



Enquête sur l'exposition des êtres humains aux contaminants dans le milieu : Un guide pour les calculs de l'exposition



Ce document a été divisé dans une série de fichiers pour faciliter leur téléchargement de notre site du web.

Partie 2 de 3

4. ESTIMATION DE L'EXPOSITION AU RAYONNEMENT IONISANT

Quelle est la différence entre les évaluations d'exposition au rayonnement et celles d'exposition aux produits chimiques?

Les calculs d'exposition au rayonnement ionisant sont traités d'une façon quelque peu différente des contaminants chimiques. Étant donné que les effets de l'exposition au rayonnement sont bien compris, les experts en rayonnement expriment la dose en une unité appelée sievert (*Sv*), qui est une mesure des effets néfastes qui peuvent être causés chez un être humain exposé à un rayonnement ionisant provenant d'une source de rayonnement. Contrairement aux contaminants chimiques, c'est l'exposition totale de toutes les sources qui est contrôlée, plutôt que l'exposition à partir de radionucléides individuels. Et ce pour la simple raison que c'est l'exposition totale qui détermine le risque pour la santé.

De plus, le taux de dose est exprimé sur une base annuelle, plutôt que sur une base journalière. Cette dose est calculée de façon à inclure toute irradiation **externe** directe reçue durant l'année, et la dose qui continuera à être reçue d'une façon **interne** à partir de tous les radionucléides ingérés ou inhalés au cours de l'année courante. La période au cours de laquelle l'on calcule cette dose prolongée, due au rayonnement interne, a été normalisée à 50 ans pour des expositions chez les adultes (âgés de 18 ans et plus) et 70 ans pour les expositions chez les enfants (âgés de moins de 18 ans). Contrairement au cheminement adopté pour les contaminants chimiques, cette technique tient compte de la dose du rayonnement qui continuera à être reçue à partir des radionucléides conservés dans le corps.

De quelle manière le rayonnement est-il mesuré?

On peut mesurer l'irradiation **externe** directement en utilisant les instruments appropriés. Pour pouvoir calculer la dose **interne** prolongée, des facteurs de conversion sont nécessaires, de façon à convertir la quantité de radionucléides apportés dans le corps, en becquerels, en une dose en sieverts, ou en millisieverts (*mSv*). Ces facteurs de conversion de dose (FCD) ont été calculés par le Conseil national de la protection contre le rayonnement (CNPR). Les FCD existent pour tous les radionucléides et, en conséquence, il est possible de calculer la dose totale qui sera reçue de tous les radionucléides apportés dans le corps au cours d'une année. C'est cette dose totale qui est importante, plutôt que la dose pour un radionucléide en particulier.

Calcul de la dose estimée d'exposition au rayonnement ionisant

On peut calculer la dose estimée (DE) pour l'exposition au rayonnement ionisant en additionnant toutes les expositions reçues au cours d'une année à partir de divers trajets d'exposition et on peut la représenter par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} DE &= DE_{\text{externe}} + DE_{\text{interne}} \\ &= DE_{\text{externe}} + DE_i + DE_e + DE_s + DE_a \end{aligned}$$

DE_{externe} est l'irradiation externe directe reçue au cours d'une année. DE_{interne} est la dose qui sera reçue au cours des 50 années suivantes (adultes) ou 70 années (enfants), à partir de tous les radionucléides reçus dans le corps au cours de l'année courante, en particulier :

DE_i est la dose engagée estimée provenant des radionucléides inhalés dans l'air,

DE_e est la dose engagée estimée provenant des radionucléides ingérés en buvant de l'eau,

DE_s est la dose engagée estimée provenant des radionucléides ingérés en mangeant du sol,

DE_a est la dose engagée estimée provenant des radionucléides ingérés en mangeant des aliments.

Pour calculer la dose engagée estimée à partir des radionucléides internes, on utilise une équation de la forme générale suivante pour chaque radionucléide et pour chaque trajet d'exposition :

$$DE_x = C \times TR \times TC \times FE \times FCD$$

dans laquelle,

| | |
|---------------------------------------|---|
| DE _x = | Dose engagée estimée sur 50 ans (adultes) ou 70 ans (enfants) à partir d'un radionucléide précis apporté dans le corps au cours de l'année courante (Sv) à partir d'un trajet d'exposition spécifique «x» (inhalation de l'air et ingestion de l'eau, du sol ou des aliments.) |
| C = | Concentration du radionucléide dans le trajet d'exposition envisagé (p. ex. Bq/L pour les radionucléides dans l'eau. |
| TC = Taux de contact : | La quantité d'eau, d'aliments, d'air, etc., prise dans le corps en une seule journée. Les unités types pour les aliments sont les grammes par jour (g/jour) et les litres par jour (L/jour) pour l'eau. |
| FC = Facteur de conversion : | Le facteur de 365 jours est nécessaire pour convertir le taux de contact (TC) à partir des unités/jour en unités/année. |
| FE = Facteur d'exposition : | Ce facteur indique combien de fois la personne est exposée au cours de l'année. Ce facteur est nécessaire, particulièrement lorsque l'exposition ne se produit pas chaque jour, comme c'est le cas au travail (seulement cinq jours par semaine) ou lorsque l'exposition est liée à des activités saisonnières (natation en été). |
| FCD = Facteur de conversion de dose : | Ce facteur convertit la quantité de radionucléides apportée dans le corps par inhalation ou ingestion, en becquerels, jusqu'à la dose prolongée sur 50 ans (adultes) ou 70 ans (enfants) en sieverts. Les FCD sont généralement exprimés en Sv/Bq. |

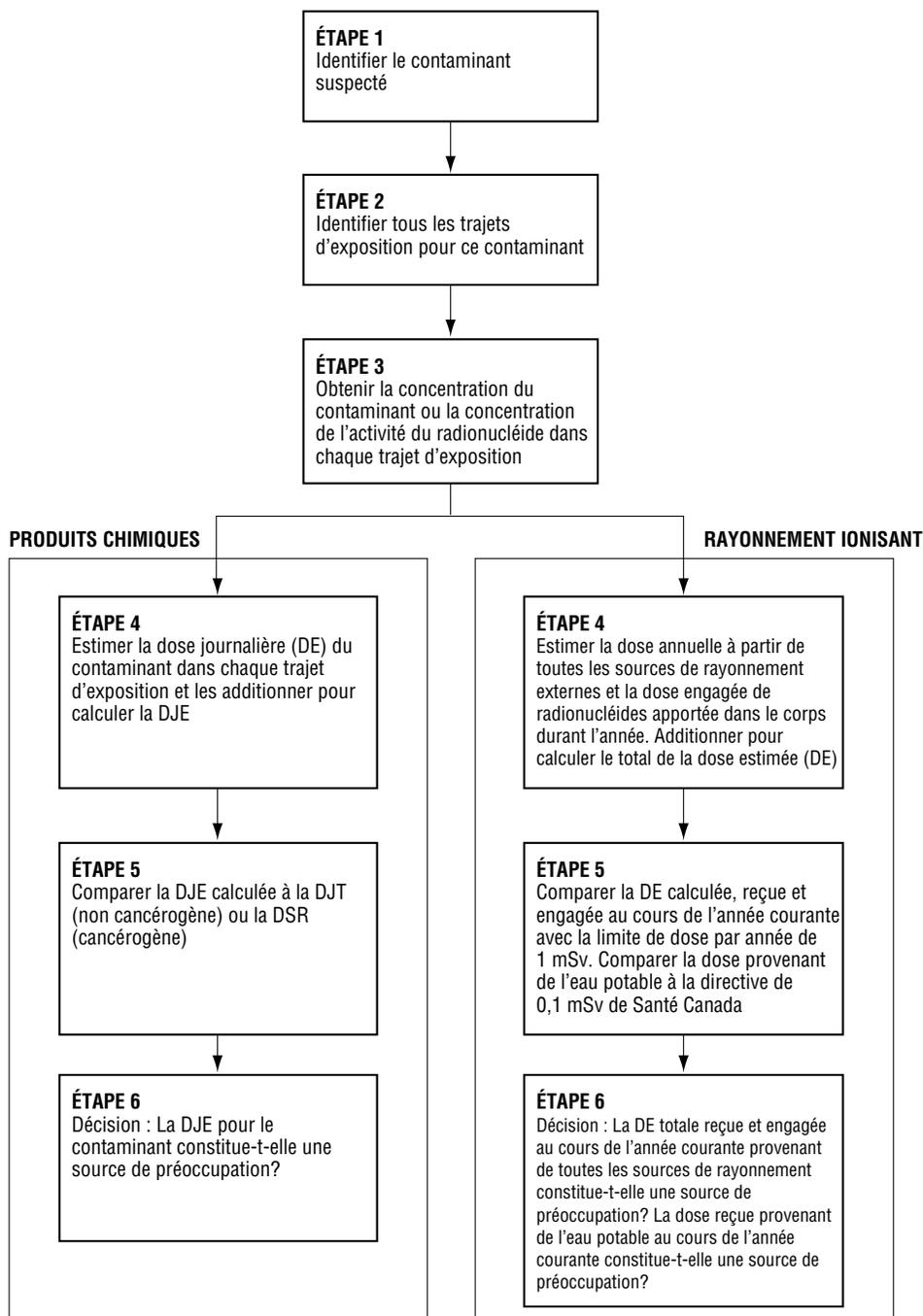
Quelles sont les limites recommandées à l'exposition aux rayonnements?

Les limites de dose pour l'exposition aux rayonnements, provenant de sources artificielles, ont été émises pour le public par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), et elles ont été établies à 1 *mSv* par an. Dans cette limite, il est implicite que les expositions doivent être maintenues à un bas niveau, et ce dans la limite du possible. Cette limite est sur le point d'être adoptée par la Commission de contrôle de l'énergie atomique du Canada (CCEA). Elle s'applique à la dose totale reçue, provenant de toutes les sources internes et externes, mais ne comprend pas le rayonnement d'origine naturelle auquel tout le monde est exposé ni les expositions reçues à des fins médicales. Les doses réelles reçues par le public, provenant de sources artificielles, sont beaucoup plus faibles que cette limite. Les sources artificielles comprennent les niveaux de radionucléides naturels, causés par des activités humaines comme, par exemple, l'exploitation des gisements d'uranium. De plus, la dose totale sur les limites du site des installations nucléaires ne peut pas dépasser 0,05 *mSv* par an telle que stipulée par la CCEA. Par comparaison, la dose reçue à partir d'un rayonnement d'origine naturelle est d'environ 3 *mSv* par an.

Santé Canada a émis des directives concernant les radionucléides dans l'eau potable. La dose totale reçue provenant de la consommation d'eau potable ne devrait pas dépasser 0,1 *mSv* par an, et cela comprend la dose provenant de tous les radionucléides existant à l'état naturel dans l'environnement, ainsi que les radionucléides artificiels. Ce niveau de dose correspond à un risque théorique d'environ 5 décès supplémentaires par cancer par million de personnes exposées.

5. MÉTHODE ÉTAPE PAR ÉTAPE POUR ESTIMER L'EXPOSITION AUX CONTAMINANTS ENVIRONNEMENTAUX

Ce manuel met l'accent sur les étapes quatre, cinq et six - le calcul de la dose journalière estimée de produits chimiques et la dose totale estimée de rayonnements - d'après l'organigramme suivant. Pour plus de renseignements sur les étapes un à trois, consultez la publication connexe «Un guide communautaire».



6. DOSE JOURNALIÈRE ESTIMÉE POUR LES PRODUITS CHIMIQUES : ÉQUATIONS ET EXEMPLES

Dans ce chapitre, nous décrivons la manière dont vous devriez réaliser les calculs pour la dose journalière estimée d'un contaminant chimique. Nous y donnons aussi des conseils sur les valeurs à utiliser dans les équations et nous y incluons des tableaux de valeurs moyennes que vous pouvez utiliser lorsque vous ne disposez d'aucune information locale précise.

Les équations et les calculs de ce chapitre risquent d'être compliqués. Consultez un scientifique expérimenté pour obtenir de l'aide.

Hypothèses et déductions

Plusieurs déductions subjectives peuvent être effectuées lorsque l'on calcule les expositions à l'aide des nombreuses formules disponibles. Cela se produit pour la simple raison que l'on ne dispose pas de certains renseignements pour les équations, ou que les valeurs dont on dispose ne reflètent pas, d'une façon précise, les véritables variations dans des domaines tels que la concentration des contaminants dans l'air, le sol, l'eau et les aliments. Nous indiquons ci-dessous un certain nombre des hypothèses et jugements qui peuvent être faits durant une évaluation de l'exposition :

- Comment le mouvement des contaminants dans l'environnement peut-il être prévu? Par exemple, comment peut-on prévoir la façon dont les courants éoliens disperseront les polluants dans l'atmosphère?
- Comment peut-on estimer l'importance et la nature de la population risquant d'être exposée au contaminant? Les mesures d'exposition prises à partir d'un petit segment de la collectivité peuvent-elles s'appliquer à l'ensemble de la collectivité et, dans ce cas, comment cela peut-il être réalisé?
- Comment peut-on faire entrer en ligne de compte les modes d'activité des êtres humains, tels que les variations dans le régime alimentaire, le style de vie et les divertissements?
- Comment peut-on estimer les différences d'exposition au contaminant comme le rythme, la durée et l'âge, lors de la première exposition?
- Comment peut-on estimer le taux de respiration, la consommation d'eau et d'aliments, le poids corporel et la surface corporelle dans le cas d'une population qui pourrait être exposée?
- Comment peut-on estimer les expositions de certains groupes à risques spéciaux, tels que les femmes enceintes et les jeunes enfants?

Étant donné que de tels jugements changent souvent les résultats d'une évaluation d'exposition, il faudra probablement faire appel aux conseils d'un professionnel avant de réaliser de tels calculs.

Les facteurs d'exposition

Le facteur d'exposition représente la valeur qui doit être calculée dans chacun des exemples suivants. Ce calcul sous-entend un jugement.

L'exposition aux contaminants peut se produire d'une façon intermittente et pas nécessairement sur une base quotidienne. Dans de tels cas, il est possible de calculer le facteur d'exposition (FE) de façon à estimer une dose moyenne

Il est important que les unités de mesure utilisées dans les équations soient compatibles lors du calcul des expositions.

durant la période d'exposition. Le facteur d'exposition se calcule en multipliant le nombre de jours dans l'année où l'exposition se produit par le nombre d'années au cours desquelles ce mode se répète. Le chiffre est alors divisé par la période au cours de laquelle l'on doit établir la moyenne pour la dose. Par exemple, si un enfant entre en contact avec un sol contaminé trois fois par semaine sur une période de quatre ans, le facteur d'exposition devrait être calculé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} FE &= \frac{(3 \text{ jours/semaine}) \times (52 \text{ semaines/année}) \times (4 \text{ ans})}{(4 \text{ ans}) \times (365 \text{ jours/année})} \\ FE &= 0,43 \end{aligned}$$

Dans cet exemple, la dose résultant d'une seule journée durant laquelle l'enfant a été exposé devrait être multipliée par 0,43 pour donner la dose quotidienne moyenne sur la période de quatre ans.

En calculant le facteur d'exposition, on doit faire preuve de discernement pour choisir la période au cours de laquelle la moyenne d'exposition est calculée. La période choisie dépend des effets prévus du contaminant sur la santé. Dans la plupart des cas, les effets prévus sur la santé seront ceux qui, comme le cancer ou la détérioration des organes, découlent d'une exposition continue à faible niveau sur une longue période. Dans de tels cas, les chercheurs établissent généralement une moyenne de toutes les expositions sur une existence de 70 ans.

Dans les cas où les enfants sont exposés à des contaminants, comme le plomb, qui peuvent affecter leur croissance, on peut choisir une période plus courte (4 à 12 ans) pour établir la moyenne d'exposition. Lors du calcul du facteur d'exposition pour un enfant, le facteur total d'exposition peut être divisé en trois parties pour permettre des changements dans le poids corporel de l'enfant, et l'on peut alors inclure dans le calcul final la consommation d'aliments, d'eau et d'air. Les chercheurs divisent généralement la vie d'un enfant en trois stades : les six premiers mois, de six mois à 5 ans et de 5 à 12 ans. Pour calculer l'exposition à vie d'un enfant, on doit calculer séparément chacune de ces périodes. Les expositions séparées sont alors additionnées. Nous montrons de quelle manière cela est réalisé dans les exemples qui suivent.

Donc, en règle générale, le calcul de la DJE nécessite la moyenne de l'exposition sur une existence de 70 ans, à moins que le contaminant puisse affecter la croissance de l'être humain dans un stade critique de l'existence comme c'est le cas pour l'enfance. Une fois encore, si vous n'êtes pas certain, consultez un expert dans le domaine de la toxicologie ou de l'épidémiologie.



Estimation de l'exposition provenant de la pollution de l'air

L'air est un trajet important pour les contaminants, et l'inhalation constitue une voie majeure d'exposition pour les contaminants qui existent sous forme de gaz atmosphériques ou restent attachés aux particules ou fibres en suspension dans l'air. Pour estimer la dose d'inhalation, il est nécessaire de disposer d'une évaluation de la quantité d'air qu'une personne respire dans une journée. Les valeurs recommandées concernant la quantité d'air inhalé par les divers groupes d'âges sont présentées au TABLEAU 1. Le sexe, l'âge et la quantité d'activités physiques d'une personne constituent les facteurs principaux qui affectent la quantité d'air respiré.

D'autres facteurs qui influencent le volume d'air respiré comprennent la température, l'altitude, la teneur en pollution dans l'air et le poids de la personne, sa taille, le fait qu'elle fume ou non, et si elle a ou non souffert d'une maladie cardiaque.

Pour calculer la dose d'inhalation, on prend pour acquis que 100 % du contaminant est absorbé après contact.

La quantité de contaminants absorbés dans le corps par l'inhalation (DE_i) peut être estimée par l'équation suivante :

$$DE_i = \frac{C \times TI \times FE}{PC}$$

dans laquelle,

- DE_i = Dose estimée obtenue par l'inhalation de l'air : La dose d'inhalation de l'air est exprimée en milligrammes de contaminant inhalé par kilogramme de poids corporel par jour (mg/kg/jour).
- C = Concentration du contaminant dans l'air, en milligrammes par mètre cube d'air (mg/m³).
- TI = Taux d'inhalation : La quantité d'air qu'une personne respire dans une journée, en mètres cubes (m³/jour). Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 1. Si l'air contaminé est respiré durant une partie de la journée seulement, le taux d'inhalation doit être ajusté en conséquence.
- FE = Facteur d'exposition : Indique combien de fois la personne a été exposée au contaminant durant une existence (sans unité). Reportez-vous à la discussion précédente concernant les facteurs d'exposition.
- PC = Poids corporel : Le poids moyen du corps en kilogrammes (kg) basé sur le groupe d'âge d'une personne. Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 2.

EXEMPLE :

Estimez l'exposition d'un enfant de 11 ans (juste avant son 12^e anniversaire) qui a été exposé pendant deux heures par jour, tous les jours, depuis sa naissance, au plomb dans l'air extérieur à une concentration de 8×10^{-6} mg/m³. L'exposition a pris fin à l'âge de 12 ans lorsque la famille a déménagé dans une autre région. N'oubliez pas de calculer les expositions pour les trois périodes d'âge : 0 - < 0,5 ans, 0,5 - < 5 ans, et 5 - < 12 ans. Dans ce cas, le taux d'inhalation (TI) de l'air contaminé est une fraction du montant total d'air respiré dans une journée. Il est calculé comme suit :

$$\frac{\text{2 heures d'exposition/jour}}{\text{24 heures par jour}} \times \text{quantité quotidienne totale d'air inhalé}$$

La quantité quotidienne totale d'air inhalé peut changer au fur et à mesure qu'un enfant grandit (voir TABLEAU 1 pour les valeurs à chaque stade de la vie d'un enfant). En multipliant chacune de ces valeurs par 2/24 (= 0,083) on obtient un TI de 0,166 m³/jour, 0,415 m³/jour, et 0,996 m³/jour pour chacune des trois périodes d'âge. Les facteurs d'exposition pour ces périodes sont calculés comme suit :

Âge (ans) Facteur d'exposition

0 - < 0,5 183 jours d'exposition dans les six premiers mois/4 380 jours de vie (12 ans) = 0,042

0,5 - < 5 1 642 jours d'exposition dans la seconde période/4 380 jours de vie (12 ans) = 0,375

5 - < 12 2 555 jours d'exposition dans la seconde période/4 380 jours de vie (12 ans) = 0,583

| Âge (ans) | Concentration | TI | FE | PC | Dose d'inhalation journalière (mg/kg/jour) |
|-----------------|--------------------|-------|-------|----|--|
| 0 - < 0,5 | 8×10^{-3} | 0,166 | 0,042 | 7 | $0,79 \times 10^{-5}$ |
| 0,5 - < 5 | 8×10^{-3} | 0,415 | 0,375 | 13 | $9,58 \times 10^{-5}$ |
| 5 - < 12 | 8×10^{-3} | 0,996 | 0,583 | 27 | $17,21 \times 10^{-5}$ |
| DE _i | | | | | $2,76 \times 10^{-4}$ |

La dose de plomb journalière estimée, absorbée par les poumons de cet enfant, est estimée à $2,76 \times 10^{-4}$ mg/kg/jour.

Modifié d'après ATSDR, 1992.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.



Estimation de l'exposition par ingestion d'eau

Le fait de boire de l'eau contaminée peut entraîner des expositions importantes aux substances dangereuses. Pour pouvoir estimer l'exposition aux contaminants provenant de l'eau consommée, il est important de déterminer la quantité d'eau consommée par les gens. L'ingestion de l'eau comprend l'eau pure, l'eau dans le café, le thé et autres boissons préparées à partir de l'eau du robinet, et l'eau dans les aliments cuits. Si vous ne disposez pas de valeurs précises pour votre collectivité, vous pouvez vous servir des valeurs recommandées pour l'ingestion journalière d'eau qui sont données au TABLEAU 1.

Pour calculer la dose d'ingestion de l'eau, on prend pour acquis que 100 % du contaminant est absorbé après l'ingestion.

La quantité d'un contaminant absorbé par le corps par l'intermédiaire de l'eau consommée (DE_e) peut être estimée à l'aide de l'équation suivante :

$$DE_e = \frac{C \times TI \times FE}{PC}$$

dans laquelle,

- DE_e = Dose estimée de l'eau consommée : La dose d'ingestion d'eau est exprimée en milligrammes du contaminant ingéré par kilogramme de poids corporel par jour (mg/kg/jour).
- C = Concentration du contaminant dans l'eau, en milligrammes par litre d'eau (mg/L).
- TI = Taux d'ingestion : La quantité d'eau qu'une personne boit dans une journée, en litres (L/jour). Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 1. Si la personne boit à partir d'une source d'eau contaminée pendant seulement une partie de la journée (par exemple, seulement au travail), le taux d'ingestion est alors ajusté en conséquence.
- FE = Facteur d'exposition : Indique la fréquence à laquelle la personne a été exposée au contaminant durant son existence (sans unité). Reportez-vous à la discussion précédente sur les facteurs d'exposition.
- PC = Poids corporel : Le poids moyen du corps en kilogrammes (kg) basé sur le groupe d'âge d'une personne. Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 2.

EXEMPLE :

Calculez l'exposition d'un être humain aux contaminants dans l'eau potable au travail. L'eau est contaminée par 367 mg/L de chlorure de méthyle. Pour calculer la dose d'exposition d'un adulte durant son existence, on supposera un poids corporel de 70 kg (TABLEAU 2) et une carrière de 30 ans, avec 5 jours de travail par semaine, et 50 semaines de travail par année. On supposera un taux d'ingestion d'eau (TI) de 1,5 L/jour (TABLEAU 1).

$$\begin{aligned}
 FE &= \frac{30 \text{ années de travail} \times 50 \text{ semaines de travail/année} \times 5 \text{ jours de travail/semaine}}{70 \text{ ans/vie complète} \times 365 \text{ jours/année}} \\
 &= 0,29 \\
 \text{Puis, } DE_e &= \frac{C \times TI \times FE}{PC} \\
 &= \frac{367 \text{ mg/L} \times 1,5 \text{ L/jour} \times 0,29}{70 \text{ kg}} \\
 &= 2,28 \text{ mg/kg/jour}
 \end{aligned}$$

En prenant pour acquis que le lieu de travail constitue la seule source d'exposition, l'exposition à vie au chlorure de méthyle d'un adulte dans les conditions ci-dessus serait, selon les calculs, de 2,28 mg/kg/jour.

Modifié d'après ATSDR, 1992.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Estimation de l'exposition par ingestion de sol

Le sol peut être ingéré d'une façon non intentionnelle, lorsqu'il colle aux mains ou aux aliments. Le sol peut être ingéré lorsque d'autres objets sont mis dans la bouche ou avalés. Tous les jeunes enfants le font dans une certaine mesure. La fréquence à laquelle les enfants avalent et portent des objets à leur bouche peut varier. Les enfants âgés d'un à trois ans, et les enfants qui présentent des désordres neurologiques, développent une habitude «d'avalier les objets» (connue sous le nom de pica) plus souvent que d'autres enfants.

Les valeurs recommandées pour l'ingestion journalière de sol par les enfants qui n'avalent pas d'objets régulièrement, et les adultes, sont présentées au TABLEAU 1. Pour calculer la dose d'ingestion de sol, on prend pour acquis que 100 % des contaminants ingérés avec le sol sont absorbés.

La quantité d'un contaminant absorbée par le corps en mangeant de la terre (DE_s) peut être estimée selon l'équation suivante :

$$DE_s = \frac{C \times TI \times FE \times 10^{-6}}{PC}$$

dans laquelle,

- DE_s = Dose estimée provenant de la consommation de terre : La dose d'ingestion de sol est exprimée en milligrammes du contaminant ingéré par kilogramme de poids corporel par jour (mg/kg/jour).
- C = Concentration du contaminant dans le sol, en milligrammes par kilogramme de sol (mg/kg).
- TI = Taux d'ingestion : La quantité de sol qu'une personne ingère dans une journée, en milligrammes (mg/jour). Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 1. Si la personne peut seulement ingérer du sol contaminé durant une partie de la journée (par exemple, un enfant exposé à du sol contaminé dans une garderie où il ne se rend que le matin), le taux d'ingestion est alors ajusté en conséquence.
- FE = Facteur d'exposition : Indique la fréquence à laquelle la personne a été exposée au contaminant durant son existence (sans unité). Reportez-vous à la discussion précédente sur les facteurs d'exposition.
- PC = Poids corporel : Le poids moyen du corps en kilogrammes (kg) basé sur le groupe d'âge d'une personne. Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 2.

REMARQUE : L'équation comprend un facteur de conversion de 10^{-6} , qui est nécessaire pour convertir la concentration du contaminant dans le sol (C), de mg/kg de sol à mg/mg de sol. De cette façon, les unités pour la concentration de sol sont les mêmes que celles pour l'ingestion de sol (toutes les deux sont maintenant en milligrammes de sol).

EXEMPLE :

Calculez l'exposition au sol pour un adulte à son lieu de travail. Le sol est contaminé avec 0,9 mg/kg de cadmium. Pour calculer la dose d'exposition d'un adulte sur une existence, on supposera un poids corporel de 70 kg (TABLEAU 2) et une carrière de 30 ans, avec 5 jours de travail par semaine, et 50 semaines de travail par année. On supposera un taux d'ingestion de sol (TI) de 20 mg/jour (TABLEAU 1).

$$\begin{aligned} FE &= \frac{30 \text{ années de travail} \times 5 \text{ jours de travail/semaine} \times 50 \text{ semaines de travail/année}}{70 \text{ ans/vie complète} \times 365 \text{ jours/année}} \\ &= 0,29 \\ \text{Puis, } DE_s &= \frac{C \times TI \times FE \times 10^{-6}}{PC} \\ &= \frac{0,9 \text{ mg/kg} \times 20 \text{ mg/jour} \times 0,29 \times 10^{-6}}{70 \text{ kg}} \\ &= 7,46 \times 10^{-8} \text{ mg/kg/jour de cadmium} \end{aligned}$$

En prenant pour acquis que le lieu de travail constitue la seule source d'exposition, l'exposition au cadmium d'un adulte dans les conditions ci-dessus est calculée comme étant $7,46 \times 10^{-8}$ mg/kg/jour, en moyenne sur une existence complète.

Modifié d'après ATSDR, 1992.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Estimation de l'exposition par ingestion d'aliments

Pour connaître la quantité d'un contaminant qui est ingérée avec la nourriture, il est important de connaître les habitudes alimentaires du groupe ou de la population à l'étude, et la concentration du contaminant dans différentes sortes d'aliments. Les habitudes alimentaires - la quantité de chaque sorte d'aliment différent consommée - dans votre collectivité peuvent différer de la moyenne nationale. Par exemple, dans certaines collectivités, on consomme beaucoup plus de poisson que la moyenne pour tous les Canadiens. Les groupes au sein de la collectivité peuvent aussi être différents des moyennes nationales. En général, les gens plus âgés mangent plus de poisson, comme c'est aussi le cas pour les amateurs de pêche sportive. Lorsque l'on dispose de valeurs concernant les habitudes alimentaires locales, celles-ci devraient être utilisées pour calculer la dose d'exposition. La quantité moyenne des divers groupes d'aliments consommés par les Canadiens est indiquée au TABLEAU 3 et elle peut être utilisée lorsque l'on ne dispose pas de valeurs locales.



La quantité d'un contaminant absorbé par le corps avec les aliments (DE_a) nécessite un calcul séparé pour chaque sorte d'aliment (ou groupe d'aliments) consommé. Cela pourrait donner l'impression que l'équation est plus compliquée, mais en fait, les étapes supplémentaires ne constituent qu'une répétition de l'équation de base utilisée pour le calcul des autres doses estimées (DE). La dose totale estimée provenant des aliments peut être calculée selon l'équation suivante :

$$DE_a = \frac{\text{(groupe alimentaire 1)} \quad \text{(groupe alimentaire 2)} \quad \text{(dernier groupe alimentaire)}}{\text{PC}} \quad + \quad \frac{\text{CA} \times \text{TC} \times \text{FE}}{\text{PC}} \quad + \dots + \quad \frac{\text{CA} \times \text{TC} \times \text{FE}}{\text{PC}}$$

dans laquelle,

DE_a = Dose estimée provenant des aliments : La dose d'ingestion d'aliments est exprimée en milligrammes du contaminant consommé par kilogramme de poids corporel par jour (mg/kg/jour).

CA = Concentration du contaminant dans les groupes alimentaires : La concentration du contaminant dans le groupe alimentaire est exprimée en milligrammes de contaminant par gramme d'aliment (mg/g).

TC = Taux de consommation : La quantité d'aliments provenant de ce groupe alimentaire consommé, exprimée en milligrammes par jour (mg/jour). Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 3.

FE = Facteur d'exposition : Indique à quelle fréquence la personne a consommé les aliments contaminés au cours de sa vie (sans unité). Reportez-vous à la discussion précédente sur les facteurs d'exposition.

PC = Poids corporel : Le poids moyen du corps en kilogrammes (kg) basé sur le groupe d'âge d'une personne. Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 2.

REMARQUE : On prend pour acquis que 100 % du contaminant consommé avec les aliments est absorbé par le corps.

Le calcul de la dose d'ingestion d'aliments, pour un contaminant dans les aliments cultivés à la maison, est similaire, mais tient compte du pourcentage de l'aliment contaminé qui est cultivé à la maison :

$$DE_a = \frac{\text{(groupe alimentaire 1)} \quad \text{(groupe alimentaire 2)} \quad \text{(dernier groupe alimentaire)}}{\text{PC}} \quad + \quad \frac{\text{CA} \times \text{TC} \times \text{FE} \times \text{PM}}{\text{PC}} \quad + \dots + \quad \frac{\text{CA} \times \text{TC} \times \text{FE} \times \text{PM}}{\text{PC}}$$

dans laquelle,

PM = pourcentage de ce groupe alimentaire qui est cultivé à la maison

Terrains agricoles : Prend pour acquis que 50 % de la viande, du lait, des fruits et des légumes consommés par les résidents dans les zones agricoles sont cultivés à la ferme.

Terrains résidentiels : Prend pour acquis que 7 % des fruits et légumes sont cultivés dans un potager à l'arrière de la maison. Aucune viande ni lait ne sont produits à la maison.

EXEMPLE :

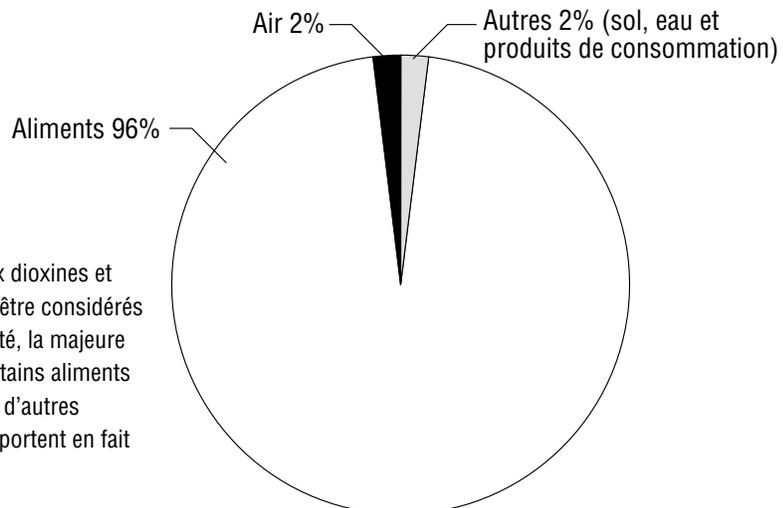
Estimez l'exposition d'une fillette, âgée entre 5 et 11 ans, au plomb provenant des aliments produits sur la ferme où elle vit. Étant donné qu'elle vit sur une ferme, (c.-à-d. sur un terrain agricole), on prend pour acquis que 50 % (c.-à-d. PM = 0,5) de la viande, du lait, et des fruits et légumes consommés par l'enfant sont produits à la ferme. Pour calculer la dose d'exposition provenant des aliments, on admet l'hypothèse d'un poids corporel de 27 kg (TABLEAU 2) et d'un taux de consommation (TC) de viande, de produits laitiers, de fruits et légumes de 120 g/jour, 609 g/jour et 198 g/jour respectivement (TABLEAU 3). On admet l'hypothèse d'un facteur d'exposition (FE) de 1, étant donné que l'enfant mange tous les jours. Cette évaluation est effectuée seulement pour le plomb provenant des aliments produits localement. Elle ne prend pas en considération d'autres sources de plomb comme celles qui proviennent des aliments achetés.

| Groupe alimentaire | CA | TC | PM | FE | PC | Dose journalière de contaminant (mg/kg/jour) |
|-----------------------|-------|-----|-----|-----|----|--|
| Viande | 0,01 | 120 | 0,5 | 1,0 | 27 | 0,022 |
| Produits laitiers | 0,005 | 609 | 0,5 | 1,0 | 27 | 0,056 |
| Légumes | 0,002 | 198 | 0,5 | 1,0 | 27 | 0,007 |
| DE_a | | | | | | 0,085 |

On estime donc à 0,085 mg/kg/jour la dose journalière de plomb provenant des aliments produits à la maison, reçue par cette fillette âgée entre 5 et 11 ans.

Modifié d'après ATSDR, 1992.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

FIGURE 3:**L'ingestion d'aliments constitue la principale voie d'exposition pour les dioxines et les furannes chez les Canadiens**

Bien que peu de gens soient exposés aux dioxines et aux furannes à des niveaux qui puissent être considérés comme présentant un risque pour la santé, la majeure partie de cette exposition provient de certains aliments contaminés (96 %) plutôt que de l'air ou d'autres sources. La plupart des aliments ne comportent en fait pas de dioxines ni de furannes.



Estimation des doses d'exposition par la peau (eau et sol)

L'absorption des contaminants par la peau dépend d'un certain nombre de facteurs, à savoir :

- la surface totale de la peau exposée;
 - la partie du corps en contact avec le contaminant;
 - la durée du contact;
 - la concentration du produit chimique sur la peau;
 - la possibilité pour le contaminant en question de traverser la peau pour se rendre dans le corps. C'est ce que l'on appelle «la perméabilité intrinsèque d'un produit chimique»;
- le type de substance au travers de laquelle le contaminant entre en contact avec la peau. Par exemple, le contaminant est-il dissous dans l'eau ou dispersé dans le sol, lorsqu'il entre en contact avec la personne?
 - si la peau est endommagée d'une façon quelconque avant d'entrer en contact avec le contaminant.

La zone de la peau exposée sera influencée par l'activité réalisée et la saison de l'année. La superficie totale de la peau varie aussi avec l'âge. Le TABLEAU 2 fournit des valeurs pour la surface de la peau de différentes parties du corps pour les adultes et les enfants.

Dose d'exposition lors du contact de l'eau contaminée avec la peau

L'absorption des contaminants dans l'eau au travers de la peau se produit durant les bains, les douches ou la natation. L'exposition des travailleurs par cette voie de pénétration dépend du type de travail réalisé, des vêtements protecteurs portés et de l'étendue et de la longueur du contact avec l'eau. La rapidité de déplacement d'un produit chimique au travers de la peau est affectée par les propriétés physiques et chimiques de la substance, à savoir :

- le poids, la dimension et la forme des molécules du produit chimique;
- sa charge électrostatique;
- si ce produit peut être dissous ou non dans l'eau et dans les matières grasses.

En général, les produits chimiques qui se déplacent rapidement au travers de la peau ont des poids moléculaires faibles. Ils n'ont aucune charge électrostatique et ils peuvent être dissous dans les matières grasses. Il est possible de mesurer la rapidité avec laquelle un produit chimique se déplace et cette mesure peut être exprimée en une valeur appelée constante de perméabilité. Cette constante est différente pour chaque produit chimique.

L'absorption au travers de la peau peut se produire plus rapidement lorsque la peau est coupée, éraflée ou sujette au psoriasis ou à l'eczéma.

Pour estimer l'absorption d'un contaminant dans l'eau au travers de la peau, on devra utiliser une constante de perméabilité (P). Toutefois, de telles constantes ont seulement été établies pour quelques produits chimiques. Même pour les produits chimiques qui ont été soumis à des tests, la valeur de la constante peut dépendre, dans une large mesure, du concept de l'expérience utilisée pour faire le test du produit chimique. Les constantes de perméabilité de la peau pour certains contaminants dans l'eau sont indiquées au TABLEAU 4. Pour faire preuve de prudence et ne pas sous-estimer l'exposition, on peut utiliser dans les calculs une perméabilité de 1,0 cm/heure. De nombreuses agences gouvernementales utilisent cette valeur au lieu des constantes présentées au TABLEAU 4.

La quantité d'un contaminant dans l'eau absorbée dans le corps au travers de la peau (DE_{ep}) peut être estimée avec l'équation suivante :

$$DE_{ep} = \frac{C \times P \times S \times TE \times FE \times 10^{-3}}{PC \times AT}$$

dans laquelle,

DE_{ep} = Dose estimée provenant de l'eau et passant au travers de la peau. La dose d'exposition de la peau est exprimée en milligrammes absorbés au travers de la peau par kilogramme de poids corporel par jour (mg/kg/jour).

C = Concentration du contaminant dans l'eau, en milligrammes par litre d'eau (mg/L).

P = La constante de perméabilité : exprimée en tant que le nombre de centimètres que le produit chimique parcourra au travers de la peau en une heure (cm/h). Une méthode prudente prend pour acquis une constante de 1,0 cm/h plutôt que les constantes indiquées au TABLEAU 4. Reportez-vous à la discussion précédente.

S = Surface : La surface de la peau exposée à l'eau contaminée, exprimée en centimètres carrés (cm²). Le TABLEAU 2 renferme les surfaces moyennes pour les diverses parties du corps.

TE = Temps d'exposition : Le nombre d'heures par jour durant lesquelles l'eau contaminée est en contact avec la peau.

FE = Facteur d'exposition : Indique combien de fois la personne a été exposée à l'eau contaminée au cours de sa vie (sans unité).

PC = Poids corporel : Le poids moyen du corps en kilogrammes (kg) basé sur le groupe d'âge d'une personne. Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 2.

REMARQUE : Le facteur de 10^{-3} est nécessaire pour convertir les unités de volume d'eau à partir des litres (L) en centimètres cubes (cm³) (1 L = 1 000 cm³). Cette conversion est nécessaire afin que la concentration de contaminants (C) utilise les mêmes unités que la constante de perméabilité (P) et la surface (S).

EXEMPLE :

Calculez l'exposition au travers de la peau d'un contaminant dans l'eau pour une femme qui vit dans une zone où la concentration (C) de benzène s'est avérée être de 0,002 mg/L. Elle vit dans sa maison depuis 25 ans et elle prend un bain quotidiennement. Ignorez les autres contacts de la peau avec l'eau. Prenez pour acquis que la totalité du corps (S = 18 200 cm²) est exposée pendant un quart d'heure (TE = 0,25) durant le bain. Le benzène se déplace au travers de la peau à un taux de 0,11 cm/h (P). Calculez l'exposition quotidienne de la peau de cette femme, établie en moyenne sur son existence que l'on évalue à 70 ans.

$$\begin{aligned} FE &= \frac{25 \text{ années} \times 365 \text{ jours/année}}{70 \text{ ans} \times 365 \text{ jours/année}} \\ &= 0,36 \end{aligned}$$

Puis,

$$DE_{ep} = \frac{C \times P \times S \times TE \times FE \times 10^{-3}}{PC}$$

$$\begin{aligned} DE_{ep} &= \frac{0,002 \text{ mg/L} \times 0,11 \text{ cm/heure} \times 18\,200 \text{ cm}^2 \times 0,25 \text{ heures/jour} \times 0,36 \times 10^{-3}}{70 \text{ kg}} \\ &= 5,1 \times 10^{-6} \text{ mg/kg/jour} \end{aligned}$$

L'exposition de la peau de cette femme au benzène à partir de l'eau du bain, établie en fonction d'une approximation de sa durée de vie, serait de $5,1 \times 10^{-6}$ mg/kg/jour.

Modifié d'après ATSDR, 1992.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Dose d'exposition lors du contact de sol contaminé avec la peau

L'absorption des contaminants provenant du sol ou de la poussière au travers de la peau dépend d'un certain nombre de facteurs :

- la surface de contact;
- la durée du contact;
- l'attraction chimique et physique entre le contaminant et le sol;
- la capacité du contaminant à pénétrer la peau;
- le poids des molécules individuelles du contaminant en question;
- de quelle manière le contaminant se dissout dans l'eau et les matières grasses.

Souvent, le contaminant dans le sol ne se prête pas en totalité à l'absorption par la peau. De nombreux produits chimiques organiques sont fermement attachés à la matière organique du sol, si bien qu'ils ne peuvent se déplacer au travers de la peau qu'avec difficulté. De plus, seules les molécules de contaminant en contact direct avec la peau peuvent être absorbées. La quantité de contaminant qui peut être absorbée à partir du sol peut faire l'objet de tests. Les résultats d'une telle expérience donnent un «facteur de biodisponibilité» se rapportant à ce contaminant en particulier, comme ceux qui sont indiqués au TABLEAU 5. Ces facteurs de biodisponibilité peuvent aussi varier en fonction de la méthode expérimentale dont on se sert pour les déterminer. La technique la plus prudente consiste à utiliser dans les calculs un facteur de biodisponibilité de 1,0 (= absorption à 100 %).

L'autre facteur variable lors du calcul de l'absorption au travers de la peau consiste à savoir avec quelle facilité le sol peut coller à la peau. Les données portant sur l'adhérence de la poussière et du sol à la peau sont limitées. Les valeurs recommandées pour la totalité du sol qui adhère (A) à la peau pour différents groupes d'âge sont présentées au TABLEAU 1.

La quantité d'un contaminant qui est absorbée à la suite d'un contact par la peau avec un sol contaminé (DE_{sp}) peut être estimée en utilisant l'équation suivante :

$$DE_{sp} = \frac{C \times A \times FB \times FE \times 10^{-6}}{PC}$$

dans laquelle,

DE_{sp} = Dose estimée selon le contact de la peau avec le sol : Cette dose est exprimée en milligrammes de contaminant absorbé au travers de la peau par kilogramme de poids corporel par jour (mg/kg/jour).

C = Concentration du contaminant dans le sol, en milligrammes par kilogramme de sol (mg/kg).

A = Le sol total adhérent : La quantité de sol qui adhérerait à une personne, exprimée en milligrammes par jour (mg/jour). Les valeurs recommandées qui peuvent être utilisées ici se trouvent au TABLEAU 1.

FB = Facteur de biodisponibilité : Le pourcentage de contaminant dans le sol qui est réellement libre de se déplacer hors du sol et au travers de la peau (sans unité). Une technique prudente consiste à utiliser un facteur de 1,0 (= disponibilité de 100 %) au lieu des facteurs indiqués au TABLEAU 5. Reportez-vous à la discussion précédente.

FE = Facteur d'exposition : Indique la fréquence à laquelle la personne a été exposée au contaminant durant une vie (sans unité). Consultez la discussion précédente sur les facteurs d'exposition.

PC = Poids corporel : Le poids moyen du corps en kilogrammes (kg) basé sur le groupe d'âge de la personne. Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 2.

REMARQUE : L'équation comprend un facteur de conversion de 10^{-6} , nécessaire pour convertir la concentration du contaminant dans le sol (C) à partir de mg/kg de sol en mg/mg de sol. De cette façon, les unités de concentration de sol sont les mêmes que celles pour le sol total adhérent à la peau (toutes les deux sont maintenant en milligrammes de sol).

EXEMPLE :

Estimez l'exposition d'un enfant de 11 ans (juste avant son 12^e anniversaire) qui a eu un contact par la peau avec un sol contaminé, quotidiennement depuis sa naissance. La concentration du contaminant dans le sol (C) est de 100 mg/kg. Supposez que le facteur de biodisponibilité (FB) soit de 1,0 (= 100 % de disponibilité). N'oubliez pas de calculer les expositions pour trois périodes d'âge : 0 - < 0,5 ans; 0,5 - < 5 ans; 5 - < 12 ans. Dans ce cas, le sol total adhérent (A) à l'enfant est de 2 200 mg/jour, 3 500 mg/jour et 5 800 mg/jour respectivement, pour chacune des trois périodes d'âge (voir TABLEAU 1). Les facteurs d'exposition pour chaque période d'âge sont calculés comme suit :

| Âge (ans) | Facteur d'exposition |
|-----------|--|
| 0 - < 0,5 | 183 jours d'exposition durant la première période/4 380 jours dans l'existence = 0,042 |
| 0,5 - < 5 | 1 642 jours d'exposition dans la seconde période/4 380 jours dans l'existence = 0,375 |
| 5 - < 12 | 2 555 jours d'exposition dans la seconde période/4 380 jours dans l'existence = 0,583 |

| Âge (ans) | C | A | FB | FE | Facteur de conversion | PC | Exposition journalière | |
|------------------|-----|-------|-----|-------|-----------------------|----|-------------------------|-------|
| | | | | | | | de la peau (mg/kg/jour) | |
| 0 - < 0,5 | 100 | 2 200 | 1,0 | 0,042 | 10 ⁻⁶ | 7 | 0,001 | |
| 0,5 - < 5 | 100 | 3 500 | 1,0 | 0,375 | 10 ⁻⁶ | 13 | 0,010 | |
| 5 - < 12 | 100 | 5 800 | 1,0 | 0,583 | 10 ⁻⁶ | 27 | 0,013 | |
| DE _{sp} | | | | | | | | 0,024 |

La dose journalière de contaminant pour cet enfant est estimée à 0,024 mg/kg/jour, une approximation basée sur sa durée de vie qui, à ce jour, est de 12 ans.

Modifié d'après ATSDR, 1992.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Calcul de la dose journalière estimée (DJE)

Une fois que vous avez calculé chacune des doses estimées, vous pouvez les additionner pour obtenir la dose journalière estimée totale (DJE) du contaminant. L'exemple suivant montre comment cela est réalisé.

$$\text{Dose journalière estimée (DJE)} = DE_i + DE_e + DE_s + DE_a + DE_{ep} + DE_{sp}$$

dans laquelle, DE_i est la dose estimée provenant de l'inhalation,

DE_e est la dose estimée provenant de l'ingestion d'eau,

DE_s est la dose estimée provenant de l'ingestion de sol,

DE_a est la dose estimée provenant de l'ingestion d'aliments,

DE_{ep} est la dose estimée d'exposition par contact de l'eau avec la peau,

DE_{sp} est la dose estimée d'exposition par contact de sol avec la peau.

EXEMPLE :

Calculez la DJE du pentachlorophénol d'une personne vivant à proximité d'un site dont on soupçonne la contamination. Vous adoptez l'hypothèse d'une exposition moyenne sur une existence complète de 70 ans. La dose estimée pour chaque combinaison possible de trajet d'exposition et voie d'exposition est donnée ci-dessous. On remarquera que chaque dose estimée a été calculée séparément pour chacun des cinq stades de l'existence, ce qui peut permettre d'améliorer la précision de l'évaluation totale. On a calculé chaque dose estimée en utilisant les équations décrites aux pages précédentes. Toutes les valeurs sont exprimées en nanogrammes de pentachlorophénol par kilogramme de poids corporel par jour (ng/kg/jour).

| TRAJET D'EXPOSITION | Âge (ans) | | | | | Exposition journalière (ng/kg/jour) |
|----------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|--------|---|
| | 0 - < 0,5 | 0,5 - < 5 | 5 - < 12 | 12 - < 20 | 20+ | |
| Inhalation d'air | 0,079 | 0,823 | 1,430 | 1,634 | 6,786 | $DE_i = 10,752$ |
| Ingestion d'eau | 0,001 | 0,007 | 0,005 | 0,006 | 0,029 | $DE_e = 0,048$ |
| Ingestion de sol | 0,007 | 0,012 | 0,014 | 0,016 | 0,064 | $DE_s = 0,113$ |
| Ingestion d'aliments | 0,705 | 6,771 | 4,990 | 5,703 | 19,786 | $DE_a = 37,955$ |
| Exposition de la peau à l'eau | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,014 | $DE_{ep} = 0,024$ |
| Exposition de la peau au sol | 0,004 | 0,071 | 0,009 | 0,010 | 0,036 | $DE_{sp} = 0,013$ |
| | 0,799 | 7,687 | 6,450 | 7,371 | 26,715 | DJE = 49,022 |

On estime donc que la dose journalière de pentachlorophénol reçue par cette personne serait de 49,022 ng/kg/jour (équivalant à 0,049 µg/kg/jour), établie en moyenne sur une existence de 70 ans.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Comparaison de la DJE à la DJT ou à la DSR

Pour déterminer si oui ou non la dose journalière estimée (DJE) que vous avez calculée est à un niveau relié à un risque accru pour la santé, comparez-la à la dose journalière tolérable (DJT) ou à la dose spécifique aux risques (DSR), selon ce qui est le plus approprié pour ce contaminant.

Non cancérigène

EXEMPLE :

Considérez l'exposition d'un pêcheur commercial au mercure de méthyle, dont la DJE a été estimée à 0,61 µg/kg/jour. Comment cela se compare-t-il à la DJT connue?

La DJT pour le mercure de méthyle d'après le TABLEAU 6 serait de 0,47 µg/kg/jour. La DJE de 0,61 µg/kg/jour est d'environ 1,3 fois au-dessus de la DJT. Ceci indique que l'exposition dépasse le niveau considéré comme un risque pour la santé. Des mesures devraient être prises pour réduire l'exposition au mercure de méthyle dans une telle situation.

Cancérigène

EXEMPLE :

La DJE pour le pentachlorophénol, calculée dans l'exemple de la page précédente, donne comme résultat 49,022 ng/kg/jour (= $4,9 \times 10^{-5}$ mg/kg/jour). Prenez pour acquis que l'indice de la pente (IP) est de 0,12 (mg/kg/jour)⁻¹ pour le pentachlorophénol et que le niveau de risque de cancer considéré comme acceptable était d'un décès supplémentaire par cancer par 100 000 personnes exposées (c.-à-d. 1×10^{-5}). De quelle manière la DJE se compare-t-elle à la DSR?

1. Calcul de la DSR pour le pentachlorophénol

$$\begin{aligned} \text{DSR} &= \frac{R}{\text{IP}} \\ &= \frac{1 \times 10^{-5}}{0,12 \text{ (mg/kg/jour)}^{-1}} \\ &= 8,3 \times 10^{-5} \text{ mg/kg/jour} \end{aligned}$$

2. Comparez la DJE à la DSR

La DJE pour l'exposition au pentachlorophénol est de $4,9 \times 10^{-5}$ mg/kg/jour, ce qui représente environ la moitié de la DSR calculée à $8,3 \times 10^{-5}$ mg/kg/jour. Ceci indique que l'exposition est inférieure au niveau de risque de cancer considéré comme acceptable.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Une autre façon d'appuyer vos résultats

Des lignes directrices ont été préparées pour de nombreux contaminants chimiques que l'on trouve dans le sol et l'eau. Si les niveaux contaminés dans le sol ou l'eau dépassent les lignes directrices, il est préférable d'approfondir l'enquête sur la contamination. Les lignes directrices, appelées Critères provisoires d'évaluation des sols et de l'eau, ont été préparées par le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) et elles figurent au TABLEAU 8. Si les concentrations de contaminants dans le sol ou l'eau de votre collectivité dépassent ces niveaux, vous pouvez les utiliser pour appuyer votre demande en vue d'une étude plus détaillée du problème.

7. DOSE ESTIMÉE POUR LE RAYONNEMENT IONISANT : ÉQUATIONS ET EXEMPLES

L'exposition aux sources de rayonnement ionisant à l'extérieur du corps entraînera une exposition externe directe. L'inhalation de l'air, l'ingestion des aliments, de l'eau ou du sol, qui contiennent des radionucléides naturels ou artificiels, peuvent entraîner une exposition interne aux rayonnements qui pourraient avoir été reçus sur une période très longue à la suite de l'inhalation ou de l'ingestion. Comme c'est le cas des contaminants chimiques, il est primordial de déterminer la quantité d'air, d'aliments, d'eau et de sol apportée dans le corps, de façon à pouvoir estimer la dose reçue à la suite d'une année d'inhalation ou d'ingestion.

Les valeurs recommandées pour les taux quotidiens d'inhalation et d'ingestion sont les mêmes que celles présentées au TABLEAU 1 et au TABLEAU 3. On peut obtenir les facteurs de conversion de dose (FCD) pour les enfants et les adultes en se référant aux publications de la Commission internationale de protection radiologique et du National Radiation Protection Board (R.-U.), ou en communiquant avec le Bureau de la radioprotection de Santé Canada, qui peut fournir l'expertise dans ce domaine. On trouvera au TABLEAU 7 des FCD pour certains radionucléides.

Facteurs d'exposition

Pour les radionucléides, la période moyenne au cours de laquelle l'exposition est estimée est considérée comme étant une année (365 jours), étant donné que les limites d'exposition sont exprimées sur une base annuelle. Par exemple, si un travailleur est exposé 4 fois par semaine pendant une année de travail de 50 semaines, le facteur d'exposition sera calculé comme suit :

| |
|---|
| $FE = \frac{(50 \text{ semaines de travail/année}) \times (4 \text{ jours de travail/semaine})}{(365 \text{ jours/année})}$ |
| $FE = 0,55$ |

Estimation de l'exposition au rayonnement par inhalation d'air

La dose engagée provenant de l'exposition au rayonnement interne à la suite de l'inhalation d'air (DE_i) peut être estimée à l'aide de l'équation :

$$DE_i = C \times TI \times FC \times FE \times FCD$$

dans laquelle :

- DE_i = La dose estimée sur 50 ans (pour les adultes) ou 70 ans (pour les enfants) par l'inhalation d'air au cours d'une année : La dose d'inhalation d'air est exprimée en sieverts (Sv) ou millisieverts (mSv).
- C = La concentration d'activité de radionucléide dans l'air, en becquerels par mètre cube d'air (Bq/m^3).
- TI = Taux d'inhalation : La quantité d'air qu'une personne respire dans une journée, en mètres cubes ($m^3/jour$). Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 1. Si l'air contaminé est respiré une partie de la journée seulement, le taux d'inhalation est ajusté en conséquence.
- FC = Facteur de conversion : Ce facteur de 365 jours est nécessaire pour convertir le taux d'inhalation (TI) d'unités/jour en unités/an.
- FE = Facteur d'exposition : Indique à quelle fréquence la personne a été exposée au contaminant au cours de l'année (sans unité).
- FCD = Facteur de conversion de dose (particulier à chaque radionucléide) : La dose prolongée sur 50 ans ou 70 ans résultant de l'inhalation de 1 Bq d'un radionucléide donné (Sv/Bq). Les FCD sélectionnés sont donnés au TABLEAU 7.

EXEMPLE :

Estimez la dose engagée de radiation d'un adulte mâle à la suite de l'inhalation pendant un an de tritium dans l'air sur le lieu de travail. Prenez pour acquis 50 semaines de travail par année, une semaine de travail de 5 jours avec une journée de travail de 8 heures. On admet l'hypothèse que le taux d'inhalation est de $23 m^3$ sur 24 heures (voir TABLEAU 1) si bien que le taux d'inhalation (TI) attribuable à 8 heures sur le lieu de travail serait de $7,67 m^3$. La concentration d'activité du tritium (C) dans l'air au lieu de travail a été mesurée à $0,1 Bq/m^3$ et le FCD pour le tritium par l'inhalation est de $1,80 \times 10^{-11} Sv/Bq$ (voir TABLEAU 7).

$$EF = \frac{1 \text{ année de travail} \times 50 \text{ semaines de travail/année} \times 5 \text{ jours de travail/semaine}}{365 \text{ jours/année}}$$

$$= 0,68$$

$$\begin{aligned} \text{Puis, } DE_i &= C \times TI \times FC \times FE \times FCD \\ &= 0,1 Bq/m^3 \times 7,67 m^3/jour \times 365 \text{ jours} \times 0,68 \times 1,8 \times 10^{-11} Sv/Bq \\ &= 3,4 \times 10^{-9} Sv \\ &= 3,4 \times 10^{-6} mSv \end{aligned}$$

La dose engagée estimée sur 50 ans du tritium, à la suite d'une inhalation pendant un an au lieu de travail, est de $3,4 \times 10^{-6} mSv$.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Estimation de l'exposition au rayonnement par ingestion d'eau

La dose engagée provenant de l'exposition au rayonnement interne à la suite d'ingestion d'eau (DE_e) peut être estimée à l'aide de l'équation :

$$DE_e = C \times TI \times FC \times FE \times FCD$$

dans laquelle :

- DE_e = La dose estimée sur 50 ans (pour les adultes) ou 70 ans (pour les enfants) par l'ingestion d'eau au cours d'une année : La dose d'ingestion d'eau est exprimée en sieverts (*Sv*) ou millisieverts (*mSv*).
- C = La concentration d'activité de radionucléide dans l'eau potable, en becquerels par litre d'eau (*Bq/L*).
- TI = Taux d'ingestion : La quantité d'eau qu'une personne boit dans une journée, en litres (*L/jour*). Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 1. Si la personne boit à partir d'une source d'eau contaminée pendant une partie de la journée seulement (par exemple, seulement au travail), le taux d'ingestion est ajusté en conséquence.
- FC = Facteur de conversion : Ce facteur de 365 jours est nécessaire pour convertir le taux d'ingestion (TI) d'unités/jour en unités/an.
- FE = Facteur d'exposition : Indique à quelle fréquence la personne a été exposée au contaminant au cours de l'année (sans unité).
- FCD = Facteur de conversion de dose (particulier à chaque radionucléide) : La dose prolongée sur 50 ans ou 70 ans résultant de l'ingestion de 1 *Bq* d'un radionucléide donné (*Sv/Bq*). Les FCD sélectionnés sont donnés au TABLEAU 7.

EXEMPLE :

Estimez la dose engagée de radiation d'un adulte mâle à la suite d'ingestion pendant un an de strontium 90 dans l'eau sur le lieu de travail. Prenez pour acquis 50 semaines de travail par année et une semaine de travail de 5 jours. Le taux d'ingestion d'eau journalier total est évalué à 1,5 *L/jour* (voir TABLEAU 1) dont la moitié ($TI = 0,75$ *L/jour*) est consommée sur le lieu de travail. La concentration d'activité du strontium 90 (C) dans l'eau au lieu de travail a été mesurée à $5,0 \times 10^{-3}$ *Bq/L* et le FCD pour le strontium 90 par l'ingestion est de $2,80 \times 10^{-8}$ *Sv/Bq* (voir TABLEAU 7).

$$FE = \frac{1 \text{ année de travail} \times 50 \text{ semaines de travail/année} \times 5 \text{ jours de travail/semaine}}{365 \text{ jours/année}}$$

$$= 0,68$$

$$\text{Puis, } DE_e = C \times TI \times FC \times FE \times FCD$$

$$= 5,0 \times 10^{-3} \text{ Bq/L} \times 0,75 \text{ L/jour} \times 365 \text{ jours} \times 0,68 \times 2,8 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$$

$$= 2,6 \times 10^{-8} \text{ Sv}$$

$$= 2,6 \times 10^{-5} \text{ mSv}$$

La dose engagée estimée sur 50 ans du strontium 90, à la suite d'une ingestion d'eau pendant un an au lieu de travail, est de $2,6 \times 10^{-5}$ *mSv*.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Estimation de l'exposition au rayonnement par ingestion de sol

La dose engagée provenant de l'exposition au rayonnement interne à la suite de l'ingestion de sol (DE_s) peut être estimée à l'aide de l'équation :

$$DE_s = C \times TI \times FC \times FE \times FCD$$

dans laquelle :

- DE_s = La dose estimée sur 50 ans (pour les adultes) ou 70 ans (pour les enfants) par l'ingestion de sol au cours d'une année : La dose d'ingestion de sol est exprimée en sieverts (*Sv*) ou millisieverts (*mSv*).
- C = La concentration d'activité de radionucléide dans le sol, en becquerels par kilogramme de sol (*Bq/kg*).
- TI = Taux d'ingestion : La quantité de sol qu'une personne ingère dans une journée, en milligrammes (*mg/jour*). Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 1. Si la personne consomme du sol contaminé une partie de la journée seulement (par exemple, seulement au travail), le taux d'ingestion est alors ajusté en conséquence.
- FC = Facteur de conversion : Ce facteur de 365 jours est nécessaire pour convertir le taux d'ingestion (TI) d'unités/jour en unités/an.
- FE = Facteur d'exposition : Indique à quelle fréquence la personne a été exposée au contaminant au cours de l'année (sans unité).
- FCD = Facteur de conversion de dose (particulier à chaque radionucléide) : La dose prolongée sur 50 ans ou 70 ans résultant de l'ingestion de 1 *Bq* d'un radionucléide donné (*Sv/Bq*). Les FCD sélectionnés sont donnés au TABLEAU 7.

EXEMPLE :

Estimez la dose engagée de radiation d'un adulte mâle à la suite de l'ingestion accidentelle pendant un an de césium 137 dans le sol sur le lieu de travail. En prenant pour acquis 50 semaines de travail par année, une semaine de travail de 5 jours avec une journée de travail de 8 heures, on admet l'hypothèse que le taux d'ingestion est de 20 mg sur 24 heures (voir TABLEAU 1). Ainsi le taux d'ingestion de sol (TI) attribuable à 8 heures sur le lieu de travail serait de 6,67 mg. La concentration d'activité du césium 137 (C) dans le sol au lieu de travail a été mesurée à 10,0 *Bq/kg*, ce qui est équivalent à 1×10^{-5} *Bq/mg*. Le FCD pour le césium 137 par l'ingestion est de $1,30 \times 10^{-8}$ *Sv/Bq* (voir TABLEAU 7).

$$FE = \frac{1 \text{ année de travail} \times 50 \text{ semaines de travail/année} \times 5 \text{ jours de travail/semaine}}{365 \text{ jours/année}}$$

$$= 0,68$$

Puis, $DE_s = C \times TI \times FC \times FE \times FCD$

$$= 1 \times 10^{-5} \text{ Bq/mg} \times 6,67 \text{ mg/jour} \times 365 \text{ jours} \times 0,68 \times 1,3 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$$

$$= 2,2 \times 10^{-10} \text{ Sv}$$

$$= 2,2 \times 10^{-7} \text{ mSv}$$

La dose engagée estimée sur 50 ans de césium 137, à la suite d'une ingestion accidentelle de sol au lieu de travail, est de $2,2 \times 10^{-7}$ *mSv*.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Estimation de l'exposition au rayonnement par ingestion d'aliments

La dose engagée provenant de l'exposition au rayonnement interne à la suite de l'ingestion d'aliments (DE_a) nécessite un calcul séparé pour chaque sorte d'aliment (ou groupe d'aliments) consommés. Ces étapes supplémentaires ne constituent qu'une répétition de l'équation de base utilisée pour calculer toutes les autres doses estimées. La dose estimée totale provenant des aliments peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$DE_a = \text{(groupe d'aliments 1)} \quad \text{(groupe d'aliments 2)} \quad \text{(dernier groupe d'aliments)}$$
$$DE_a = (C \times TC \times FC \times FE \times FDC) + (C \times TC \times FC \times FE \times FDC) + \dots + (C \times TC \times FC \times FE \times FDC)$$

dans laquelle :

- DE_a = La dose estimée sur 50 ans (pour les adultes) ou 70 ans (pour les enfants) provenant de l'ingestion d'aliments au cours d'une année : La dose d'ingestion des aliments est exprimée en sieverts (Sv) ou millisieverts (mSv).
- C = La concentration d'activité de radionucléides dans le groupe d'aliments, en becquerels par kilogramme (Bq/kg) ou par gramme (Bq/g) d'aliments.
- TC = Taux de consommation : La quantité d'aliments appartenant à ce groupe d'aliments consommés, exprimée en grammes par jour ($g/jour$). Les valeurs recommandées sont données au TABLEAU 3.
- FC = Facteur de conversion : Ce facteur de 365 jours est nécessaire pour convertir le taux de consommation (TC) d'unités/jour en unités/an.
- FE = Facteur d'exposition : Indique à quelle fréquence la personne a été exposée au contaminant au cours de l'année (sans unité).
- FCD = Facteur de conversion de dose (particulier à chaque radionucléide) : La dose prolongée sur 50 ans ou 70 ans, résultant de l'ingestion de 1 Bq d'un radionucléide donné (Sv/Bq). Les FCD sélectionnés sont donnés au TABLEAU 7.

EXEMPLE :

Estimez la dose engagée de radiation pour un adulte mâle à la suite de l'ingestion pendant un an de césium 137 et de radium 226 dans les aliments sur le lieu de travail. Prenez pour acquis 50 semaines de travail par année, une semaine de travail de 5 jours avec la consommation d'un repas constitué d'aliments préparés sur le lieu de travail de façon à ce qu'environ un tiers de la quantité moyenne d'aliments consommés, présentés au TABLEAU 3, provienne du lieu de travail. La concentration d'activité de radionucléides (C) mesurée dans les trois groupes d'aliments et leur FCD par ingestion (voir TABLEAU 7) sont présentés ci-dessous.

$$EF = \frac{1 \text{ année de travail} \times 50 \text{ semaines de travail/année} \times 5 \text{ jours de travail/semaine}}{365 \text{ jours/année}}$$

$$= 0,68$$

| Groupe d'aliments | Radionucléide | C | TC | FC | FE | FCD | DE _a pour chaque groupe d'aliments (Sv) |
|-------------------|---------------|---------------------------------|----|-----|------|----------------------|--|
| Viande | césium 137 | $2 \times 10^{-2} \text{ Bq/g}$ | 61 | 365 | 0,68 | $1,3 \times 10^{-8}$ | $3,9 \times 10^{-6}$ |
| Produits laitiers | césium 137 | $5 \times 10^{-5} \text{ Bq/g}$ | 94 | 365 | 0,68 | $1,3 \times 10^{-8}$ | $1,5 \times 10^{-8}$ |
| Légumes | radium 226 | $2 \times 10^{-3} \text{ Bq/g}$ | 83 | 365 | 0,68 | $2,2 \times 10^{-7}$ | $9,1 \times 10^{-6}$ |
| DE _a | | | | | | | $1,3 \times 10^{-5}$ |

La dose engagée estimée sur 50 ans pour le césium 137 et le radium 226, à la suite de la consommation d'aliments sur le lieu de travail au cours d'une année, représente $1,3 \times 10^{-5} \text{ Sv}$ ($1,3 \times 10^{-2} \text{ mSv}$).

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Calcul de la dose estimée (DE) pour le rayonnement ionisant

Une fois que vous avez estimé les doses engagées pour chaque trajet et les radionucléides résultant de l'exposition interne au rayonnement, vous pouvez les ajouter les uns aux autres pour obtenir la dose totale estimée pour tous les radionucléides apportés dans le corps durant une année ($DE_{interne}$). Cette valeur est ajoutée à la dose estimée mesurée à partir de sources externes ($DE_{externe}$) pour obtenir la dose totale estimée (DE) pour le rayonnement ionisant. L'exemple suivant montre comment ce calcul est effectué.

$$\begin{aligned} \text{Dose estimée (DE)} &= DE_{externe} + DE_{interne} \\ &= DE_{externe} + DE_i + DE_e + DE_s + DE_a \end{aligned}$$

dans laquelle :

$DE_{externe}$ est la dose estimée pour le rayonnement externe reçu durant l'année,

DE_i est la dose engagée estimée provenant des radionucléides inhalés dans l'air durant l'année,

DE_e est la dose engagée estimée provenant des radionucléides ingérés en buvant de l'eau durant l'année,

DE_s est la dose engagée estimée provenant des radionucléides ingérés en mangeant du sol durant l'année,

DE_a est la dose engagée estimée provenant des radionucléides ingérés en mangeant des aliments durant l'année.

EXEMPLE :

Estimez la DE pour l'exposition au rayonnement ionisant provenant de sources artificielles pour un adulte mâle sur le lieu de travail. Prenez pour acquis une année de travail de 50 semaines, une semaine de travail de 5 jours et une journée de travail de 8 heures avec la consommation d'un repas constitué d'aliments préparés sur le lieu de travail. La DE pour l'exposition interne par chaque trajet d'exposition possible a été calculée dans les quatre exemples précédents (air : $3,4 \times 10^{-6} \text{ mSv}$; eau : $2,6 \times 10^{-5} \text{ mSv}$; sol : $2,2 \times 10^{-7} \text{ mSv}$; aliments : $1,3 \times 10^{-2} \text{ mSv}$). La $DE_{externe}$ pour l'exposition aux radiations provenant de sources artificielles est mesurée par les instruments et on l'estime à $2,0 \times 10^{-2} \text{ mSv}$ au-dessus du rayonnement naturel de fond.

$$\begin{aligned} DE &= DE_{externe} + DE_i + DE_e + DE_s + DE_a \\ &= 2,0 \times 10^{-2} + 3,4 \times 10^{-6} + 2,6 \times 10^{-5} + 2,2 \times 10^{-7} + 1,3 \times 10^{-2} \\ &= 3,3 \times 10^{-2} \text{ mSv} \end{aligned}$$

La dose estimée d'exposition au rayonnement interne et au rayonnement externe à partir du rayonnement ionisant au cours de l'année sur le lieu de travail est estimée à $3,3 \times 10^{-2} \text{ mSv}$.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

Comparaison de la DE avec les limites d'exposition au rayonnement

Pour déterminer si la dose estimée (DE), celle que vous avez calculée à partir de toutes les sources artificielles, se trouve à un niveau relié à un risque accru pour la santé, comparez-la à la limite d'exposition au rayonnement de 1 mSv émise par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Comparez également la dose annuelle estimée que vous avez calculée pour le trajet d'exposition de l'eau potable (DE_e) à la directive d'eau potable de $0,1\text{ mSv}$ émise par Santé Canada. La norme pour l'eau potable s'applique à la dose totale provenant de tous les radionucléides dans l'eau potable, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle.

EXEMPLE :

Considérez une exposition sur le lieu de travail au rayonnement ionisant d'un homme décrit dans les exemples précédents, dont la DE totale (externe + interne) est estimée à $3,3 \times 10^{-2}\text{ mSv}$ et dont l'exposition interne provenant de l'eau potable (DE_e) est de $2,6 \times 10^{-5}\text{ mSv}$. Comment cela se compare-t-il avec les limites établies par la CIPR et Santé Canada?

La limite de dose publique de la CIPR s'applique à la dose totale d'une personne à partir de toutes les sources au cours de l'année, à l'exception du rayonnement naturel de fond et des expositions à des fins médicales. L'exposition sur le lieu de travail de $3,3 \times 10^{-2}\text{ mSv}$, décrite dans l'exemple ci-dessus, est bien en dessous de la limite de dose publique de 1 mSv , reçue ou engagée au cours d'une année.

Dans le cas de l'eau potable, en supposant que la dose totale reçue de l'approvisionnement en eau est à partir de strontium 90, comme nous l'avons donnée à l'exemple précédent, la DE_e de $2,6 \times 10^{-5}\text{ mSv}$ est bien en dessous de la norme de Santé Canada de $0,1\text{ mSv}$ pour la dose totale provenant de tous les radionucléides dans l'approvisionnement en eau.

Remarque : Cet exemple comporte des données fictives.

8. QUE FAITES-VOUS ENSUITE?

Avant de passer à l'étape suivante

Produits chimiques

- Tous les trajets d'exposition ont-ils été identifiés?
- Les doses journalières provenant de tous les trajets d'exposition ont-elles été calculées?
- Les DJE ont-elles été estimées en additionnant les expositions calculées pour chaque trajet d'exposition?
- Les DJE ont-elles été comparées aux DJT ou aux DSR, si celles-ci sont connues pour ces contaminants?

Rayonnement ionisant

- Tous les trajets d'exposition ont-ils été identifiés?
- Toutes les doses engagées estimées à partir de tous les trajets d'exposition ont-elles été calculées?
- La DE totale a-t-elle été estimée en additionnant les expositions calculées à partir de chaque trajet d'exposition, y compris le rayonnement provenant de sources extérieures au corps?
- La DE totale a-t-elle été comparée à la limite de dose de 1 *mSv* et la dose provenant du trajet d'exposition d'eau potable a-t-elle été comparée à la directive 0,1 *mSv*? Les expositions sont-elles aussi faibles que ce que l'on pourrait raisonnablement atteindre?

Que doit-on faire ensuite?

Une fois que l'exposition au contaminant a été estimée et comparée à la dose journalière tolérable (DJT), à la dose spécifique aux risques (DSR) ou à la limite de dose ou à la directive d'eau potable pour l'exposition au rayonnement, il est temps de décider quelles mesures l'on doit prendre sur la foi des résultats. Si la DJE est en dessous de la DJT ou de la DSR, ou si la DE de rayonnement est en dessous de la limite de dose ou de la directive pour l'eau potable, le risque pour la santé des gens peut être considéré comme faible, étant donné que l'exposition potentielle au contaminant est de moindre importance. Il est possible qu'aucune autre mesure ne soit nécessaire. Toutefois, si les expositions estimées dépassent les directives, vous pourriez envisager les possibilités suivantes :

- Informer le public sur les façons de réduire l'exposition. L'information pourrait comprendre des suggestions sur les habitudes et styles de vie qui pourraient réduire l'exposition;
- Recommander des mesures pour réduire la propagation des contaminants dans l'environnement;

- Recommander des normes volontaires pour les fabricants;
- Établir des normes et des directives à des niveaux qui permettront de protéger la santé des êtres humains.

Les choix envisagés dépendront du principal trajet d'exposition, du nombre de personnes exposées et de leur sensibilité ainsi que de la possibilité d'une interaction entre les différents contaminants.