les équivalents de dose calculés dans le rapport de la radiosensibilité relative des tissus [1]. Les doses pondérées des tissus des régions extrathoracique et thoracique sont sommées séparément, fournissant deux valeurs d'équivalent de dose pour l'appareil respiratoire. Ces deux valeurs font enfin l'objet d'une pondération appropriée lors du calcul de la dose efficace.

3.2.5. CIPR 68

Comme cela a déjà été dit, l'adoption en 1990 des nouvelles recommandations de la CIPR 60 [17] nécessitait une révision des limites secondaires publiées dans la CIPR 30 [24], et la CIPR 61 [19] a été publiée en 1990 pour permettre l'application immédiate de ces nouvelles recommandations, et proposer des valeurs révisées des LAI fondées sur la méthode et les informations biocinétiques de la CIPR 30, mais incorporant les nouvelles limites et les nouveaux facteurs de pondération (W_t).

Depuis lors, la CIPR a publié un nouveau modèle pulmonaire, décrit dans la CIPR 66 [7], ainsi que de nouveaux modèles biocinétiques, élaborés pour une sélection de radionucléides depuis la CIPR 30, et présentés dans les CIPR 56, 67 et 69 ([20], [12] et [2]).

La CIPR 68, publiée en 1994, remplace la CIPR 61 et présente les valeurs des facteurs de dose applicables à l'exposition des travailleurs utilisant le nouveau modèle pulmonaire ainsi que, le cas échéant, les nouveaux modèles biocinétiques.

Le modèle pulmonaire utilisé est celui de la CIPR 66. Les modèles biocinétiques sont ceux proposés par les CIPR 56, 67 et 69 pour une sélection de radionucléides ou, à défaut, ceux de la CIPR 30.

Le modèle de pondération des rayonnements et des tissus est identique à celui recommandé par la CIPR 60 et implémenté dans la CIPR 61, à l'exception de la prise en compte des voies aériennes extrathoraciques, dont l'irradiation est calculée de manière spécifique par le nouveau modèle pulmonaire (Cf. supra).

Le Tableau 7 présente la masse des organes à prendre en compte dans le calcul de la dose efficace associée à l'irradiation des organes du reste de l'organisme.

Tableau 7. Masse chez l'adulte des organes constitutifs du reste de l'organisme

Organe ou tissu	Masse (g)
Muscle	28000
Cerveau	1400
Intestin grêle	640
Reins	310
Pancréas	100
Rate	180
Thymus	20
Utérus	80
Glandes surrénales	14
Voies aériennes extrathoraciques	15 *
Total	30759

* Valeur provenant de la CIPR 66

Hypothèses et résultats pour l'uranium :

Le modèle biocinétique utilisé pour l'évaluation des facteurs de dose des composés de l'uranium est celui présenté dans la CIPR 69 [2] pour la famille des alcalino-terreux.

Le Tableau 8 présente les principales hypothèses et résultats de la CIPR 68 pour l'uranium.

Tableau 8. Principales hypothèses et résultats de la CIPR 68 pour l'uranium (AMAD = 1 et 5 µm)

Forme chimique	Solubilité	Fraction ingérée absorbée f1	Isotope	Facteur de dose au corps entier (AMAD=1µm) (Sv/Bq)	Facteur de dose au corps entier (AMAD=5µm) (Sv/Bq)
UF_6, UO_2F_2, $UO_2(NO_3)_2$	Fast	0,02	U_{234}	5,5E-7	6,4E-7
			U_{235}	5,1E-7	6,0E-7
			U_{238}	4,9E-7	5,8E-7
UO_3, UF_4, UCl_4	Moderate	0,02	U_{234}	3,1E-6	2,1E-6
			U_{235}	2,8E-6	1,8E-6
			U_{238}	2,6E-6	1,6E-6
UO_2, U_3O_8,	Slow	0,002	U_{234}	8,5E-6	6,8E-6
			U_{235}	7,7E-6	6,1E-6
			U_{238}	7,3E-6	5,7E-6

On peut constater, par rapport aux valeurs correspondantes de la CIPR 61 (Tableau 6), que les valeurs proposées dans le cadre du nouveau modèle pour la fraction ingérée absorbée f1 passent de 0,05 à 0,02 pour les composés les plus solubles (Fast et Moderate).

Par ailleurs, l'impact du nouveau modèle pulmonaire est mis en évidence par le fait que les nouveaux facteurs de dose correspondant à un AMAD de 1 µm sont quasiment identiques à ceux de la CIPR 61 pour les composés de solubilité forte ou modérée (Fast et Moderate), alors qu'ils sont quatre fois inférieurs aux anciennes valeurs pour les composés de solubilité faible (Slow).

Cette différence est en partie due (voir [13]), au plus faible dépôt dans le nouveau modèle d'un aérosol d'AMAD égal à 1 µm. De plus, les doses les plus fortes sont délivrées, dans le cas des composés de faible solubilité (Slow) à des régions de l'appareil pulmonaire

auxquelles le nouveau système de pondération des doses accorde moins d'importance dans le calcul de l'équivalent de dose aux poumons.

3.2.6. Comparaison des CIPR 54, 61 et 68

Les deux tableaux suivants comparent les principaux modèles ainsi que les principales hypothèses et résultats des CIPR 54, 61 et 68.

Tableau 9. Principaux modèles utilisés dans les CIPR 54, 61 et 68 pour l'uranium

Publications CIPR / Modèles	CIPR 54	CIPR 61	CIPR 68
Modèle pulmonaire	CIPR 30		CIPR 66
Modèle biocinétique	CIPR 30		CIPR 69
Modèle de pondération (rayts. et tissus)	CIPR 26	CIPR 60	

Tableau 10. Principales hypothèses et résultats des CIPR 54, 61 et 68 pour l'uranium (AMAD = 1μm)

Forme chimique	Solubilité	Fraction ingérée absorbée f1			Isotope	Facteur de dose au corps entier (AMAD = 1μm) (Sv/Bq)		
		CIPR 54	CIPR 61	CIPR 68		CIPR 54	CIPR 61	CIPR 68
UF_6, UO_2F_2, $UO_2(NO_3)_2$	Day / Fast	0,05	0,05	0,02	U_{234}	7,2E-7	2,5E-7	5,5E-7
					U_{235}	6,6E-7	2,5E-7	5,1E-7
					U_{238}	6,4E-7	2,2E-7	4,9E-7
UO_3, UF_4, UCl_4	Week / Moderate	0,05	0,05	0,02	U_{234}	1,9E-6	2,0E-6	3,1E-6
					U_{235}	1,8E-6	2,0E-6	2,8E-6
					U_{238}	1,7E-6	2,0E-6	2,6E-6
UO_2, U_3O_8	Year / Slow	0,002	0,002	0,002	U_{234}	3,6E-5	3,3E-5	8,5E-6
					U_{235}	3,3E-5	3,3E-5	7,7E-6
					U_{238}	3,2E-5	3,3E-5	7,3E-6

3.2.7. Les modèles sous-jacents à la réglementation

3.2.7.1. La réglementation Française

Le décret 88-662 du 6 mai 1998 [16] relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants modifie le décret 86-1103 du 2 octobre 1986, et reprend le décret 66-450 du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants 1988.

Il fixe les limites d'incorporation annuelles (LAI) et les limites de concentration dans l'air annuelles (LDCA) et limite l'incorporation trimestrielle (trois mois consécutifs) aux six dixièmes de la limite annuelle.

Ces limites sont fixées pour l'ensemble des radionucléides en fonction d'une classification des composés en trois classes dénommées classes 1, 2 et 3. La classification des composés, ainsi que les valeurs des LAI et LDCA, sont, pour l'uranium, en tous points identiques (voir Tableau 5) aux recommandations de la CIPR 54 [21] pour des composés de diamètre aérodynamique médian en activité (AMAD) égal à 1 µm.

3.2.7.2. La réglementation Helvétique

L'ordonnance sur la radioprotection [9] du 22 juin 1994, en application de la loi sur la radioprotection [8] du 22 mars 1991, fournit des données de LAI et de LDCA pour la radioprotection opérationnelle.

Cette ordonnance s'appuie sur les valeurs de la CIPR 38 [30] pour les caractéristiques radiologiques des radionucléides, et sur celles de la CIPR 61 [19] pour les facteurs de dose pour l'inhalation et l'ingestion chez l'enfant en bas âge (1 an), l'enfant (10 ans), et l'adulte ainsi que pour les LDCA.

On pourra remarquer qu'une seule valeur est fournie pour chaque radionucléide, et que l'influence des propriétés chimiques des composés sur les propriétés de solubilité n'est donc pas prise en compte.

Les valeurs proposées pour les composés d'uranium correspondent à la classe de solubilité Year, et sont présentées dans le Tableau 11.

Tableau 11. Principales valeurs de la réglementation helvétique pour l'uranium

Isotope	Facteur de dose au corps entier (Sv/Bq)	LDCA [1] (Bq/m^3)
U_{234}	3,6E-5	2E-1
U_{235}	3,3E-5	3E-1
U_{238}	3,2E-5	3E-1

[1] Limite de concentration dans l'air correspondant à une dose efficace engagée annuelle de 20 mSv.

Par ailleurs, une réglementation pour la dosimétrie individuelle en cas d'incorporation [10] a été proposée et mise à l'essai à titre consultatif. Cette proposition de réglementation fournit des éléments de méthode relatifs à l'interprétation des mesures et présente des fiches relatives à 34 radio-isotopes (dont l'U_{235} et l'U_{238}) dans lesquelles les facteurs de dose sont issus de la CIPR 61 [19] et les fonctions de rétentions et d'excrétion tirées de la CIPR 54 [21].

3.2.7.3. La réglementation des Etats-Unis

La réglementation américaine en matière de radioprotection est largement fondée sur les recommandations des CIPR 30 et 54 et est décrite dans la publication 10CFR20 de la NRC [18].

D'autres publications réglementaire de la NRC sont plus particulièrement consacrées aux aspect pratiques de la prise en compte de la réglementation en matière de contamination interne, et notamment au problème de la surveillance de l'exposition des travailleurs.

C'est le cas notamment des guides réglementaires 8.34 [28] et 8.9 [15], publiés respectivement en 1992 et 1993 par la NRC, qui s'intéressent d'une part, aux critère de surveillance et aux méthodes de calcul des doses reçues par les travailleurs et, d'autre part, aux concepts, méthodes, équations et hypothèses acceptables pour un programme d'examens biologiques.

3.2.8. Les codes de calcul

3.2.8.1. LUDEP 1.0 (1993)

Le code de calcul LUDEP (LUng Dose Evaluation Program) [14], édité en 1993 par le NRPB et dérivé du code CINDY, a été développé en collaboration avec le comité de la CIPR, en même temps que le nouveau modèle pulmonaire décrit dans la publication 66 de la CIPR [7], et fonctionne sur micro-ordinateur compatible PC.

Ses objectifs de conception principaux étaient, d'une part, d'aider le groupe de travail de la CIPR dans l'examen du nouveau modèle en comparant les prédictions de dépôt, d'épuration et de rétention aux données expérimentales et en déterminant les implications du modèle en termes de doses délivrées à l'appareil respiratoire et, d'autre part, de tester la faisabilité de l'implémentation de ce nouveau modèle. Bien que restreint à l'origine à l'appareil respiratoire, le calcul des doses a été étendu à l'ensemble des organes.

Le modèle pulmonaire est celui de la CIPR 66 [7]. Le modèle biocinétique est celui des CIPR 30 et 54 [24],[21]. Les données de décroissance des radionucléides proviennent, au choix, de la CIPR 38 [30] ou de l'ONRL [31]. Les fractions d'énergie absorbée pour les photons proviennent également de l'ONRL [32]. Le modèle de pondération des doses aux organes est, au choix, celui de la CIPR 26 [25] ou de la CIPR 60 [17].

La version 1.0 de LUDEP 1.0 fournit des résultats qui ne correspondent donc à aucune publication de la CIPR dans la mesure où ils diffèrent des résultats des CIPR 30 et 54 par l'utilisation du nouveau modèle pulmonaire de la CIPR 66 (à la place de celui des CIPR 30 et 54), et de ceux de la CIPR 68 (pour l'uranium) par l'utilisation du modèle biocinétique des CIPR 30 et 54 (à la place de celui de la CIPR 69 [2]). Par ailleurs, aucun calcul d'excréta urinaires ou fécaux, ou autre calcul pouvant être utile à l'interprétation des résultats d'examen biologiques n'est effectué dans la version 1.0 du code.

La version 2.0 de LUDEP, prévue pour mai 1996, intégrera ces calculs d'excréta et de rétention.

La version 3.0 de LUDEP, prévue pour 1997, intégrera les nouveaux modèles biocinétiques des CIPR 56, 67 et 69 [20],[12],[2] et permettra l'obtention des résultats de la CIPR 68.
On notera cependant que LUDEP comporte la possibilité de définir de nouveaux modèles biocinétiques, et que la simulation dans celui-ci du modèle uranium de la CIPR 69 devrait permettre, dans une certaine mesure, la reproduction des résultats de la CIPR 68.

3.2.8.2. PIEDEC (1991)

Le code de calcul PIEDEC, édité en 1991 par Mitsubishi Atomic Power Industries implémente sur micro-ordinateur compatible PC un ensemble de calculs développés à l'origine sur gros système.

Ce code a pour fondement le modèle dosimétrique de la CIPR 30 (modèles pulmonaires et biocinétiques), le modèle d'irradiation provenant quant à lui des données de ORNL-5000. De plus, des fonctions d'excrétion basées sur des formules empiriques ont été prévues pour l'uranium, le plutonium et l'américium.

Il autorise le calcul, pour tout intervalle de temps, de l'équivalent de dose engagée délivré aux organes et aux corps entier, sur la base d'une quantité initialement incorporée par inhalation, ingestion, ou injection intra-veineuse d'un mélange de radionucléides. Les valeurs des fractions ingérées absorbées f1 et du diamètre aérodynamique médian en activité (AMAD), peuvent être également précisées.

Il permet par ailleurs la détermination de l'activité initiale incorporée, sur la base des résultats de comptages corps-entier, ou d'analyse d'excréta urinaires ou fécaux, pour un profil temporel d'incorporation prédéterminé quelconque.

3.2.8.3. INDOS (1986)

Le code de calcul INDOS, édité en 1986 par Skrable Enterprises, implémente sur micro-ordinateur compatible PC un ensemble de calculs ayant pour base le modèle dosimétrique de la CIPR 30 [24] (modèles respiratoires, digestifs, et biocinétiques).

Les valeurs des fractions ingérées absorbées f1 et du diamètre aérodynamique médian en activité (AMAD) du mélange de radionucléides considéré peuvent être précisées. Par ailleurs les valeurs des paramètres des modèles respiratoires, digestifs, et biocinétiques peuvent être modifiées par l'utilisateur.

Il permet l'estimation de l'activité incorporée à partir d'un ou plusieurs résultats d'examens biologiques (comptages des poumons ou du corps entier, et mesures d'excréta urinaires et fécaux), en fonction de conditions d'incorporation prédéterminées, à l'aide de méthodes d'ajustement non pondérées, pondérées, ou itératives.

Il autorise par ailleurs le calcul de l'évolution en fonction du temps de l'excrétion journalière ou de la rétention associée à une incorporation isolée.

3.2.8.4. Les autres codes de calcul

La description suivante des deux codes CINDY et REMedy est directement tirée de la référence [3]. On pourra par ailleurs se reporter à la référence[11] pour la comparaison de différents codes de calcul fondés sur les modèles de la CIPR 30.

CINDY est un code de dosimétrie interne développé pour le Department Of Energy (DOE) par Battelle Pacific Northwest Laboratories. Il est distribué gratuitement aux contractants du DOE, et est commercialisé par la société Camberra Inc. Ses quatre modes d'utilisation sont : l'évaluation de l'incorporation à partir des examens biologiques, l'estimation de dose pour des périodes de temps spécifiées, l'estimation des doses pour des périodes annuelles calendaires, et la projection des résultats d'examens biologiques. Ce code est basé sur les modèles métaboliques de la CIPR 30, mais ces modèles peuvent être modifiés pour s'ajuster à des données individuelles.

REMedy est un code commercialisé par la société SAIC Inc qui s'appuie lui aussi sur les modèles de la CIPR 30. Il a également quatre modes de fonctionnement : l'estimation des doses à partir de données de concentration dans l'air, l'estimation des doses à partir des résultats d'examen biologique, un module de calcul combinant les données de concentration dans l'air et d'examen biologique, et un module de calcul de doses à partir d'autres modèles.

3.2.8.5. Comparaison des principaux codes de calcul

Tableau 12. Principales caractéristiques des codes de calcul

<table>
<tr><td>Codes de calcul / Modèles</td><td>PIEDEC 1991</td><td>INDOS 1986</td><td>CINDY</td><td>REMedy</td><td>LUDEP 1 1993</td><td>LUDEP 2 1996</td><td>LUDEP 3 1997</td></tr>
<tr><td>Modèle pulmonaire</td><td colspan="4">CIPR 30</td><td colspan="3">CIPR 66</td></tr>
<tr><td>Modèle biocinétique</td><td colspan="6">CIPR 30</td><td>CIPR 69</td></tr>
<tr><td>Modèle de pondération des rayonnements</td><td colspan="4">CIPR 26</td><td colspan="3">CIPR 60</td></tr>
<tr><td>Modèle de pondération des tissus</td><td colspan="4">CIPR 26</td><td colspan="3">CIPR 26 ou CIPR 60</td></tr>
<tr><td>Modélisation des examens biologiques</td><td colspan="4">OUI</td><td>NON</td><td colspan="2">OUI</td></tr>
</table>

DEUXIEME PARTIE :
ELEMENTS D'EVALUATION DES MOYENS DE SURVEILLANCE DES EXPOSITIONS INTERNES

4. INTRODUCTION

Les moyens d'estimation des expositions peuvent être classés en fonction de leur degré de précision, au travers des recommandations de la CIPR précédemment exposées, ainsi que de l'analyse des modèles mis en en jeu dans le calcul des doses internes.

Les estimations fondées sur les examens biologiques sont généralement les plus fiables et peuvent être séparées en examens *in vivo* (mesure de l'activité pulmonaire ou corps entier) et examens *in vitro* (mesure d'excréta urinaires ou fécaux), ces derniers étant habituellement associés à une incertitude plus importante.

Les estimations reposant sur les méthodes de prélèvement d'air sont généralement associées à une précision inférieure et peuvent être distinguées, suivant qu'elles ont un caractère individuel (échantillonneur individuel portatif) ou collectif (échantillonneur fixe ou balise continue), les méthodes collectives étant habituellement associées à une incertitude plus importante.

Les stratégies de surveillance reposent le plus souvent sur un ensemble de moyens d'estimation des expositions permettant de répondre à l'ensemble des objectifs (respect des limites réglementaires, optimisation de la radioprotection, demandes de compensation), de prendre en compte la variabilité des situations d'expositions (exposition continue due au fonctionnement normal, exposition fréquente due à des incidents mineurs, exposition exceptionnelle due à des incidents) et de minimiser les incertitudes pouvant être associées aux diverses estimations.

Les éléments d'interprétation présentés pour les examens biologiques mettent en évidence l'importance des principales difficultés attachées à l'estimation des doses internes, en identifiant notamment les problèmes posés par les limites de détection ainsi que par l'incertitude associée au manque de connaissance du profil temporel d'exposition (exposition unique, multiple, chronique...).

En effet, l'existence d'une limite de détection pour les examens biologiques implique qu'en dessous d'une certaine valeur, l'exposition associée à la période séparant deux examens pourra rester inaperçue (concept de dose détectable) si l'estimation de l'exposition repose sur ces seuls examens biologiques. La comparaison de la dose détectable par examen avec les objectifs poursuivis pourra permettre d'éclairer la décision quant à la sensibilité à retenir pour la méthode d'examen.

Par ailleurs, plus l'intervalle séparant les examens biologiques est important, plus grande est l'incertitude associée au manque de connaissance du moment où a eu lieu l'incorporation. L'augmentation de la fréquence des examens, ainsi que la définition d'une durée d'exclusion du travailleur de toute source d'exposition interne préalable à chaque examen permet de diminuer cette incertitude.

Le chapitre suivant passe en revue les méthodes de mesure qui peuvent être mises en oeuvre pour assurer la surveillance des travailleurs exposés à la contamination atmosphérique, à savoir les mesures collectives de contamination atmosphérique par Appareils de Prélèvement d'Air (APA), les mesures individuelles de contamination atmosphérique par les Systèmes Individuels de Dosimétrie Interne (SIDI), et enfin les analyses biologiques de l'incorporation individuelle : mesures *in vitro* d'excréta urinaires ou fécaux, et comptages *in vivo* d'activité pulmonaire.

Pour chacune de ces méthodes de mesure, la séquence des sous-modèles dosimétriques qui doivent être enchaînés pour mener du résultat de mesure à l'estimation de la dose efficace engagée est présentée et discutée.

De plus, pour les mesures d'excréta urinaires et d'activité pulmonaire associées à l'incorporation de composés d'uranium, les éléments suivants d'interprétation quantitative sont présentés :

Les fonctions d'excrétion ou de rétention établies sur la base de la publication 54 de la CIPR [21] et associées à des incorporations uniques et chroniques sont tout d'abord présentées :

- Dans le cas d'une incorporation isolée de composés d'uranium, ces fonctions fournissent, en fonction du temps écoulé depuis l'exposition, le rapport existant entre l'activité journalière excrétée par les voies urinaires et l'activité inhalée, ou le rapport existant entre l'activité retenue dans le système respiratoire et l'activité inhalée.

- Dans le cas d'une incorporation chronique de composés d'uranium, ces fonctions fournissent, en fonction du temps écoulé depuis le début de l'exposition, le rapport existant entre l'activité journalière excrétée par les voies urinaires et l'activité journalière inhalée, ou le rapport existant entre l'activité retenue dans le système respiratoire et l'activité journalière inhalée.

De même, les fonctions d'interprétation établies sur la base des publications 30 et 54 de la CIPR ([24] et [21]) et relatives à des incorporations uniques et chroniques de composés d'uranium sont ensuite présentées :

- Dans le cas d'une incorporation isolée, ces fonctions fournissent, en fonction du temps écoulé depuis l'exposition, le rapport existant entre la dose efficace engagée et l'unité de mesure de l'excrétion par les voies urinaires, ou le rapport existant entre la dose efficace engagée et l'unité de mesure de l'activité retenue dans le système respiratoire.

- Dans le cas d'une incorporation chronique, ces fonctions fournissent, en fonction du temps écoulé depuis le début de l'exposition, le rapport existant entre la moyenne annuelle de la dose efficace engagée et l'unité de mesure de l'excrétion par les voies urinaires, ou le rapport existant entre la moyenne annuelle de la dose efficace engagée et l'unité de mesure de l'activité retenue dans le système respiratoire.

Les limites de détection (activité minimale détectable [33]) associées aux différentes méthodes et techniques de mesure sont précisées et comparées aux seuils d'enregistrement et d'investigation recommandés par la CIPR 54 [21], en fonction de la classe de solubilité considérée et de la périodicité des examens.

La dose engagée pouvant passer inaperçue lors d'un examen en raison de l'existence d'une limite de détection (dose détectable) est ensuite déterminée, à partir des fonctions d'interprétation précédemment exposées :

- Dans le cas d'une incorporation isolée de composés d'uranium, les doses détectables minimales, moyennes, et maximales par examen sont présentées, en fonction de la classe de solubilité considérée, de la périodicité des examens, et de la durée réellement écoulée depuis l'incorporation.
- Dans le cas d'une incorporation chronique de composés d'uranium, la dose moyenne annuelle détectable est présentée, en fonction de la classe de solubilité considérée et de la durée écoulée depuis le début de l'incorporation.