Manuel de radioprotection

Appareils à rayons X

UNIVERSITÉ LAVAL

Comité de radioprotection
Service de sécurité et de prévention

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 5

1.1 Portée 5
1.2 Règlementation appliquée 5
1.2.1 Normes pour tous les appareils 5
1.3 Programme de radioprotection 6
1.3.1 Éléments du programme 6
1.3.2 Maintien du programme 7

2. STRUCTURE DE L'ORGANISATION 8

2.1 Comité de radioprotection 8
2.2 Rôles et responsabilités 8
2.2.1 Président du Comité de radioprotection 8
2.2.2 Direction du Service de sécurité et de prévention 8
2.2.3 Responsable de la radioprotection 9
2.2.4 Professeur et responsable de l'appareil 9

3. RADIOPROTECTION 10

3.1 L'atome 10
3.2 Rayonnement ionisant 11
3.2.1 La radioactivité 11
3.2.2 Les rayons X 13
3.3 Mesures des rayons X dans l'air et doses dans les tissus 13
3.3.1 Exposition (X) 13
3.3.2 Dose 13
3.3.3 Relation Exposition – Dose 14
3.3.4 Note sur le kerma (*Kinetic Energy Released in Matter*) 14
3.3.5 Dose équivalente (H_T) 15
3.3.6 Dose efficace (E) 15
3.3.7 Mesure de la dose 17
3.3.8 Exposition au rayonnement naturel et artificiel 17
3.4 Effets biologiques 18
3.4.1 Effets déterministes et stochastiques 20
3.5 organes reproducteurs et personnes en état de grossesse 21
3.5.1 Risques héréditaires 21
3.5.2 Risques somatiques (embryons et fœtus) 21
3.5.3 Seuils de doses 21
3.5.4 Dosimétrie pour les personnes en état de grossesse 22
3.6 Dosimétrie 22
3.6.1 Dose mesurée sur un dosimètre 22
3.6.2 Limites de doses appliquées à l'Université 22
3.6.3 Types de dosimètres et port 23
3.6.4 Entreposage du dosimètre 24
3.6.5 Dépassement des limites de dose 24
3.7 Radioprotection 25

3.7.1 La durée 25
3.7.2 La distance 25
3.7.3 Le blindage 25

4. PRODUCTION ET INTERACTIONS 28

4.1 Émissions de rayons X 28
4.1.1 Rayons X caractéristiques 28
4.1.2 Rayonnement de freinage 29
4.2 Interaction avec la matière 31
4.2.1 Effet photoélectrique 31
4.2.2 Diffusion de Compton 31

5. SYSTÈMES À RAYONS X ET RISQUES ASSOCIÉS 32

5.1 Composantes d'un tube à rayons 32
5.1.1 Tension électrique 32
5.1.2 Intensité du courant 33
5.1.3 Puissance 34
5.2 Risques associés aux appareils 34
5.2.1 Faisceau primaire 34
5.2.2 Fuites 35
5.2.3 Rayonnement parasite 35

6. les APPAREILS À RAYONS X à l'université 36

6.1 Appareils analytiques 36
6.1.1 Vérification de la sécurité sur les appareils analytiques 37
6.2 Appareils de radiographie 38

7. INSTRUMENTS DE DÉTECTION ET DE MESURE 40

7.1 Détecteurs à gaz 40
7.1.1 Chambres à ionisation 42
7.1.2 Compteurs proportionnels 42
7.1.3 Geiger-Müller (G-M) 42
7.2 Étalonnage et vérification 43

8. MESURES DE SÉCURITÉ 45

8.1 Règles et procédures 45
8.2 Affichage 45
8.2.1 Affichage sur les portes 45
8.2.2 Affichage sur les appareils 46
8.3 Contrôle des accès 46
8.4 Dosimétrie 46
8.5 Formation des utilisateurs 47

9. CONTRÔLE INTERNE ET INSPECTION 48

9.1 Contrôles internes des appareils analytiques 48
9.2 Inspection par une firme externe 48
9.2.1 Appareils analytiques et radiologiques non utilisés chez les humains 48
9.2.2 Appareils radiologiques utilisés chez les humains 48
9.2.3 Contrôle du matériel de protection individuelle plombé 49

10. SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION 50

10.1 Vérification des débits de doses 50

11. ACQUISITION, ÉVACUATION et TRANSFERT 51

11.1 Acquisition 51
11.1.1 Demande d'achat 51
11.1.2 Déclaration d'acquisition 51
11.2 Évacuation ou transfert vers une autre unité 51
11.2.1 Évacuation 51
11.2.2 Transfert 52

12. INCIDENTS 53

12.1 Numéros de téléphone d'urgence 53

ANNEXE 1 – PROCÉDURE DE VÉRIFICATION (APPAREIL ANALYTIQUE) **54**

ANNEXE 2 – PROCÉDURE DE VÉRIFICATION (XRF) **55**

ANNEXE 3 – ENTRETIEN ET DÉSACTIVATION DES SYSTÈMES DE SÉCURITÉ DES APPAREILS **56**

ANNEXE 4 – RÈGLES DE SÉCURITÉ (APPAREIL ANALYTIQUE) **57**

ANNEXE 5 – RÈGLES DE SÉCURITÉ (APPAREIL DE RADIOGRAPHIE) **58**

1. INTRODUCTION

Le Manuel de radioprotection – Appareils à rayons X est un document qui fournit de l'information aux utilisateurs et qui définit les responsabilités et obligations des personnes.

Ce manuel est produit par le Comité de radioprotection de l'Université et se conforme aux lois, règlements et codes de sécurité en vigueur.

Le manuel est disponible en ligne et il est mis à jour périodiquement. En cas de disparité entre ce manuel et les documents réglementaires, ces derniers ont préséance sur le manuel.

1.1 PORTÉE

Ce manuel s'adresse à toutes les personnes qui utilisent des appareils à rayons X à l'Université Laval. Il permet de:

- Mettre en œuvre les mesures appropriées afin de diminuer l'exposition aux rayonnements
- Gérer l'utilisation des appareils à rayons X conformément aux normes et règlements

Appareils de la faculté de médecine dentaire

La radioprotection liée aux appareils à rayons X est sous la responsabilité de la faculté de médecine dentaire. Ces appareils, utilisés en radiographie chez les humains, sont réglementés par l'Institut national de santé publique du Québec[1] (INSPQ).

La gestion effectuée par la faculté de médecine dentaire inclut les acquisitions et les évacuations, l'organisation des inspections réglementaires des appareils, la réception, l'échange et l'envoi des dosimètres de Santé Canada et les formations en radioprotection.

En matière de radioprotection, la faculté de médecine dentaire applique les lignes directrices de Santé Canada[2].

1.2 RÈGLEMENTATION APPLIQUÉE

Deux types d'appareils produisant des rayons X sont utilisés à l'Université, soit les appareils analytiques (appareils d'analyse aux rayons X) et les appareils utilisés en radiographie.

Les appareils analytiques comme des diffractomètres, des analyseurs portatifs à faisceaux ouverts, ou encore des prototypes expérimentaux, sont utilisés en enseignement et en recherche.

Les appareils utilisés en radiographie sont des appareils d'imagerie médicale. À l'Université Laval, ces appareils sont utilisés en médecine, en médecine dentaire et en médecine vétérinaire.

1.2.1 Normes pour tous les appareils

Tous les appareils à rayons X analytiques vendus et utilisés au Canada doivent être conformes à la loi de Santé Canada et à son règlement correspondant :

- Loi sur les dispositifs émettant des radiations (L.R.C. (1985), Ch-1)

[1] Application du *Règlement d'application de la Loi sur les laboratoires médicaux, la conservation des organes et des tissus et la disposition des cadavres*, ministère de la Santé et des Services sociaux.
[2] Radioprotection dans l'exercice de la dentisterie – recommandations concernant l'utilisation des appareils de radiographie dentaire - Code de sécurité 30 (1999)

- Règlement sur les dispositifs émettant des radiations (C.R.C. (1985), Ch. 1370)

Le futur propriétaire d'un appareil est responsable de vérifier auprès du fabricant ou de l'importateur que l'appareil est conforme au règlement en vigueur. Dans ce contexte, le Comité de radioprotection doit être informé de toute intention d'achat, afin de s'assurer du respect du règlement avant l'acquisition.

1.2.1.1 Lignes directrices pour les appareils analytiques

En matière de radioprotection, l'Université Laval respecte et applique les lignes directrices de Santé Canada suivantes :

- Appareils d'analyse aux rayons X-exigences et recommandations en matière de sécurité - Code de sécurité 32 (1994)
- Addenda au code de sécurité 32 : Appareils FRX portatifs manuels comprenant un tube à rayons X à faisceau ouvert (2014)
- Les appareils de radiologie industriels : radioprotection et sécurité - Code de sécurité 34 (2003)

1.2.1.2 Lignes directrices pour les appareils utilisés en radiographie

En matière de radioprotection, les lignes directrices de Santé Canada sont les suivantes :

- Médecine vétérinaire : Radioprotection en médecine vétérinaire - mesures de sécurité recommandées relativement à l'installation et à l'utilisation d'appareils à rayons x en médecine vétérinaire - Code de sécurité 28 (1991)
- Médecine dentaire : Radioprotection dans l'exercice de la dentisterie - recommandations concernant l'utilisation des appareils de radiographie dentaire - Code de sécurité 30 (1999)
- Grands établissements radiologiques médicaux : Procédures de sécurité pour l'installation, l'utilisation et le contrôle des appareils à rayons X dans les grands établissements radiologiques médicaux - Code de sécurité 35 (2008)

1.3 PROGRAMME DE RADIOPROTECTION

L'Université Laval applique le principe de radioprotection ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) en mettant en œuvre un programme de radioprotection. Par ALARA, on entend le maintien du degré d'exposition au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

Ceci signifie que même si les limites réglementaires d'exposition sont respectées pour une procédure d'utilisation, des efforts doivent être mis en place afin que l'exposition aux rayons X soit maintenue au plus bas niveau possible.

1.3.1 Éléments du programme

Les éléments suivants sont les éléments essentiels du programme de radioprotection:

- Déclaration obligatoire de l'acquisition d'un appareil à rayons X
- Surveillance de l'exposition
- Formation en radioprotection obligatoire pour tous les utilisateurs
- Affichage règlementaire et contrôle de l'inventaire
- Inspection des appareils par une firme externe des appareils
- Contrôle interne des appareils par le secteur de la radioprotection
- Vérification du matériel de protection individuelle
- Gestion sécuritaire des démantèlements

Les responsables des appareils (professeurs, chercheurs, membres du personnel) sont entièrement responsables de l'utilisation sécuritaire des appareils, et doivent s'assurer du respect du programme de radioprotection du Comité de radioprotection de l'Université. L'ensemble de leurs responsabilités est donné à la section 2.2.

1.3.2 Maintien du programme

L'implantation et le maintien du programme sont assurés par le secteur de la radioprotection (SRP) du Service de sécurité et de prévention (SSP) de l'Université.

La responsable de la radioprotection de l'Université a l'autorité de faire cesser toute utilisation d'un appareil à rayons X si elle juge que la sécurité des personnes n'est pas assurée.

2. STRUCTURE DE L'ORGANISATION

2.1 COMITÉ DE RADIOPROTECTION

Le Comité de radioprotection, sous l'autorité directe du vice-recteur à l'administration (Figure 1), est composé de professeurs et de professionnels. La composition de ce comité est décrite sur le lien suivant: https://oraweb.ulaval.ca/pls/cno/affiche_cno.proc_affiche?no=68.

Le comité voit à la mise en application et au maintien des lois et règlements en matière de protection contre les rayonnements ionisant et non ionisant sur le campus de l'Université ou à tout autre endroit placé sous sa responsabilité, à l'exclusion du rayonnement laser et des sources optiques dangereuses. Ceci inclut les substances nucléaires, les dispositifs producteurs de rayons X, les antennes de radiofréquence et les dispositifs émettant des champs magnétiques statiques.

Il est également responsable du développement, de l'implantation et du maintien du programme de radioprotection de l'Université.

Le comité produit un rapport annuel pour le vice-recteur à l'administration.

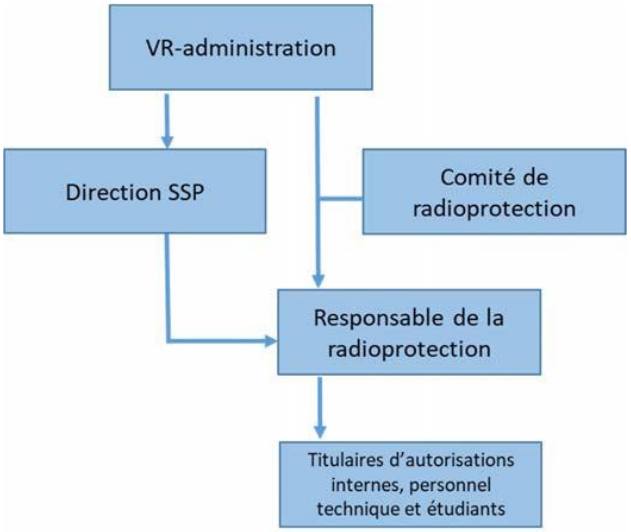


Figure 1 : Organigramme des intervenants en matière de radioprotection à l'Université Laval

2.2 RÔLES ET RESPONSABILITÉS

2.2.1 Président du Comité de radioprotection

Le président est la personne en autorité auprès de la haute direction en ce qui a trait à la radioprotection. Il porte auprès de vice-rectorat à l'administration les dossiers concernant la radioprotection.

2.2.2 Direction du Service de sécurité et de prévention

Le SSP assure la gestion et la coordination des ressources nécessaires à la protection des personnes, des biens et de l'environnement à l'Université.

2.2.3 Responsable de la radioprotection

La responsable de la radioprotection voit à l'application du programme de radioprotection. Elle a autorité sur les chercheurs, les étudiants et les employés de l'Université pour faire respecter les directives du Comité de radioprotection.

2.2.4 Professeur et responsable de l'appareil

De façon générale, les personnes responsables sont des professeurs de l'Université. Ces derniers peuvent toutefois déléguer certaines responsabilités à un utilisateur (étudiants de deuxième et de troisième cycle, professionnels de recherche, etc.), qui sera désigné comme étant le responsable de l'appareil dans le laboratoire.

Le responsable de l'appareil doit veiller à ce que toutes les personnes qui utilisent des appareils à rayons X dans les locaux qui sont sous sa responsabilité ont été autorisées à le faire, qu'elles ont reçu la formation de radioprotection donnée par le SRP, et qu'elles ont reçu une formation spécifique à l'appareil. Cette dernière assure que les utilisateurs possèdent les connaissances nécessaires avant l'utilisation de l'appareil à rayons X.

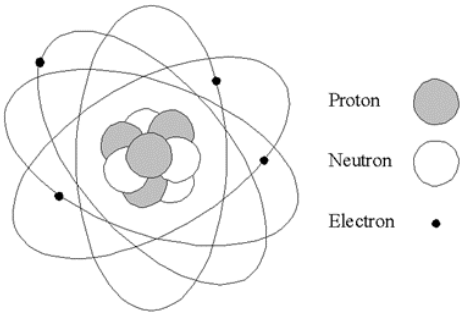
Le responsable doit s'assurer qu'une copie du présent manuel de radioprotection, fournie par le SRP, soit disponible pour toutes les personnes autorisées à utiliser l'appareil. Il doit aussi s'assurer que les règles de sécurité rapportées dans ce document sont respectées.

3. RADIOPROTECTION

Cette section présente l'atome et le rayonnement ionisant, les unités de mesure des rayons X, le concept de dose et les effets biologiques résultants, ainsi que la protection par le blindage.

3.1 L'ATOME

L'atome est le plus petit constituant de toute matière comportant des propriétés chimiques. Il est composé d'un noyau central, qui comporte des protons et neutrons, et il possède des électrons qui sont situés sur des orbitales de différentes énergies (Figure 2).



- Le proton (1,6726 x 10^{-27} kg) est une particule dense en comparaison de l'électron. C'est une particule qui possède une charge électrique positive.
- Le neutron (1,6749 x 10^{-27} kg) est de masse à peu près équivalente au proton, et est électriquement neutre.
- L'électron (9,1094 x 10^{-31} kg) est une particule très petite et qui possède une charge négative, égale en valeur absolue à celle du proton.

Figure 2 : Représentation d'un atome[3]

Il existe donc deux types de charges dans l'atome: la charge positive des protons (+) et la charge négative des électrons (-). Compte tenu de l'existence de forces de répulsion électrostatiques, les particules de mêmes charges se repoussent, alors que les particules de charges opposées sont attirées les unes vers les autres (Figure 3).

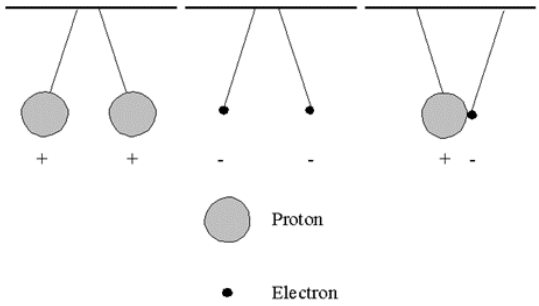


Figure 3 : Comportement de charges électriques[4]

[3] Figure tirée de https://radiationsafety.ca/
[4] Figure tirée de https://radiationsafety.ca/

3.2 RAYONNEMENT IONISANT

Le rayonnement ionisant est produit par le **noyau d'atomes radioactifs** (phénomène de radioactivité), ou à partir d'**électrons de haute énergie**, comme les électrons qui sont soumis à une haute tension dans les appareils à rayons X.

Ce rayonnement est constitué de particules très énergétiques (comme des particules alpha et bêta) ou de photons de haute énergie (photons gamma ou X).

Le rayonnement ionisant tire son nom du fait qu'il possède suffisamment d'énergie pour ioniser les atomes qu'il rencontre, c'est-à-dire pour éjecter des électrons de la structure atomique, produisant ainsi des ions (Figure 4).

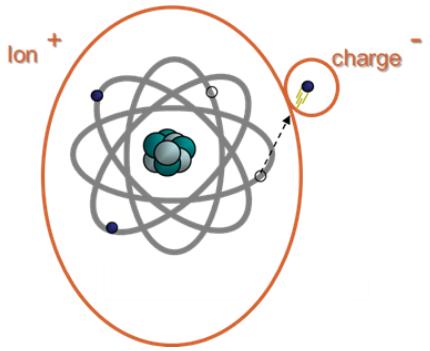


Figure 4 : Ion produit après le passage du rayonnement ionisant

L'énergie du rayonnement ionisant est donnée en **électron-volt** (eV). Un eV correspond à l'énergie acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt, ce qui correspond à 1,6 x 10^{-19} joules (J):

$$1 \text{ eV} = 1{,}6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

3.2.1 La radioactivité

La radioactivité est un phénomène de désintégration spontanée qui a lieu à partir du noyau de l'atome. Certains noyaux, instables, se transforment par un phénomène appelé ''désintégration'' afin d'atteindre un état plus stable. Cette transformation mène à la production d'un nouvel élément et engendre l'émission de rayonnements ionisants, sous la forme de particules chargées (particules alpha, bêta, etc.) ou de photons (rayons gamma).

À titre d'exemple, la figure 5 montre la désintégration d'un atome d'uranium-238 qui, par émission d'une particule alpha, se transforme en thorium-234.

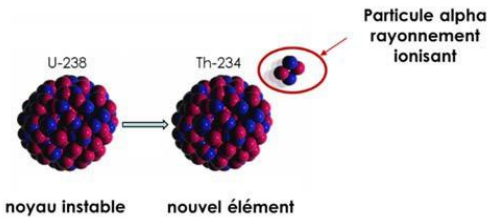


Figure 5 : Désintégration de l'uranium-238[5]

[5] Adaptée de : http://bergeron.christophe.free.fr/RadioPro/Definitions.php

Les rayonnements les plus communs émis par les noyaux radioactifs sont les rayonnements alpha, bêta et gamma.

Alpha

Les particules alpha sont constituées de deux protons et deux neutrons et sont hautement énergétiques. En raison de l'énergie qu'elles possèdent et de leur masse élevée, les particules alpha sont très ionisantes. La totalité de leur énergie est dissipée par ionisation sur une très courte distance, soit sur quelques micromètres (µm) de matières solides ou quelques centimètres (cm) d'air. Par conséquent, les particules alpha ne pénètrent pas l'épiderme ou les couches superficielles des organismes vivants et elles sont arrêtées (absorbées) par une simple feuille de papier. En revanche, les radionucléides émetteurs alpha sont particulièrement nocifs s'ils sont incorporés à l'intérieur d'un organisme (par ingestion ou inhalation par exemple), puisque la particule alpha émise transfère alors la totalité de son énergie aux cellules voisines du site de dépôt du radionucléide, par exemple dans le système digestif ou dans les poumons.

Bêta

Les particules bêta sont des électrons de haute énergie. Leurs énergies sont toutefois inférieures aux énergies des particules alpha. Les électrons étant des particules légères, les particules bêta possèdent un pouvoir de pénétration supérieur à celui des particules alpha (elles transfèrent leur énergie sur une plus grande distance). Selon leur énergie, ces particules peuvent parcourir 2 m dans l'air et pénétrer à des profondeurs de plusieurs millimètres (mm) dans la peau. Une feuille d'aluminium de six millimètres d'épaisseur, une vitrine en verre ou un blindage en plexiglas peut arrêter la plupart des particules bêta.

Rayons gamma

Le rayonnement gamma est composé de photons très énergétiques. Les photons étant des particules sans masse ni charge, ils interagissent moins facilement avec la matière que les particules alpha et bêta. Ils sont de loin les rayonnements les plus pénétrants, c'est-à-dire qu'ils peuvent parcourir plusieurs dizaines de mètres dans l'air et peuvent pénétrer en profondeur dans la matière (tissus organiques, eau, air, etc.). Les rayons gamma peuvent ainsi entraîner une exposition des organes internes même si les radionucléides émetteurs sont situés loin de l'organisme. Une partie des rayons gamma traversent toutefois le corps humain de part en part sans qu'il y ait interaction.

L'intensité des photons gamma est atténuée par d'importantes épaisseurs de matériaux denses tels que le plomb et le béton (Figure 6).

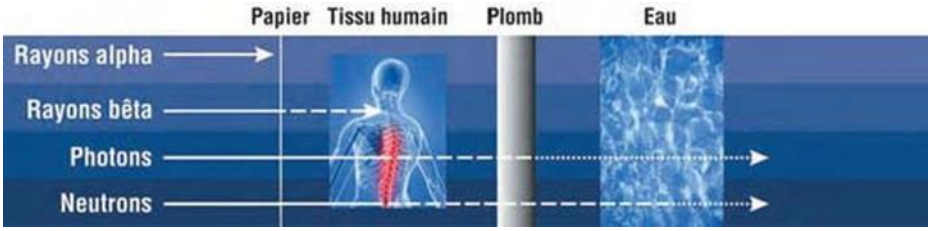


Figure 6 : Degré de pénétration de différents types de rayonnements ionisants[6]

Pour une présentation plus complète des phénomènes de radioactivité et des mesures de radioprotection à l'Université Laval, consulter le Manuel de radioprotection pour les substances nucléaires.

[6] Tirée de : https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads_fre/INFO-0827-Introduction-to-Dosimetry-f.pdf

3.2.2 Les rayons X

Contrairement au phénomène de radioactivité qui a lieu à partir du noyau de l'atome, les rayons X sont produits par les électrons. Les mécanismes de production des rayons X (rayons X caractéristiques et rayonnement de freinage) sont présentés à la section 4.1.

Identiques au rayonnement gamma, les rayons X sont des photons, mais généralement d'énergie inférieure :

- Énergie des rayons X[7] ~ 100 eV à 200 keV
- Énergie des rayons gamma ~ 100 eV à plusieurs centaines de MeV, voire GeV

Selon leur énergie, les rayons X vont pénétrer les tissus comme la peau et/ou entrainer l'exposition d'organes internes. Notons que certains rayons X vont traverser le corps humain de part en part sans qu'il n'y ait d'interaction.

L'intensité des rayons X est atténuée par les matériaux denses composés d'atomes avec un numéro atomique élevé, comme le plomb (voir section 3.7.3).

3.3 MESURES DES RAYONS X DANS L'AIR ET DOSES DANS LES TISSUS

Au cours de leur vie, des individus seront exposés aux rayons X dans le cadre de leur travail ou lors d'examens médicaux (voir section 3.3.8). Pour prévoir les effets biologiques qui peuvent découler de l'exposition au rayonnement ionisant, il faut connaître la quantité d'énergie qui a été déposée dans un organe ou un tissu, c'est-à-dire connaître la dose reçue.

Les concepts d'exposition et de dose sont présentés dans les sections suivantes.

3.3.1 Exposition (X)

L'exposition X permet de quantifier les rayons X (et gamma) en mesurant la charge électrique qu'ils produisent en ionisant l'air. Une (1) unité d'exposition se décrit comme étant la quantité de rayons X capable de produire 1 coulomb de charge électrique par kg d'air (C/kg).

$$1 \text{ unité d'exposition} = 1 \text{ C/kg air} = 6{,}25 \times 10^{18} \text{ charges/kg air}$$

Le Règlement sur les dispositifs émettant des radiations utilise l'exposition pour indiquer les débits maximums qui sont permis à proximité des appareils à rayons X[8]. Il indique ses limites en milliRoentgen/heure, plutôt qu'en C/kg/h, le Roentgen étant l'ancienne unité.

1 C/kg air = 3876 Roentgen (ancienne unité)

3.3.2 Dose

Différents concepts de dose sont utilisés pour prévoir les effets biologiques résultants d'une exposition au rayonnement. Le concept de dose de base est appelé **dose absorbée**.

La dose absorbée se calcule en utilisant uniquement l'énergie du rayonnement ionisant auquel l'organisme est exposé. Elle ne tient pas compte du type de rayonnement (alpha, gamma, X, etc.), ni des organes qui sont exposés (poumons versus os, etc.).

[7] Prendre note que certains rayons X peuvent atteindre des énergies de l'ordre des MeV.
[8] Maximum 0,5 mR/h à 5 cm de toute surface de l'appareil

Dans le système international (SI), son unité est le GRAY (Gy), une unité valant un joule (J) par kilogramme (Kg) de matière :

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$$

Ainsi, sachant qu'une source de rayonnement a déposé une quantité d'énergie de 0,6 J dans un tissu de 50 kg, la dose absorbée résultante sera de 0,6 J/50 kg, soit 0,012 Gy (12 mGy).

3.3.3 Relation Exposition – Dose

L'exposition représente une façon facile de quantifier le rayonnement en mesurant la quantité de charges produites dans l'air, en C/kg. Cependant, en radioprotection, c'est la quantité d'énergie absorbée dans les tissus qui importe, une quantité qui est donnée en J/kg ou en Gy.

Sachant que la charge électrique d'un ion est 1,6 x 10^{-19} C et que l'énergie dissipée par un ion est de 34 eV, l'exposition en C/kg peut être convertie en Gray dans l'air:

$$\begin{aligned} 1 \text{ unité d'exposition} &= 1 \text{ C/kg (air)} \\ &= [1 \text{ ion} / 1{,}6\text{x}10^{-19} \text{ C}] \text{ x } 34 \text{ eV/ion x } 1{,}6\text{x}10^{-19} \text{ J/eV x } 1\text{Gy}/(1\text{J/kg}) \\ 1 \text{ unité d'exposition} &= 34 \text{ Gy (air)} \end{aligned}$$

Pour expliquer la relation entre l'exposition dans l'air et la dose dans les tissus, nous pouvons considérer que l'absorption de l'énergie par une matière est approximativement proportionnelle à la **densité électronique** de la matière. Ainsi, sachant que la densité électronique des tissus biologiques[9] est de 3,28 x 10^{23} électrons/g et qu'elle est de 3,01 x 10^{23} électrons/g pour l'air[10], la relation suivante est observée :

$$1 \text{ C/kg dans l'air} = 34 \text{ Gy x } (3{,}28/3{,}01) = 37 \text{ Gy (tissus)}$$

Exposition
- Quantité d'ions produits dans l'air
- C/kg

Dose
- Énergie déposée (absorbée) dans les tissus
- J/kg ou Gray (Gy)

3.3.4 Note sur le kerma (*Kinetic Energy Released in Matter*)

Le kerma représente **l'énergie cinétique** que possèdent toutes les charges créées dans l'air après le passage de rayons, par quantité d'air irradié (rappel : l'exposition représente la **quantité** de charges produites par le passage des rayons X dans l'air, et la dose dans les tissus rapporte l'**énergie absorbée** par quantité d'air irradié).

Kerma
- Énergie cinétique des ions produits dans l'air
- J/kg ou Gray (Gy)

[9] Calculé à partir de la composition élémentaire des tissus musculaires : 5,98 × 10^{22} H/g, 2,75 × 10^{22} O/g, 0,172 × 10^{22} N/g et 6,02 × 10^{22} C/g. Source: Cours XSO de https://radiationsafety.ca/events/x-ray-safety-officer-course/

[10] Source: Cours XSO de https://radiationsafety.ca/events/x-ray-safety-officer-course/

Le kerma dans l'air est la quantité utilisée pour le suivi des limites permises chez les travailleurs et patients en Ontario.

3.3.5 Dose équivalente (H_T)

La dose absorbée décrite plus haut indique la quantité d'énergie qui a été déposée dans un tissu, mais elle ne tient pas compte du type de rayonnement ionisant impliqué (alpha, bêta, gamma, rayons X, neutrons, etc.), donc du processus de transfert d'énergie qui a lieu entre le rayonnement et les cellules biologiques.

Or nous savons que différents types de rayonnements transfèrent leur énergie de façon plus ou moins « concentrée » aux cellules[11], causant ainsi plus ou moins de dommages biologiques. Par exemple, nous savons qu'un (1) Gy d'énergie déposé par des particules alpha sera plus dommageable pour le corps qu'un (1) Gy déposé au même endroit par des rayons X, parce que l'ampleur de l'effet biologique suivant une exposition dépend du type de rayonnement en cause.

Pour tenir compte du transfert d'énergie dans le calcul de dose, un *facteur de pondération des rayonnements* (w_R, où R = radiation), qui tient compte de la capacité du rayonnement à causer des dommages biologiques, est attribué à chaque type de rayonnement (Tableau 1).

Tableau 1 : Facteurs de pondération pour le calcul de la dose équivalente.

Type de rayonnement	Facteur de pondération (w_R)
Rayons X et gamma	1
Particules bêta	1
Particules alpha	20
Neutrons	5 à 20, selon leur énergie

En multipliant la dose absorbée (D) avec un ou des facteurs de pondération, on obtient la "dose équivalente" (H_T, où T = tissus) :

$$H_T = D \times w_R$$

La dose équivalente H_T est exprimée en Sievert (généralement en millisievert, mSv).

Le concept de dose équivalente est utilisé afin d'évaluer les risques biologiques à court terme (effets déterministes, voir la section 3.4.1.1), comme des brûlures, érythèmes, etc.

3.3.6 Dose efficace (E)

Nous savons que différents types de rayonnements transfèrent leur énergie de façon plus ou moins « concentrée » dans la matière. Or nous savons également que certains tissus et organes sont plus sensibles au rayonnement ionisant, comme les cellules à division rapides, telles les cellules des organes reproducteurs. Le risque de voir

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_energy_transfer

apparaitre des effets biologiques sur l'ensemble du corps est donc plus élevé à la suite de l'exposition d'organes ou de tissus qui sont plus radiosensibles.

Par exemple, un (1) Gy d'énergie déposé dans les organes reproducteurs sera plus dommageable pour l'ensemble du corps qu'un (1) Gy déposé sur la surface des os. Si on veut évaluer le risque à long terme de développer un effet (ex. un cancer), on rapporte au « corps entier » la dose reçue à l'organe : c'est le calcul de la dose efficace.

Pour ce, on inclut dans le calcul un *facteur de pondération tissulaire* (w_T, où T = tissus), qui tient compte de la radiosensibilité de chaque organe et de la gravité des cancers radio induits correspondants (Tableau 2).

Tableau 2 : Facteur de pondération tissulaire (W_T)[12].

Organe ou tissu	W_T	Organe ou tissu	W_T
Organes reproducteurs	0,20	Foie	0,05
Moelle osseuse	0,12	Œsophage	0,05
Côlon	0,12	Thyroïde	0,05
Poumon	0,12	Peau	0,01
Estomac	0,05	Surface des os	0,01
Vessie	0,05	CORPS ENTIER	1

En multipliant la dose équivalente avec un ou des facteurs de pondération, on obtient la ''dose efficace'' (E), également exprimée en Sievert :

$$E = H_T \times w_T$$

Le concept de dose efficace est utilisé afin d'évaluer les risques biologiques à long terme (effets stochastiques, voir la section 3.4.1.2), principalement les risques de voir se développer un cancer.

Ce concept de dose permet également de comparer les risques associés à des expositions qui sont différentes. Par exemple, le risque de développer un cancer dans 10 ans chez une personne qui a subi une exposition aux poumons par des particules alpha n'est pas le même que celui présent chez une personne qui a subi une exposition à la peau par des particules bêta. La dose efficace permet de ramener les risques de ces deux types d'expositions différentes au « corps entier » et ainsi, de les comparer.

[12] https://nuclearsafety.gc.ca/fra/resources/radiation/introduction-to-radiation/radiation-doses.cfm

Exemple
Une personne A exposée aux rayons X reçoit une dose de 70 mGy à la peau. Une personne B reçoit la même dose (70 mGy, rayons X) aux poumons. Les doses efficaces respectives seront:

Personne A $E = (D \times w_R) \times w_T = (70 \times 1) \times 0{,}01 = 0{,}7$ mSv

Personne B $E = (D \times w_R) \times w_T = (70 \times 1) \times 0{,}12 = 8{,}4$ mSv

Le risque à la santé pour la personne B (qui a reçu une dose aux poumons) est ainsi bien supérieur à celui associé à la personne A (qui a reçu la même quantité d'énergie, mais à la peau).

3.3.7 Mesure de la dose

Pour les utilisateurs d'appareils à rayons X à l'Université, ce sont la dose équivalente à la peau et la dose efficace au corps entier qui sont évaluées, à l'aide de dosimètres. Voir la section 3.6 sur la dosimétrie.

3.3.8 Exposition au rayonnement naturel et artificiel

Le rayonnement ionisant a toujours été présent dans l'univers. Il fait partie des conditions physiques dans lesquelles la vie a évolué sur la Terre.

L'humain est exposé à diverses sources de rayonnement, comme le rayonnement cosmique (en provenance du soleil, de notre galaxie ou de l'extérieur) et le rayonnement terrestre, émis par des radionucléides naturellement présents dans les sols (uranium, thorium, etc.). L'ingestion de radionucléides, comme le potassium-40 présent dans plusieurs aliments (bananes, noix, pommes de terre, etc.), et l'inhalation de radionucléides naturellement présents dans l'air, tel que le radon, sont également des sources d'exposition au rayonnement.

La dose annuelle provenant du rayonnement naturel est environ 1,7 mSv par individu au Canada (Figure 7). Il est à noter que cette dose peut varier considérablement en fonction du lieu géographique où l'on habite.

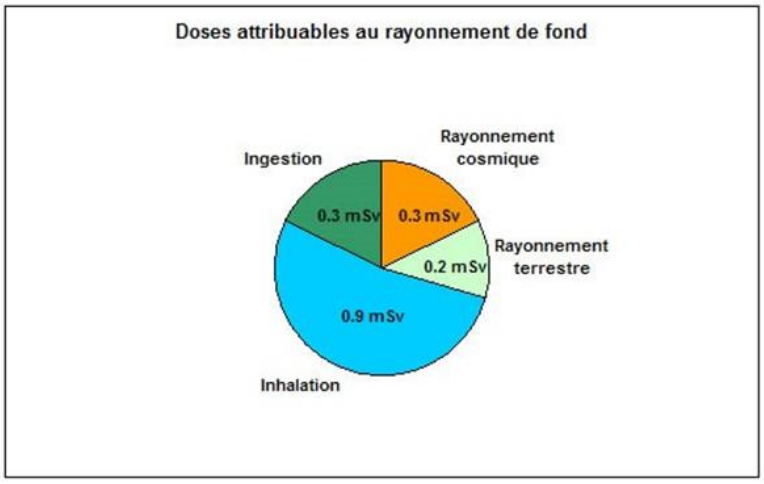


Figure 7 : Formes d'exposition au rayonnement naturel[13]

[13] https://nuclearsafety.gc.ca/fra/resources/fact-sheets/natural-background-radiation.cfm

Depuis un peu plus d'un siècle, une exposition à des sources de rayonnement ionisant d'origine artificielle (les rayons X!) s'est ajoutée à l'exposition naturelle. Ainsi, notre exposition personnelle due aux sources naturelles et artificielles totalise en moyenne aujourd'hui, selon notre environnement, environ 3 mSv par année (Figure 8).

L'exposition au rayonnement d'origine artificielle provient en très grande partie du milieu médical (radiographies et autres techniques diagnostiques ou thérapeutiques). Un pourcentage beaucoup plus modeste vient d'autres types d'activités industrielles (par exemple, les activités liées aux centrales nucléaires), militaires ou de recherche.

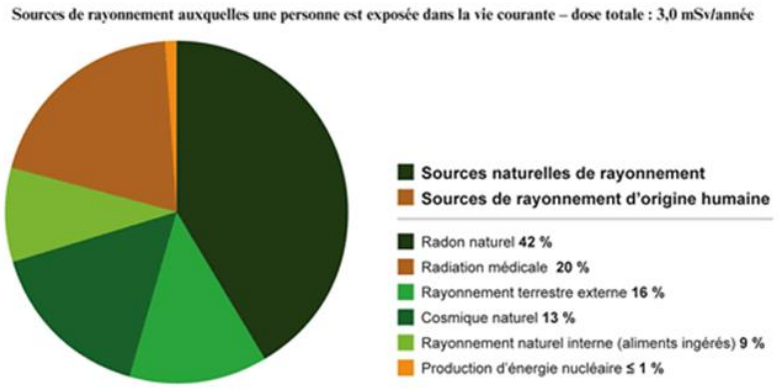


Figure 8 : Formes d'exposition au rayonnement naturel et artificiel[14]

3.4 EFFETS BIOLOGIQUES

Lors de leur interaction avec la matière biologique, les rayons X vont éjecter des électrons des atomes qui composent les cellules et mener à la formation d'espèces hautement instables et réactives, comme des espèces radicalaires[15]. Différentes réactions chimiques et biologiques peuvent ainsi avoir lieu et parmi celles-ci, des lésions dans le matériel génétique des cellules (l'ADN[16], figure 9) peuvent survenir.

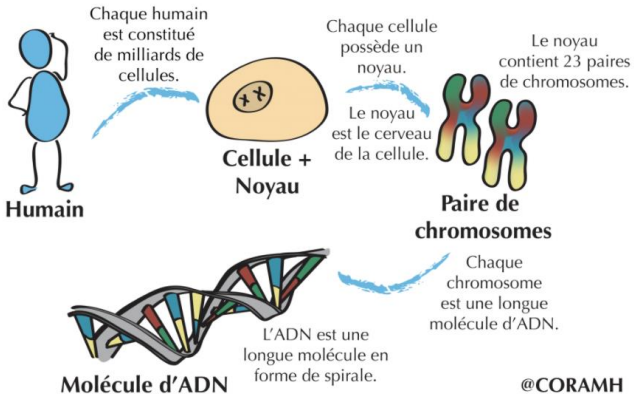


Figure 9 : Cellule et ADN[17]

[14] http://www.cnsc-ccsn.gc.ca/fra/resources/fact-sheets/radon-fact-sheet.cfm
[15] Les espèces radicalaires sont des atomes ou des fragments de molécules instables, parce qu'ils comportent des électrons non pairés.
[16] Acide désoxyribonucléique, une macromolécule présente dans le noyau des cellules.
[17] https://coramh.org/genetique-et-heredite/

Des lésions dans l'ADN se produisent des milliers de fois par jour dans le corps humain, de façon spontanée ou à la suite d'agressions, telles des agressions de natures chimiques (ex. la pollution) ou physiques (les rayons UV, etc.). Le taux de réparation de l'ADN dépend de nombreux facteurs, comme le type de cellule qui est exposée, son âge et son environnement extracellulaire, mais la majorité du temps, l'ADN se répare parfaitement. Les cellules survivent et aucun effet n'est observé sur l'organisme.

Toutefois, une cellule qui a accumulé une grande quantité de dommages à son ADN, et qui n'est plus capable d'effectuer efficacement la réparation des dommages subis, peut se retrouver dans les situations suivantes :

- La réparation de l'ADN n'a pas lieu

  Dans ce cas, la cellule ne se répare pas, elle ne se reproduit plus et éventuellement elle meurt (apoptose) ou entre dans un état de dormance irréversible (sénescence). Si cela affecte seulement quelques cellules, l'effet peut passer inaperçu. Si toutefois des quantités importantes de cellules sont détruites, une pathologie tissulaire sera observée (nécrose des tissus).

- La réparation a lieu, mais elle est inexacte :

  Ici la cellule survit, mais la réparation inadéquate peut mener à une mutation dans l'ADN. La cellule portant cette mutation, si elle n'est pas éliminée par le système immunitaire, peut se reproduire et mener à la formation d'une tumeur cancéreuse ou causer une anomalie héréditaire, selon le type de cellules touchées.

Les effets biologiques résultant de lésions dans l'ADN des cellules peuvent donc être observés chez l'individu qui a été exposé. Si les organes reproducteurs de l'individu ont également été exposés, les effets pourront être observés chez sa descendance.

Lorsque les effets sont observés chez la personne exposée, ces effets sont dits **somatiques**.

Lorsque les effets sont observés chez la descendance, ces effets sont dits **héréditaires**.

Note sur l'action directe ou indirecte du rayonnement sur l'ADN

Les effets biologiques dus aux lésions qui ont lieu dans l'ADN sont la conséquence de dommages dits « directs » et « indirects » (Figure 10).

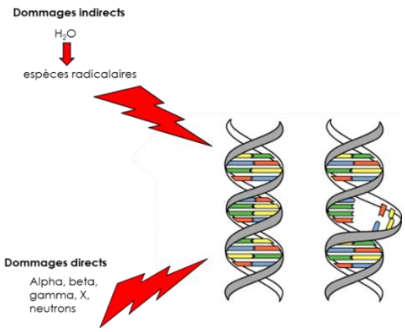


Figure 10 : Dommages directs et indirects sur une molécule d'ADN à la suite de l'interaction de rayonnement ionisant sur le corps humain[18]

[18] Brins ADN tirés de https://earthobservatory.nasa.gov/features/UVB

Dommages indirects - Les rayons X absorbés par les tissus vont interagir avec diverses molécules présentes dans le corps, dont les molécules d'eau, qui composent plus de 60% du corps humain. Ces interactions vont mener à la création d'espèces radicalaires instables et autres espèces nocives qui pourront, à leur tour, endommager l'ADN des cellules. La figure 11 montre des espèces formées par la radiolyse de l'eau.

Les dommages à l'ADN créés par ces espèces sont dits indirects, car ce ne sont pas les rayons X qui endommagent directement l'ADN, mais les espèces nocives produites.

$$H_2O \xrightarrow{\text{Rayons X}} OH\cdot \ldots H\cdot \ldots H_2 \ldots OH^- \ldots H^+ \ldots H_2O_2 \ldots \text{etc.}$$

Figure 11 : Exemples d'espèces formées à la suite de la radiolyse de l'eau

Dommages directs - Si les dommages font suite à l'action directe des rayons X (ou autres particules ionisantes) sur l'ADN des cellules biologiques, les dommages sont dits ''directs''.

3.4.1 Effets déterministes et stochastiques

Les effets biologiques suivant une exposition au rayonnement vont déprendre de plusieurs facteurs : exposition élevée ou faible, chronique ou aiguë, etc. Selon ces derniers, ces effets sont classés en 2 catégories : les effets déterministes et stochastiques.

3.4.1.1 Effets déterministes

Les effets déterministes sont des effets qui apparaissent rapidement, peu de temps après une exposition, par exemple après quelques heures ou quelques jours. Ces effets ont lieu à la suite d'une exposition aiguë à des doses élevées de rayonnement, qui entraine une grande perte de cellules dans les tissus. Ces effets seront observés, par exemple, à la suite d'un incident nucléaire ou d'un traitement médical d'importance.

Les effets déterministes apparaissent seulement à partir d'un certain seuil d'exposition. On dit qu'ils sont déterministes, car au-delà de ce seuil, nous savons avec certitude que l'effet sera observé. Par exemple, pour une dose reçue au corps entier, des effets cliniques observables apparaissent à partir d'environ 250 mSv (modifications dans la structure des cellules sanguines, nausées, etc.).

La gravité des effets augmente avec l'augmentation de la dose reçue. Pour une dose reçue au corps entier, des nausées peuvent apparaitre à partir de 250 mSv, et des vomissements seront observés entre 1000 et 2000 mSv, la diarrhée vers 3000 mSv, etc.

Pour les expositions liées aux appareils à rayons X, il est plus fréquent de voir des expositions sur des surfaces limitées, par exemple sur la peau ou aux mains. Selon la dose reçue, des érythèmes (rougeur de la peau), chute des poils, ulcères ou nécrose des tissus pourront être observés. Pour une exposition uniquement à la peau, le seuil d'apparition des effets est environ 1000 mSv.

3.4.1.2 Effets stochastiques

Contrairement aux effets déterministes, les effets stochastiques vont apparaitre de façon aléatoire. Ce sont des effets qui apparaissent généralement longtemps après une exposition à de faibles ou moyennes doses de rayonnements, à la suite d'une exposition chronique (échelonnée sur une longue durée). Ces effets résultent de l'altération génétique de cellules fonctionnelles qui, malgré les dommages reçus, ont continué de se reproduire.

Un exemple commun des effets stochastiques est l'apparition de tumeurs cancéreuses des années, voire des dizaines d'années, après une exposition chronique à de faibles ou à de moyennes quantités de rayonnement.

À ce jour, on considère qu'il n'y a pas de seuil minimal en dessous duquel les effets stochastiques ne peuvent pas apparaitre. Cela signifie que même les faibles doses augmentent le risque de développer un cancer. Il est toutefois observé que pour de très faibles doses, le risque est presque nul.

La probabilité d'observer ces effets augmente avec l'augmentation de la dose reçue.

3.5 ORGANES REPRODUCTEURS ET PERSONNES EN ÉTAT DE GROSSESSE

Les effets génétiques associés au rayonnement ionisant peuvent être la conséquence d'une exposition des personnes avant la fécondation, ce qui mène à des effets dits **héréditaires**, ou d'une exposition pendant l'état de grossesse, ce qui mène à des effets **somatiques** observés chez le fœtus.

3.5.1 Risques héréditaires

Les effets héréditaires (Figure 12) sont les effets associés à l'exposition des cellules reproductrices à de hauts niveaux de rayonnements ionisants avant la fécondation. Ces effets peuvent être observés chez les individus exposés, ainsi que chez les individus des générations futures.

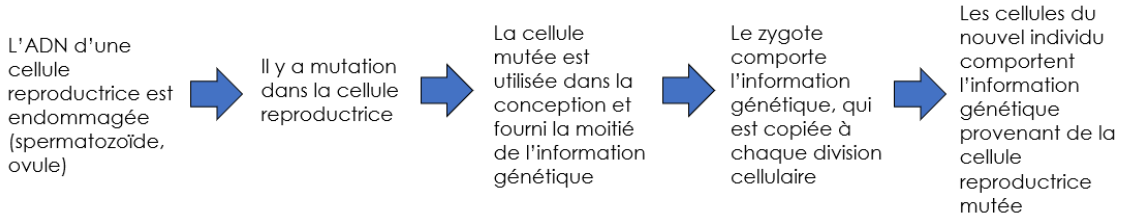


Figure 12: Risques héréditaires

3.5.2 Risques somatiques (embryons et fœtus)

Lorsque l'embryon ou le fœtus est exposé au rayonnement, des effets somatiques, c'est-à-dire ressentis par l'organisme qui est directement exposé, peuvent être observés.

Ces effets peuvent être de type :

- Déterministes, c'est-à-dire rapidement observables chez l'embryon ou le fœtus (ex. : retard de croissance ou malformation) et la sévérité des effets augmentent avec la dose reçue;
- Stochastiques, c'est-à-dire différés (ex. : effet développé plus tard chez l'enfant) et la probabilité d'observer les effets augmente avec la dose reçue.

3.5.3 Seuils de doses

Les effets liés à ces risques ne surviennent en principe qu'au-delà d'une certaine dose de rayonnement, soit des niveaux qui ne sont pas rencontrés à l'Université dans le cadre normal des opérations. Bien que certains effets pourraient théoriquement survenir à la suite d'une exposition à de faibles doses, le risque de les voir se produire est si faible qu'ils peuvent être considérés comme négligeables devant les autres risques auxquels les individus sont confrontés dans la vie quotidienne (ex. : accident de transport, exposition à des produits chimiques nocifs, etc.).

À titre d'exemple, les enfants qui ont été conçus après les attaques nucléaires d'Hiroshima et de Nagasaki par des parents qui ont été exposés à de hauts niveaux de radioactivité n'ont pas montré de taux de mutation plus élevés

que ceux observés chez les enfants non exposés[19]. Il est toutefois important de noter que le nombre d'enfants suivis est trop faible (30 000) pour représenter une conclusion statistiquement valide[20].

3.5.4 Dosimétrie pour les personnes en état de grossesse

À l'Université Laval, les personnes en état de grossesse qui portent un dosimètre dans le cadre de leurs fonctions peuvent communiquer avec le SRP afin qu'un dosimètre supplémentaire leur soit fourni.

Ce second dosimètre se porte sur l'abdomen et il est changé toutes les deux semaines (contrairement aux dosimètres torse, changés tous les trois mois). Voir la section 3.6 sur la dosimétrie.

3.6 DOSIMÉTRIE

À l'Université, des dosimètres sont utilisés dans certains cas afin de s'assurer qu'un individu qui travaille avec un appareil à rayons X n'atteigne pas les limites de dose présentées à la section 3.6.2. Les dosimètres permettent de déceler les défaillances dans la technique ou la procédure de travail et permettent d'y apporter des améliorations.

Les personnes de l'Université portent des **dosimètres individuels** (portés au torse ou aux mains) si les rayons X utilisés sont à faisceaux ouverts.

Si des dosimètres individuels ne sont pas nécessaires, dans certains cas des **dosimètres témoins** sont installés sur une surface dans l'environnement proche de l'appareil. Ces dosimètres sont utilisés pour les raisons suivantes :

- Comme mesure concrète d'application du principe ALARA, afin de détecter les situations qui provoqueraient des doses de rayonnement, même faibles, et de les corriger aussitôt;
- Comme institution d'enseignement, l'Université désire éduquer tout son personnel, incluant les étudiants de deuxième et de troisième cycle, au contrôle des doses de rayonnement pouvant être reçues.

Les dosimètres témoins ne sont pas utilisés pour les microscopes électroniques à balayage de faible ampérage (environ < 0,3 mA).

3.6.1 Dose mesurée sur un dosimètre

La responsable de la radioprotection communique avec toute personne dont l'exposition trimestrielle dépasse 0,15 mSv au corps, afin qu'un effort soit déployé pour trouver l'origine de cette dose et corriger la situation.

3.6.2 Limites de doses appliquées à l'Université

Le tableau 3 présente les limites de doses efficaces et équivalentes telles que définies par la réglementation provinciale dans le Règlement d'application de la Loi sur les laboratoires médicaux et sur la conservation des organes et des tissus (1981).

Le tableau 4 présente les limites de doses efficaces et équivalentes recommandées par Santé Canada dans les Codes de sécurité 30 et 32 (Radioprotection dans l'exercice de la dentisterie et Appareils d'analyse aux rayons X).

Les limites de doses dites équivalentes pour les mains, les pieds et la peau ont été choisies pour limiter les effets biologiques potentiels à court terme (effets déterministes – voir section 3.4.1.1) par exemple, l'érythème à la peau.

---

[19] Selon la CIPR 84, le risque induit par une dose fœtale inférieure à 100 mGy (c.-à-d. 100 mSv lorsque l'on considère les rayons X) ne justifie pas une interruption de grossesse. Pour des doses supérieures à 200 mGy, les dommages au fœtus peuvent être significatifs, leur nature et leur importance dépendant de la dose et du stade de la grossesse.
[20] https://fr.wikipedia.org/wiki/Bombardements_atomiques_d%27Hiroshima_et_de_Nagasaki

Les limites de doses dites efficaces sont pour l'exposition du corps entier. Elles ont été mises en place pour prévenir les effets biologiques à long terme (effets stochastiques - voir la section 3.4.1.2) par exemple, l'apparition de cancer.

À l'Université, les limites de dose qui s'appliquent en tout temps sont celles recommandées par Santé Canada pour les membres du public (tableau 4).

Tableau 3 : Limites de doses provinciales

Organes ou tissus	Travailleur sous radiation	Autres travailleurs, membres du public
Corps entier	50 mSv	5 mSv
Peau	300 mSv	30 mSv
Mains	750 mSv	75 mSv
Cristallin de l'œil	50 mSv	5 mSv

Tableau 4 : Recommandations de limites de doses fédérales (CS32 et CS30)

Organes ou tissus	Travailleur sous radiation	Autres travailleurs, membres du public, Université Laval
Corps entier	20 mSv	1 mSv
Peau	500 mSv	50 mSv
Mains*	500 mSv	---
Cristallin de l'œil	150 mSv	15 mSv

* non précisé pour les membres du public. Dans ce cas c'est la limite de dose à la peau qui est utilisée.

3.6.3 Types de dosimètres et port

Les dosimètres utilisés sont de type passif, c'est-à-dire qu'ils accumulent la dose reçue pendant une période donnée et une analyse doit ensuite être faite. Des dosimètres à luminescence stimulée optiquement (LSO) sont utilisés pour estimer la dose reçue à la peau et au corps entier (dosimètre torse), et des dosimètres thermoluminescents (DTL) en forme de bague sont utilisés pour la dose à la peau aux mains.

Le dosimètre torse LSO (Figure 13) se porte au niveau du torse, par exemple à la poche d'un sarrau. Il est à noter que si un tablier de plomb est porté, le dosimètre doit être porté **en dessous du tablier**.

Figure 13: Dosimètre à luminescence stimulée optiquement (LSO)[21].

Le dosimètre bague DTL (Figure 14) se porte sur un doigt de la main gauche pour les personnes droitières, ou sur les doigts de la main droite pour les personnes gauchères.

Figure 14: Dosimètres d'extrémité thermoluminescents (DTL)

Période de port - Les dosimètres sont échangés par le SRP aux périodes suivantes:

- Une fois tous les trois mois pour les dosimètres torses;
- Une fois par mois pour les dosimètres bagues;
- Une fois par deux semaines pour les dosimètres torses additionnels portés par les personnes en état de grossesse.

Leur analyse est effectuée par le service de dosimétrie de Santé Canada, qui conserve les données de dosimétrie dans le Registre national de dosimétrie.

3.6.4 Entreposage du dosimètre

Il est important de ranger les dosimètres à l'abri de toute source de rayonnement lorsqu'ils ne sont pas utilisés, ce qui inclut l'exposition directe aux rayons du soleil.

3.6.5 Dépassement des limites de dose

En cas de dépassement des limites de doses, la responsable de la radioprotection :

1. Informe immédiatement la personne ayant reçu une surexposition et exige l'arrêt de tout travail susceptible de faire augmenter la dose.
2. Met en place les mesures pour limiter ou mettre fin à l'exposition.
3. Procède à une enquête interne afin d'établir les causes de la surexposition et prend les moyens nécessaires pour éviter que la situation se produise à nouveau.

[21] Services nationaux de dosimétrie : https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/dosimetrie/produits.html

3.7 RADIOPROTECTION

La radioprotection est l'ensemble des principes et des moyens à mettre en œuvre afin de protéger les personnes lors d'activités impliquant le rayonnement ionisant. Il n'existe pas de modèle de protection unique et comme on ignore s'il existe un seuil d'exposition sécuritaire, il faut s'adapter à chaque situation en visant à réduire l'exposition au niveau le plus bas possible.

Il existe trois éléments de radioprotection qui permettent de réduire les risques d'exposition des utilisateurs aux rayons X et de maintenir au minimum les doses reçues, soit la durée, la distance et le blindage.

3.7.1 La durée

Le fait de diminuer la durée d'exposition entraîne directement une diminution de la dose de rayonnement reçue, car cette dernière dépend du débit de dose mesuré autour de la source et de la durée du temps d'exposition :

$$\text{Dose} = \text{débit de dose (Sv/h)} \times \text{durée (h)}$$

Les utilisateurs peuvent diminuer la dose en planifiant le travail à effectuer, de façon à minimiser le temps passé dans le champ de rayonnement de la source.

3.7.2 La distance

L'intensité des rayons X diminue en fonction du carré de la distance selon l'équation suivante:

$$I_A \times (D_A)^2 = I_B \times (D_B)^2$$

où :

I = intensité

D = distance

Ainsi, l'intensité mesurée à 50 cm d'une source sera 100 fois moins importante que l'intensité mesurée à 5 cm de la source (Figure 15).

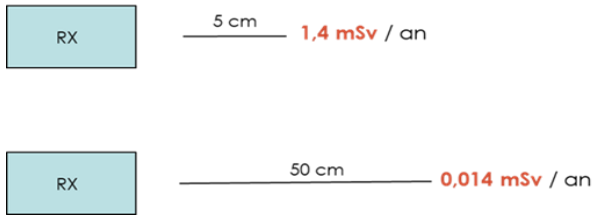


Figure 15: Diminution de l'intensité en fonction du carré de la distance.

Il est donc important de maintenir des distances avec les sources de rayonnement lorsque cela est possible.

3.7.3 Le blindage

Lorsque la diminution du temps d'exposition et une augmentation de la distance ne suffisent pas à diminuer l'exposition, il faut mettre en place un ou plusieurs écrans protecteurs entre la source et les utilisateurs.

Le blindage permettra de diminuer l'intensité des rayons X[22]. La diminution de l'intensité dépend du type de matériau de blindage utilisé et de son épaisseur, selon l'équation exponentielle suivante (Figure 16)[23] :

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

où :

I = intensité du faisceau à la sortie du blindage

I_0 = Intensité initiale du faisceau

μ = Coefficient d'atténuation linéaire en cm^{-1}

x = Épaisseur du blindage

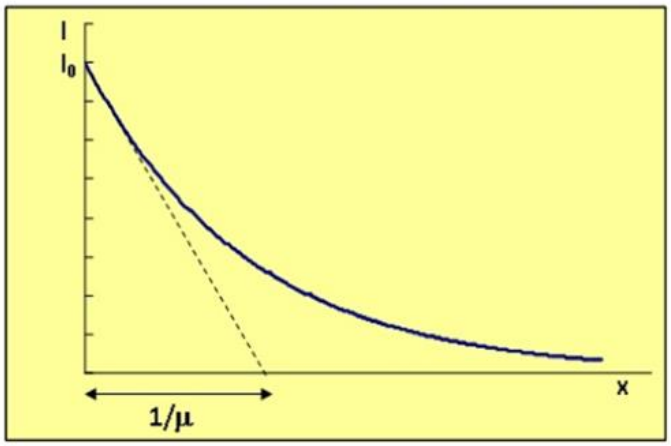


Figure 16 : Atténuation d'un faisceau de rayons X dans la matière[24]

3.7.3.1 Couche de demi-atténuation ou *Half Value Layer* (HVL)

Un facteur utilisé en radioprotection est la couche de demi-atténuation, HVL (pour Half Value Layer), soit l'épaisseur de blindage nécessaire à l'atténuation de 50% du faisceau initial.

La couche de demi-atténuation est reliée au coefficient d'atténuation linéaire (μ) selon la relation suivante:

$$HVL\ (cm) = \ln 2 / \mu$$

Si une épaisseur de blindage permet une atténuation de 50%, l'ajout d'une seconde épaisseur de blindage identique sur le faisceau sortant permettra une atténuation additionnelle de 50%, de sorte que le second faisceau résultant comportera 25% de l'intensité initiale (Figure 17).

[22] L'atténuation peut toutefois être suffisamment élevée pour que des détecteurs ne mesurent plus le rayonnement résiduel.
[23] Cette équation ne tient pas compte du facteur d'accumulation B ("buildup") dû aux photons diffusés à l'intérieur du blindage. Pour tenir compte de ce facteur dans le calcul de la diminution exponentielle de l'intensité: $I = I_o Be^{(-\mu x)}$
[24] http://www.phys4med.be/generalites-sur-les-rayons-x/absorption

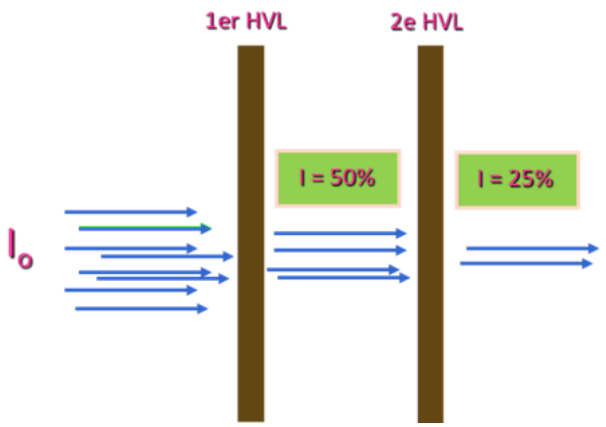


Figure 17: Diminution de l'intensité avec les épaisseurs de demi-atténuation

Il est pratique de savoir qu'après 10 épaisseurs de blindage, le faisceau sortant comportera environ 0,1% de l'intensité initiale.

Afin d'établir une protection adéquate, des calculs d'épaisseur de blindage effectués par des firmes expertes sont parfois nécessaires.

Attention! Des mesures directes avec des détecteurs, qui vont confirmer l'efficacité de la protection, doivent toujours être effectuées après la mise en place d'un blindage.

4. PRODUCTION ET INTERACTIONS

Cette section présente les mécanismes d'émission de rayons X et leur interaction avec la matière.

4.1 ÉMISSIONS DE RAYONS X

Des rayons X sont émis lors de certaines transitions électroniques quantifiées (i.e. lorsque des électrons changent de positions orbitalaires dans les atomes), ou lorsque la vitesse d'électrons de haute énergie en déplacement est modifiée à l'approche du champ d'un noyau. Ces types d'émission mènent respectivement à la production de rayons X dits « caractéristiques » et « de freinage ».

4.1.1 Rayons X caractéristiques

Ces rayons X sont produits lorsque certaines transitions électroniques ont lieu au sein de l'atome.

Lors des processus d'excitation et d'ionisation d'un atome, une quantité d'énergie est transmise aux électrons, les poussant à quitter les orbitales qu'ils occupent. Lors du processus d'excitation, l'électron quitte son orbitale pour aller occuper une orbitale plus haute en énergie. Lors du processus d'ionisation, l'électron est éjecté de l'atome (Figure 18, étape 1), qui se retrouve ainsi ionisé.

Si l'électron excité ou ionisé est un électron qui était initialement situé sur une des orbitales les plus rapprochées du noyau, son départ rend l'atome très instable. Par conséquent, cette position vide sera rapidement comblée par un électron présent sur une des orbitales supérieures de l'atome, c'est-à-dire plus éloignées du noyau (Figure 19, étape 2).

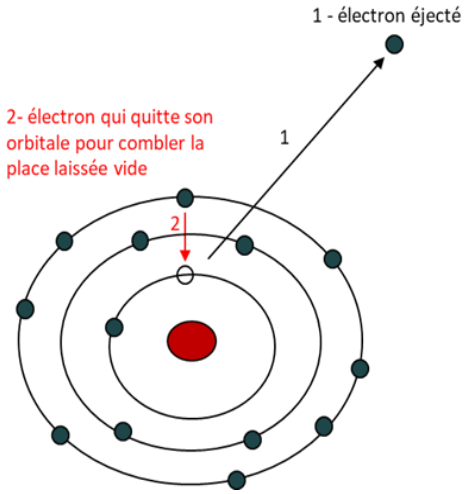


Figure 18 : Atome ionisé

Après un processus d'excitation ou d'ionisation, un électron quitte donc un état d'énergie supérieur, pour combler une place laissée vide sur une orbitale d'énergie inférieure.

Lorsque l'électron quitte une orbitale plus élevée en énergie pour rejoindre une orbitale plus stable située très près du noyau, **il se départit de son excès d'énergie en émettant des rayons X**.

La physique quantique nous indique que les orbitales des atomes possèdent des énergies définies et quantifiées: ainsi, l'énergie d'un rayon X émis sera précisément égale à la différence d'énergie entre les deux orbitales concernées (Figure 19).

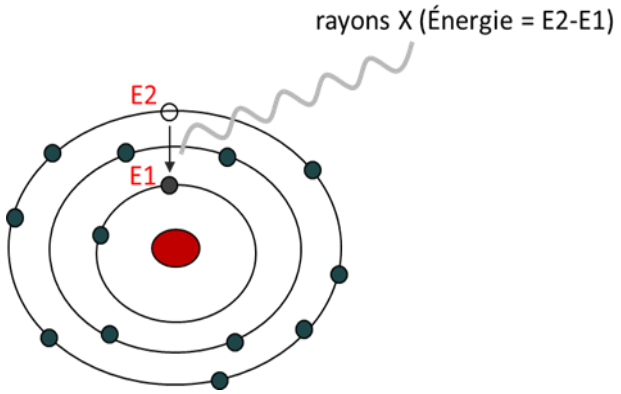


Figure 19 : Émission d'un rayon X caractéristique

De plus, comme les énergies des orbitales sont uniques à chaque atome (par exemple, les énergies des orbitales de plus basses énergies de deux éléments différents seront différentes), les énergies des rayons X émis seront également uniques à l'atome.

Sur un spectre montrant l'énergie des rayons X produits dans un tube à rayons X, les raies observées (pics) correspondent aux rayons X produits lors de ces transitions électroniques. Un peu comme une empreinte digitale, ces raies sont uniques à l'atome émetteur et c'est pour cela que nous désignons ces rayons X comme étant des rayons X caractéristiques (Figure 20).

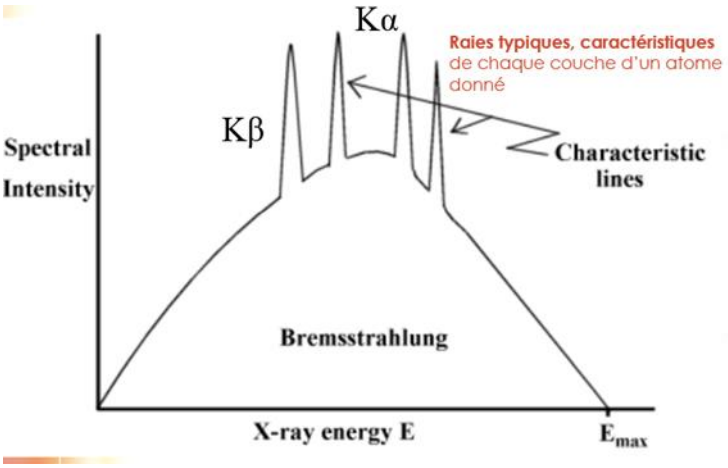


Figure 20 : Raies caractéristiques spectrales[25]

4.1.2 Rayonnement de freinage

Toute particule chargée accélérée émet des ondes électromagnétiques. Par accélération, on entend une modification de la vitesse, ce qui inclut un ralentissement.

Ainsi, des électrons qui voyagent à haute vitesse (par exemple dans un tube à rayons X sous haute tension) vont, lorsqu'ils seront ralentis par la présence d'un champ électrique comme celui du noyau d'un atome, convertir une

[25] https://crn2.3it.usherbrooke.ca/guide_sb/LCSM/SIMDUT_LASER_X-ray/Formation_rayonsX_3IT.pdf

partie de leur énergie cinétique en rayonnement électromagnétique sous la forme de rayons X (Figure 21). C'est le rayonnement que l'on nomme « rayonnement continu de freinage », ou Bremsstrahlung[26].

L'énergie des rayons X produits est variable et dépend de divers facteurs : l'énergie cinétique des électrons, leur niveau de décélération et de déviation (faible ou abrupte), l'intensité du champ du noyau, etc. Cette énergie sera comprise entre 0 (aucune déviation ou décélération) et l'énergie cinétique maximale que possède l'électron (grand transfert d'énergie). L'énergie moyenne se situe entre 1/3 et 2/3 de l'énergie maximale.

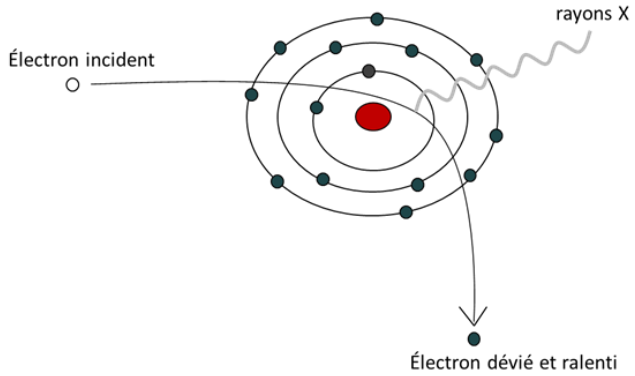


Figure 21 : Électrons déviés et ralentis à l'approche du noyau d'un atome - rayonnement de freinage.

Les énergies des rayons X de freinage ont des valeurs très rapprochées : ainsi, un graphe sur lequel on présente la quantité de rayons X de freinage produits en fonction de leur énergie va montrer un spectre continu, et non des raies fines comme celles qui correspondent aux rayons X caractéristiques (portion hachurée de la figure 22).

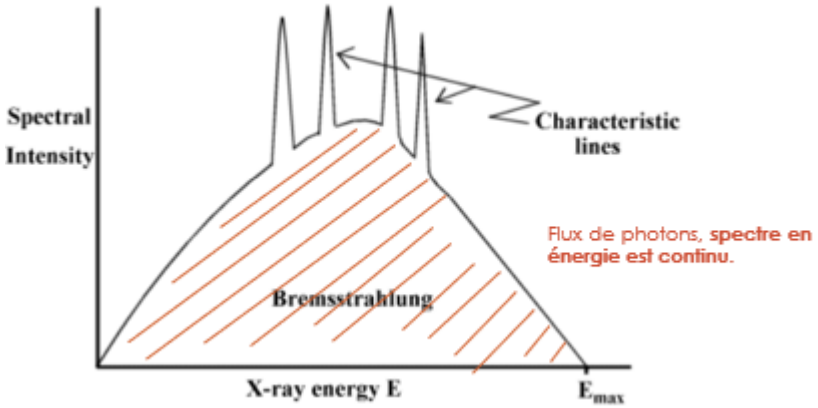


Figure 22 : Spectre continu du rayonnement de freinage[27]

Dans un tube à rayons X (voir le fonctionnement à la section 4.2), une partie des électrons émis par la cathode vont ioniser les atomes de l'anode, produisant des rayons X caractéristiques, et une partie des électrons vont perdre leur énergie par décélération et déviation une fois arrivés dans l'environnement de l'anode, créant ainsi du rayonnement de freinage. Notons que le rayonnement de freinage est la **méthode principale** de formation des rayons X en radiologie.

[26] En cristallographie, on la nomme parfois ''radiation blanche''.
[27] Adaptée de : https://crn2.3it.usherbrooke.ca/guide_sb/LCSM/SIMDUT_LASER_X-ray/Formation_rayonsX_3IT.pdf

4.2 INTERACTION AVEC LA MATIÈRE

Les rayons X sont des photons et ils interagissent avec la matière par collision avec les électrons présents sur les atomes, principalement selon l'effet photoélectrique et la diffusion de Compton[28].

4.2.1 Effet photoélectrique

Lors d'une interaction par effet photoélectrique, le rayon X transfère l'intégralité de son énergie à l'électron avec lequel il entre en collision (Figure 23). Ainsi, le rayon X disparait, et l'électron éjecté possède presque toute l'énergie du rayon X qui l'a frappé (une petite partie de l'énergie est utilisée dans le processus d'ionisation). Cet électron éjecté est devenu très énergétique et pourra, à son tour, ioniser des atomes présents sur son chemin.

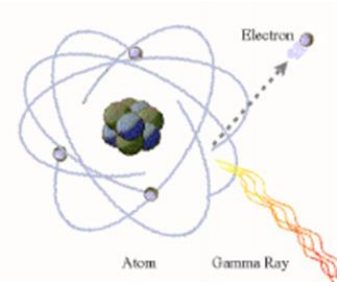


Figure 23 : Effet photoélectrique[29]

4.2.2 Diffusion de Compton

Lors d'une interaction par diffusion de Compton, le rayon X transfère seulement une partie de son énergie à l'électron avec lequel il entre en collision. Le rayon X résultant possède moins d'énergie et il est diffusé, c'est-à-dire dirigé dans une autre direction (un peu comme une boule de billard qui change de direction à la suite d'une collision) (Figure 24).

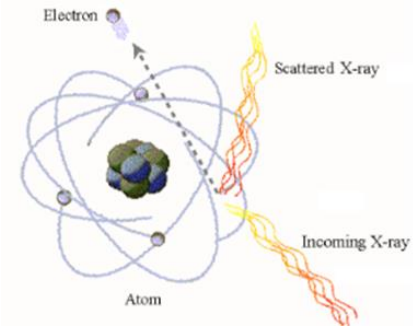


Figure 24 : Diffusion de Compton[30]

Le rayon X diffusé pourra par la suite transférer son énergie à un autre électron, par effet photoélectrique ou par diffusion de Compton (Figure 24).

[28] Les photons de hautes énergies peuvent également interagir par le mécanisme de ''création de paires'', mais ce mécanisme ne s'observe qu'au-dessus d'une énergie seuil de 1,02 MeV, qui est rarement observée chez les rayons X.
[29] Source: https://radiationsafety.ca/events/x-ray-safety-officer-course/
[30] Source: https://radiationsafety.ca/events/x-ray-safety-officer-course/

5. SYSTÈMES À RAYONS X ET RISQUES ASSOCIÉS

Cette section décrit les composantes principales d'un système à rayons X et les risques associés à ces appareils.

5.1 COMPOSANTES D'UN TUBE À RAYONS

Un système à rayons X comporte un tube à rayons X, un système d'alimentation de haute tension et un système d'évacuation de la chaleur (Figure 25).

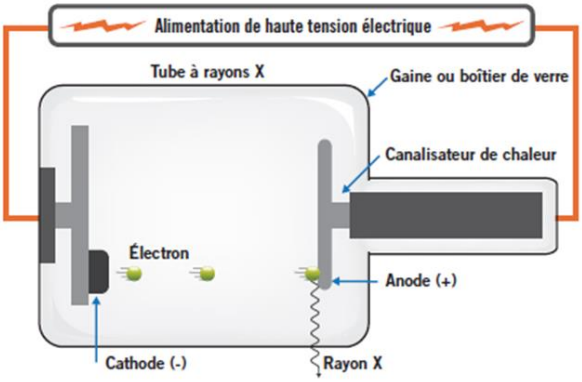


Figure 25 : Système de production des rayons X[31]

Le tube à rayons X comporte deux électrodes, une cathode et une anode, installées dans une enceinte de verre qui est sous vide. La cathode est chauffée à haute température afin de produire des électrons et une différence de potentiel est appliquée entre la cathode et l'anode, afin que les électrons produits à la cathode soient dirigés et accélérés vers l'anode. L'enceinte est sous vide pour permettre aux électrons de conserver leur énergie jusqu'à l'anode (des molécules d'air absorberaient une partie de l'énergie cinétique des électrons en cours de route).

Rendus à l'anode, qui est composée d'éléments possédant des numéros atomiques élevés (comme le tungstène et molybdène), ces électrons de haute énergie entrent en interaction avec les atomes de l'élément en question et selon les mécanismes décrits à la section 4.1, des rayons X sont émis.

Notons que les tubes à rayons X possèdent un faible rendement de production, car encore aujourd'hui, plus de 95% de l'énergie libérée par les électrons émis à la cathode l'est sous la forme de chaleur (moins de 5% de l'énergie est convertie en rayons X). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les tubes à rayons X nécessitent un système de refroidissement. Divers systèmes de refroidissement à l'eau, à l'huile ou à l'air ou à anodes liquides sont utilisés.

5.1.1 Tension électrique

La tension électrique (le voltage) représente l'énergie qui est appliquée sur un système afin de faire circuler des électrons de la cathode vers l'anode. Elle est donnée en volt (V).

Un volt équivaut à un joule d'énergie (J) par coulomb de charge (C)

$$V = J/C$$

[31] Figure tirée du Guide sur les rayons X et la radioprotection de l'Institut de radioprotection du Canada.

Plus la tension appliquée est élevée, plus les électrons qui quittent la cathode possèdent une énergie (une vitesse) élevée. Et plus ces électrons sont énergétiques, plus l'énergie des rayons X produits à l'anode est élevée.

Ainsi, l'énergie des rayons X produits dans un tube est directement proportionnelle à la différence de potentiel, c'est-à-dire au voltage, appliquée entre les électrodes.

L'unité utilisée pour décrire l'énergie des électrons produits à la cathode et celle des rayons X est l'électronvolt (eV)[32] , dont la grandeur correspond à la tension appliquée en volt: une tension de 1 kilovolt (1 kV) donne des électrons d'énergies maximales de 1 kiloélectronvolt (1 keV) et des rayons X d'énergies maximales de 1 keV.

Par exemple, si le voltage appliqué dans un système à rayons X est de 70 kV, les électrons accélérés posséderont une énergie (maximale) de 70 keV, et les rayons X produits à l'anode posséderont une énergie (maximale) de 70 keV.

Notons que certains appareils (ex. accélérateurs linéaires) peuvent produire des rayons X d'énergies beaucoup plus élevées, pouvant aller jusqu'à 25 000 keV (25 MeV).

À retenir - La tension électrique appliquée détermine l'énergie des rayons X qui seront produits.

5.1.2 Intensité du courant

Le courant (I) présent dans un système correspond à la quantité de charges qui passe dans le circuit, par période de temps. Il est donné en ampère (A).

Un ampère équivaut à un coulomb de charge (C) par unité de temps (sec)

A = C/sec

Un système de voltage alternatif est appliqué à la cathode afin de permettre la production d'électrons. Plus ce voltage est élevé, plus la cathode est chauffée, et plus **la quantité** d'électrons produits est élevée. Et par conséquent, plus l'intensité du courant est importante.

La quantité de rayons X produits dans le tube est ainsi directement reliée à la production d'électrons à la cathode:

- Voltage élevé à la cathode = température élevée à la cathode
- Température élevée à la cathode = production élevée d'électrons
- Production élevée d'électrons = courant élevé dans le tube = quantité élevée de rayons X

L'intensité du faisceau de rayons X est également reliée à la surface de la cathode, car une plus grande surface permet une plus grande production d'électrons.

L'intensité du courant dans les appareils à rayons X se situe généralement entre 5 et 15 mA pour les appareils dentaires et entre 30 et 1000 mA pour les appareils analytiques (sauf pour certains appareils, comme des microscopes à balayage électronique, dont les courants sont de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de µA).

À retenir - L'intensité de courant appliquée détermine la quantité de rayons X qui seront produits.

[32] Un eV correspond à l'énergie acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt.

5.1.3 Puissance

La puissance (P) d'un système correspond à la quantité d'énergie transférée par période, et est donnée en watt (W).

La puissance (P) est le produit du voltage (V) appliqué et du courant (I) dans le circuit (P = VI) :

Un watt (W) équivaut à un joule d'énergie (J) par unité de temps (sec)

$$W = J/C \times C/sec = J/sec$$

La puissance est un indicateur du rendement du rayonnement produit ainsi que de la quantité de chaleur déposée à l'anode. La puissance d'un tube est ainsi limitée par la capacité du système à dissiper la chaleur à l'anode.

5.2 RISQUES ASSOCIÉS AUX APPAREILS

Les risques que posent les appareils à rayons X sont liés au faisceau principal (faisceau primaire), ainsi qu'au rayonnement secondaire (fuites et rayonnement parasite) qui peut sortir de l'enceinte de l'appareil, même lorsque l'appareil est dans un bon état de fonctionnement.

Il est important de noter ici que la fiabilité des appareils diminue avec l'âge et avec l'usage : une vérification périodique des appareils est nécessaire (section 7.2).

5.2.1 Faisceau primaire

Le **faisceau primaire** est le rayonnement principal, intense, émis par le tube à rayons X (Figure 26). Ce faisceau est produit en continu chez les appareils analytiques, et par impulsion chez les appareils utilisés en radiographie.

L'exposition au faisceau primaire représente de loin le risque aux conséquences les plus importantes. Chez les appareils analytiques dont le faisceau est en continu et dont les intensités sont élevées, une exposition de quelques secondes peut causer des brûlures à la peau ou aux yeux. C'est la raison pour laquelle le faisceau primaire de ces appareils est généralement bloqué par des systèmes d'autoblindage. Certains fonctionnent toutefois à faisceau ouvert, par exemple les appareils à fluorescence X portatifs (section 6.1).

Pour les appareils à faisceaux ouverts utilisés en radiologie, l'exposition au faisceau primaire est atténuée par la distance entre la source de rayons X et l'utilisateur. En ce qui concerne l'exposition des patients, l'exposition est contrôlée par la durée des impulsions, qui sont très courtes, de l'ordre de quelques µsec.

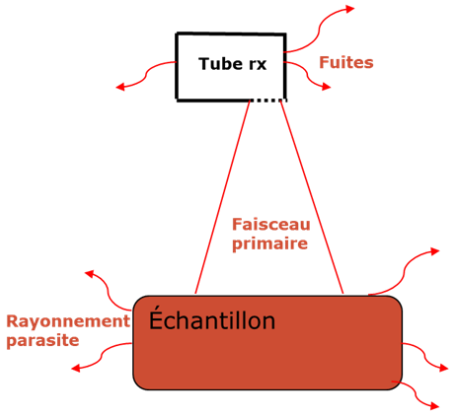


Figure 26 : Types de rayonnements mesurés autour d'un système à rayons X

5.2.2 Fuites

Des **fuites** peuvent être détectées autour du tube à rayons X. Il s'agit de rayons X détectés en dehors de la trajectoire du faisceau primaire, et qui résultent de la présence de petites fentes/crevasses dans l'équipement, de fixations desserrées ou d'ouvertures quelconques, au niveau du tube ou dans le blindage en place.

L'exposition aux fuites est faible quand le matériel est intact et bien entretenu.

5.2.3 Rayonnement parasite

Le **rayonnement parasite** est constitué des rayons X qui ont été diffusés par le matériel soumis au faisceau primaire. L'échantillon et les parties internes de l'appareil (pour les appareils analytiques), les êtres vivants et les objets présents dans une salle de radiographie (pour les appareils radiologiques) sont des sources de diffusion des rayons X (Figure 27).

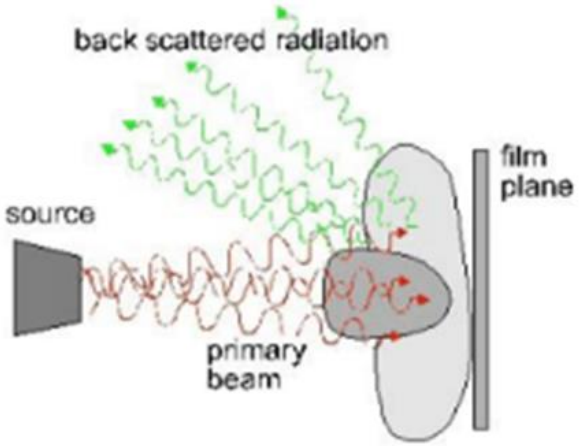


Figure 27 : Rayonnement parasite[33]

L'exposition au rayonnement parasite est très faible dans le cas des appareils analytiques autoblindés. Des rayons X peuvent être détectés à l'extérieur de l'appareil, mais la dose associée est généralement très faible et bien en dessous des limites réglementaires permises.

Le rayonnement parasite peut en revanche mener à une exposition plus importante pour les appareils à faisceaux ouverts, par exemple les appareils radiologiques. C'est la raison pour laquelle les utilisateurs activent les appareils à rayons X à partir d'une seconde pièce, ou se protègent avec des équipements qui atténuent le rayonnement (tablier de plomb, cache-thyroïde, etc.).

[33] Source: Cours XSO de https://radiationsafety.ca/events/x-ray-safety-officer-course/

6. LES APPAREILS À RAYONS X À L'UNIVERSITÉ

Deux types d'appareils produisant des rayons X sont utilisés à l'Université, soit les appareils analytiques et les appareils utilisés en radiologie.

6.1 APPAREILS ANALYTIQUES

Les appareils analytiques sont utilisés en enseignement ou en recherche, et ne sont pas utilisés chez l'humain ou chez les animaux. Ils sont utilisés pour l'analyse de matériaux, de structures moléculaires, etc.

Les principaux appareils utilisés sont des diffractomètres, des spectromètres, des analyseurs à fluorescence X et des appareils en enceintes fermées comme des microscopes à balayage électronique. Des prototypes expérimentaux sont également construits par des chercheurs.

Exemple d'appareil : Les diffractomètres

Les diffractomètres (X-Ray Diffraction ou XRD) (Figure 28) sont utilisés pour caractériser des matériaux (par exemple, déterminer la composition de la peinture utilisée sur des pièces d'art) ou pour déterminer la structure cristalline de diverses molécules. En cristallographie, un étroit faisceau de rayons X est dirigé sur un échantillon présent sous sa forme cristalline, et c'est un patron de diffraction résultant qui est analysé.

Les diffractomètres à l'Université fonctionnent avec une tension et une intensité de l'ordre de dizaines de kV et mA. Ces appareils sont contenus dans une enceinte blindée et comportent plusieurs systèmes de sécurité qui empêchent les utilisateurs d'accéder au faisceau lorsque la tension est appliquée. Il faut toutefois vérifier régulièrement ces systèmes de sécurité (voir la section 6.1.1) qui ne sont pas exempts de défectuosités.

Il est important de noter que les débits de dose mesurés à 10 cm de la source du faisceau sont très élevés et peuvent être supérieurs à 50 Sv/ minute[34] pour ces appareils. Comme des brûlures et des nécroses à la peau apparaissent dès 5 à 10 Sv, une exposition à ces niveaux de rayonnement peut causer des dommages menant jusqu'à l'amputation des doigts. Il est important de ne jamais exposer une partie du corps au faisceau de ces appareils.

Figure 28 : Diffractomètre de Malvern Panalytical[35]

[34] Pour des paramètres de 30 kV et 20 mA.

[35] https://www.labcompare.com/178-X-Ray-Diffractometer-XRD-Instruments/42677-X-Pert-3-MRD-Materials-Research-Diffraction-System/

Exemple d'appareil : Les spectromètres à fluorescence X

La spectroscopie de rayons X comporte diverses techniques de caractérisation parmi lesquelles on retrouve la spectroscopie par fluorescence X (XRF).

Les appareils XRF vont, par exemple, déterminer la composition élémentaire d'un matériau par l'analyse de rayons X caractéristiques produits (voir section 4.1.1).

Les XRF fonctionnent avec une tension d'environ 50 kV, et une intensité d'environ 0,01 mA, soit une intensité beaucoup plus faible que celle des diffractomètres. Ils comportent des capteurs de proximité et des détecteurs de rétrodiffusion, qui sont des systèmes de sécurité qui empêchent les utilisateurs de diriger le faisceau dans le vide (par exemple, vers une personne) lorsque la tension est appliquée. L'appareil doit ainsi être en contact avec un échantillon lors de la mesure afin que la production de rayons X soit possible (Figure 29).

Ce système de sécurité peut toutefois être désactivé : il faut donc rester vigilant afin de ne pas s'exposer accidentellement pendant l'utilisation de ce type d'appareil.

Prendre note que le Code de sécurité 32 de Santé Canada indique que la puissance nominale maximale des XRF portatifs manuels vendus au Canada ne doit pas dépasser 50 W.

Figure 29 : Spectromètre à fluorescence X portatif de Bruker[36]

Seules les personnes ayant reçu une certification de Ressources naturelles Canada (RNCan) peuvent utiliser un XRF portatif.

6.1.1 Vérification de la sécurité sur les appareils analytiques

Des contrôles de sécurité sont effectués périodiquement afin de rendre sécuritaire l'utilisation des appareils à rayons X à l'Université (voir les procédures de vérification aux annexes 1 et 2). Ces contrôles permettent de vérifier les barrières physiques en place, destinées à limiter les risques pour l'utilisateur.

[36] https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/handheld-xrf/gold-processing.html

À titre d'exemples, les pièces et les mécanismes suivants font partie des barrières physiques qui font l'objet de vérifications:

Obturateur

En s'ouvrant, l'obturateur permet au faisceau principal de passer. Lorsque l'obturateur est fermé, le faisceau est bloqué.

Entrebarrages (interverrouillage)

Les entrebarrages sont des caractéristiques de sécurité intégrées au système. Ils activent les obturateurs ou arrêtent la production de rayons X lorsqu'une défaillance est détectée par le système (par exemple, une défaillance détectée dans un des voyants lumineux du système).

Les entrebarrages peuvent être en série, ou redondants :

- En série : des interrupteurs et des circuits interconnectés en série doivent tous être fonctionnels pour que le faisceau primaire puisse fonctionner. Le système arrête si une des composantes ne fonctionne plus (une lumière, un panneau, etc.).

- Redondants : le système fonctionne en utilisant deux ou plusieurs alimentations physiques, qui se remplacent en cas de dysfonctionnement. Par exemple, pour un système qui doit fonctionner à 3 lumières, le système en comportera 4, de sorte que lors de la défaillance d'une des lumières, trois fonctionneront et un délai pour réparation sera activé.

Blindages, collimateurs

Ce sont des matériaux composés d'atomes possédant un numéro atomique (Z) élevé (ex. plomb) pour l'absorption du rayonnement. Ils diminuent l'exposition dans les zones indésirables et réduisent le rayonnement diffusé.

6.2 APPAREILS DE RADIOGRAPHIE

À l'Université, les appareils à rayons X utilisés en radiologie sont utilisés en médecine, en médecine dentaire et en médecine vétérinaire.

Contrairement à la grande majorité des appareils analytique, ces appareils fonctionnent à faisceaux ouverts. Les utilisateurs doivent donc se protéger du rayonnement en portant le MPI (matériel de protection individuelle) plombé, en assurant une distance physique

avec le faisceau lors de son activation ou en activant l'appareil en étant positionné derrière une enceinte blindée.

Les principaux appareils utilisés à l'Université sont des appareils à radiographie standards, des densitomètres et des fluoroscopes. La radiographie est une technique de production d'images et différents types d'images peuvent être produites. Par exemple, les appareils à radiographie standards vont produire des images radiographiques statiques, telle une photographie, les appareils à radioscopie vont produire des images fluoroscopiques animées, tel un vidéo, d'autres appareils vont produire des images tomographiques (des images en coupe), etc.

La figure 30 montre un ostéodensitomètre, utilisé pour des mesures de densité minérale osseuse. Cette technique est utilisée dans le diagnostic, le traitement et la surveillance de l'ostéoporose.

Figure 30 : Ostéodensitomètre de Hologic[37]

[37] http://www.hologic.ca/products/imaging/skeletal-health/discovery-dxa-system

7. INSTRUMENTS DE DÉTECTION ET DE MESURE

Plusieurs types de détecteurs portatifs sont utilisés à l'Université. Ils sont présents sous forme de sondes connectées à un débitmètre (Figure 31), qui est le dispositif qui traduit les détections en signal électrique. Certaines sondes peuvent être intégrées à l'intérieur de l'enceinte comportant le débitmètre, pour donner de petits appareils de poche facilement transportables (Figure 32).

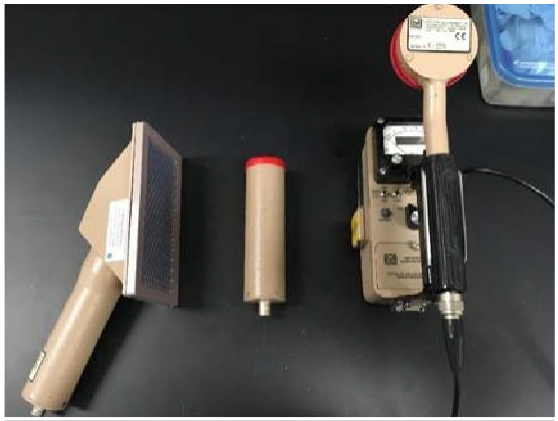


Figure 31 : Débitmètre (Ludlum 3), et trois sondes. De gauche à droite : contaminamètre à scintillateur plastique (44-116); contaminamètre à l'iodure de sodium (44-21); contaminamètre de type pancake (44-9).

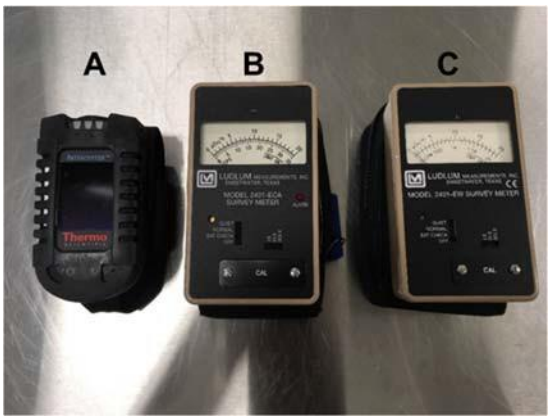


Figure 32 : Détecteurs portatifs avec sondes intégrées. Spectromètre gamma (Thermoscientific) (A), radiamètre Geiger Müller à énergie compensée pour le débit de dose gamma en µSv/h (Ludlum 2401-ECA) (B), contaminamètre Geiger Müller alpha, bêta et gamma en CPM (Ludlum 2401-EW) (C).

Les détecteurs les plus couramment utilisés pour les contrôles des rayons X sont des détecteurs à gaz, qui mesurent le nombre de ''coups'', c'est-à-dire le nombre d'ionisations produites par l'interaction entre les rayons X et les électrons des atomes de gaz.

7.1 DÉTECTEURS À GAZ

Les détecteurs à gaz sont constitués d'un tube cylindrique comportant deux électrodes coaxiales et une atmosphère de gaz (air déshydraté, N_2, Ar, CO_2, etc.) (Figure 33).

Le rayon X qui pénètre dans le tube transmet son énergie aux électrons des molécules de gaz et produit ainsi des ions et des électrons libres. Lorsqu'une tension est appliquée entre les électrodes, les électrons produits sont attirés vers l'anode, à une vitesse qui dépend du voltage appliqué. Ces déplacements d'électrons génèrent une pulsion électrique, traduite en indication visuelle ou sonore au détecteur. Chaque pulsion correspond à l'interaction d'un rayon X avec le gaz compris dans le tube.

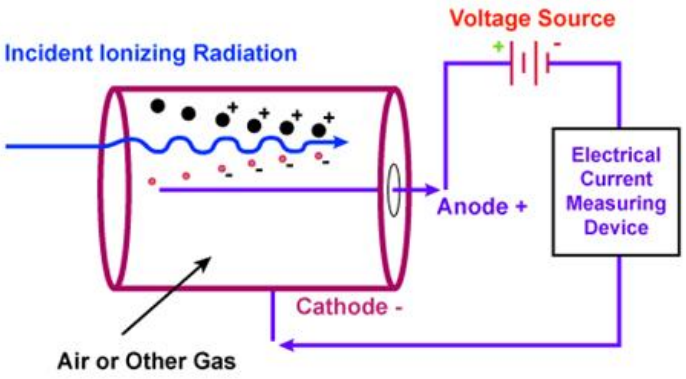
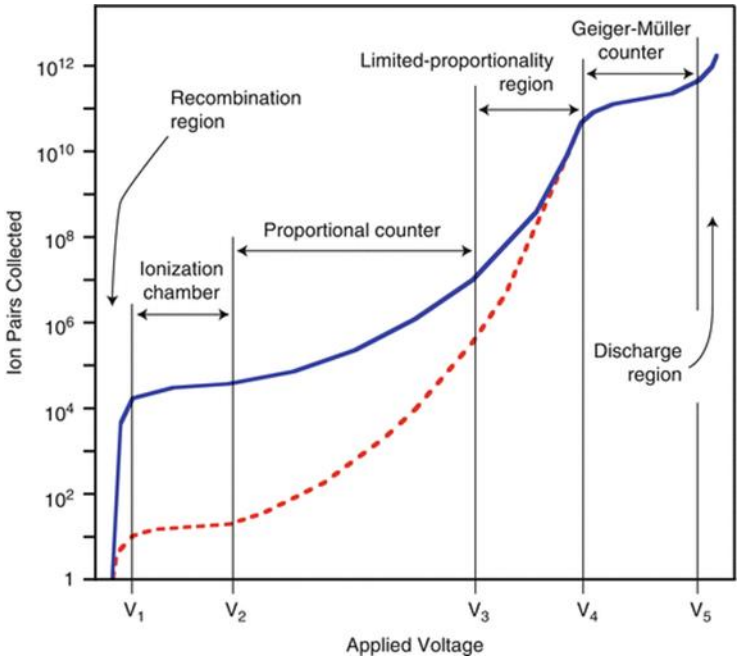


Figure 33 : Tube de détecteurs à gaz[38]

Le détecteur à gaz compte ainsi la quantité de rayons X qui pénètrent dans le tube : chaque interaction donne un coup, et selon le type d'appareil, la réponse est donnée en coups par unité de temps (CPM, CPS), en débit de dose (µSv/h) ou en taux d'exposition (mR/h).

Selon la tension en volt qui est appliquée entre l'anode et la cathode, les détecteurs à gaz vont être utilisés dans un des trois régimes présentés à la figure 34, soit le régime à ionisation (chambres à ionisation), le régime proportionnel (compteur proportionnel) ou le régime Geiger-Müller.



[38] Source: EQUIPO rental https://www.equipcoservices.com/support/tutorials/introduction-to-radiation-monitors/

Figure 34 : Régimes de détecteurs à gaz[39]

7.1.1 Chambres à ionisation

Dans ce régime, la tension appliquée se situe environ entre 50 V et un maximum de 200-300 V (la tension maximale dépend de paramètres tels que le type de gaz présent).

Cette tension est assez élevée pour empêcher la recombinaison entre les ions et électrons produits à la suite de l'ionisation de molécules de gaz, mais pas suffisamment pour créer des ionisations secondaires : les électrons produits, accélérés vers l'anode, ne peuvent pas produire des ionisations supplémentaires en cours de route.

Ainsi, la hauteur du signal électrique est directement proportionnelle au nombre de molécules de gaz ionisées dans le détecteur. Nous savons que plus le rayon X incident aura une énergie élevée, plus il pourra ioniser de molécules, et plus le nombre d'électrons produits sera grand : la hauteur du signal électrique obtenu sera donc également proportionnelle à l'énergie du rayon X. Plus l'énergie du rayon X sera élevée, plus grand sera le signal obtenu.

Notons qu'à l'intérieur des limites de ce régime, la hauteur du signal ne dépend pas du voltage appliqué.

Les chambres à ionisation sont intéressantes pour la mesure de rayonnements d'énergies élevées, qui vont mener à suffisamment d'ionisations primaires pour donner un bon signal. Elles sont utilisées pour mesurer quantitativement le taux d'exposition dans l'air (voir section 3.3.1).

Les chambres à ionisation possèdent toutefois le désavantage d'avoir une faible sensibilité de détection. C'est la raison pour laquelle les tubes sont plus volumineux et les pulsions électriques sont amplifiées.

7.1.2 Compteurs proportionnels

Dans ce régime, la tension appliquée est supérieure à 200 V (l'intervalle de tension dépend des paramètres présents, comme la composition des gaz). À ces tensions, les électrons produits par les ionisations primaires sont suffisamment accélérés pour être en mesure de créer des ionisations supplémentaires, dites secondaires. Ainsi, les signaux électriques obtenus dans ce régime sont plus importants que ceux obtenus dans le régime à ionisation.

Pour un voltage précis, la hauteur du signal est proportionnelle à l'énergie du rayonnement ionisant, comme c'est le cas pour la chambre à ionisation. Plus l'énergie du rayon X sera élevée, plus grand sera le signal obtenu.

Toutefois, le signal dépend également du voltage appliqué à l'intérieur des limites de ce régime: plus le voltage sera élevé, plus le nombre d'ionisations secondaires sera important, plus le signal sera important.

Les compteurs proportionnels sont très appréciés pour la mesure de rayonnements ionisants de plus faibles énergies qui ne mènent pas à suffisamment d'ionisations primaires pour donner un bon signal avec les chambres à ionisation.

Comme les compteurs proportionnels nécessitent une alimentation électrique très stable, il est plus difficile de les trouver sous la forme d'instruments portatifs.

7.1.3 Geiger-Müller (G-M)

Dans ce régime, la tension appliquée dépend des appareils (certaines tensions sont de 600 V, d'autres encore plus élevées). Dans les conditions G-M, les électrons produits par les ionisations primaires sont suffisamment énergisés pour créer des avalanches de Townsend. C'est-à-dire que non seulement des ionisations secondaires

[39] Source: Ionizing Radiation Detectors, David Kulp, **DOI:** https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_34

ont lieu, mais les électrons secondaires vont ioniser à leur tour d'autres atomes, et les ionisations vont se poursuivre jusqu'à ce que, à la suite d'une cascade d'ionisations, tous les atomes présents aient théoriquement été ionisés (Figure 35).

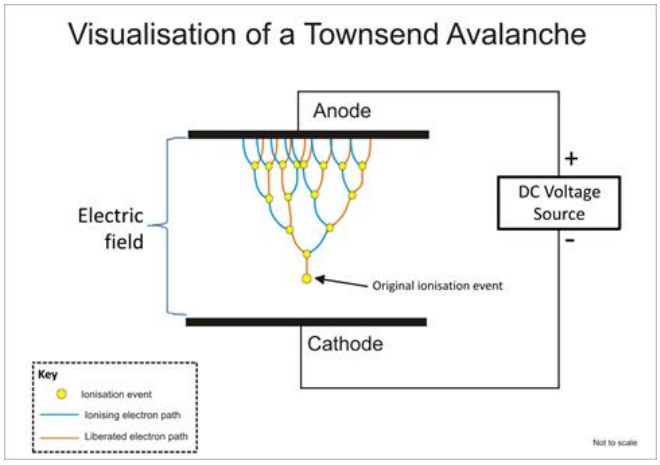


Figure 35 : Avalanche de Townsend[40]

Ces cascades font en sorte que le détecteur fonctionne toujours en saturation: chaque événement (chaque rayon X qui ionise des atomes de gaz) crée une avalanche d'électrons qui mène à la production d'un signal maximal. Peu importe l'énergie du rayon X incident, le signal sera toujours à son maximum.

Ainsi, contrairement aux autres régimes, la hauteur du signal n'est pas proportionnelle à l'énergie des rayons X incidents. En revanche, le détecteur est beaucoup plus sensible à la détection que les autres régimes, ce qui en fait un excellent appareil pour détecter des fuites ou des rayonnements de faibles énergies.

Les Geiger-Muller sont très populaires, car en plus d'être sensibles, ils sont robustes, simples à utiliser et peu coûteux.

Note importante sur les compteurs Geiger-Müller

Les compteurs Geiger-Müller peuvent indiquer la valeur ZÉRO dans des situations où le taux de comptage est très élevé: un débit trop élevé provoque la paralysie temporaire du détecteur[41], et donne ainsi la fausse indication que le débit de dose est nul. Par conséquent, il est impératif que ces compteurs soient mis en fonction **avant** leur introduction dans une zone à contrôler, au cas où le champ de rayonnement serait très intense.

7.2 ÉTALONNAGE ET VÉRIFICATION

Pour tous ses appareils de détection de rayonnement ionisant, le Comité de radioprotection respecte l'article 20 du Règlement sur les substances nucléaires et les appareils à rayonnement, qui précise qu'il est interdit d'utiliser,

[40] Source: https://en.wikipedia.org/wiki/Townsend_discharge

[41] Ce qui s'explique par la notion de temps morts des détecteurs, soit le temps après chaque événement pendant lequel le système n'est pas en mesure d'enregistrer un nouvel événement.

pour l'application de la réglementation, un radiamètre qui n'a pas été étalonné au cours des douze mois précédant son utilisation.

Ainsi, les sondes et radiamètres utilisés à l'Université dans un contexte réglementaire sont étalonnés annuellement par une firme externe qui effectue les opérations selon les attentes de la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN).

La date d'étalonnage/vérification est indiquée sur chaque instrument.

8. MESURES DE SÉCURITÉ

Cette section présente les mesures de sécurité qui doivent être observées en tout temps. Ces mesures permettent de diminuer les risques d'exposition en informant les personnes des risques encourus (mises en garde, formation pour les utilisateurs, etc.), en limitant les accès aux personnes autorisées, et en évaluant périodiquement la sécurité des appareils.

8.1 RÈGLES ET PROCÉDURES

Un cartable, pour lecture obligatoire, est présent près de chaque appareil à rayons X et comporte les documents suivants:

1- Règlements sur les dispositifs émettant des radiations de Santé Canada

2- Code de sécurité appliqué à l'appareil

- Code de sécurité 28 : Médecine vétérinaire
- Code de sécurité 32 : Appareils analytiques
- Code de sécurité 34 : Appareils industriels
- Code de sécurité 35 : Appareils à rayons X radiologiques

3- Procédure de vérification – appareils analytiques

Ce document décrit la procédure à suivre pour la vérification périodique des appareils analytiques par l'utilisateur principal ou par le responsable (Annexes 1 et 2).

4- Procédure d'entretien et désactivation des systèmes de sécurité – appareils analytiques

Ce document décrit la procédure à suivre lors de l'entretien des appareils analytiques et en cas de désactivation temporaire d'un système de sécurité par la personne responsable de l'appareil (Annexe 3).

5- Règles de sécurité

Ce document décrit les règles de sécurité générales à appliquer par tous les utilisateurs (Annexes 4 et 5).

6- Registre pour les dosimètres témoins

Ce registre est à remplir à chaque utilisation si un dosimètre témoin est présent. Ainsi si une dose est mesurée, le SRP pourra, grâce à ce registre, évaluer les doses individuelles reçues.

8.2 AFFICHAGE

L'utilisation des appareils à rayons X doit se faire uniquement dans les lieux désignés qui comportent des mises en garde. Ces dernières sont généralement produites et apposées par le SRP.

Notons que les mises en garde doivent :

- Être de deux couleurs contrastantes;
- Être bien visibles et reconnaissables à une distance d'un (1) mètre;
- Avoir des dimensions d'au moins deux centimètres;
- Porter les mentions « CAUTION X-RAYS » et « ATTENTION RAYONS X ».

8.2.1 Affichage sur les portes

Sur toutes les portes qui donnent accès au local désigné, la mise en garde durable et lisible suivante doit être affichée (Figure 36).

Figure 36 : Mises en garde aux points d'accès

8.2.2 Affichage sur les appareils

Les informations suivantes doivent être présentes et visibles sur l'appareil à rayons X (Figure 37).

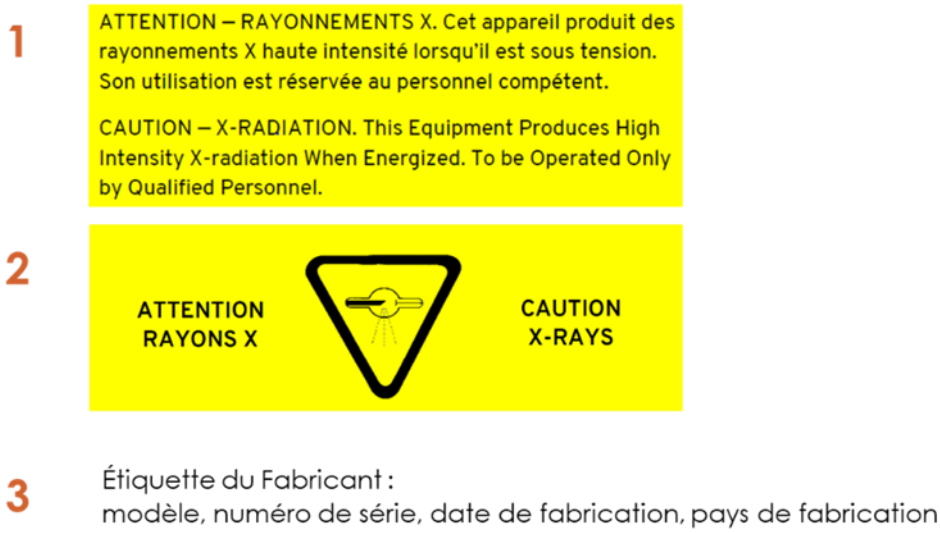


Figure 37 : Mises en garde sur les appareils

8.3 CONTRÔLE DES ACCÈS

Les locaux désignés doivent être en tout temps restreints aux personnes autorisées.

- Ils doivent être verrouillés lorsque les travailleurs autorisés sont absents;
- La mise en marche des appareils doit être possible seulement par les personnes autorisées. Un dispositif de barrage doit empêcher la mise en marche. Un mot de passe sur un poste de travail, connu seulement des utilisateurs, peut être accepté.

8.4 DOSIMÉTRIE

Les dosimètres distribués par le SRP doivent être portés si requis. Dans certains cas, un dosimètre témoin, présent 24 heures sur 24, est installé près des postes de travail et est accompagné d'un registre. Les utilisateurs doivent compléter le registre à chaque visite.

8.5 FORMATION DES UTILISATEURS

Toute personne qui utilise un appareil à rayons X doit avoir reçu la formation obligatoire en radioprotection, dispensée par le SRP chaque session (été, automne et hiver). La formation est d'une durée de 2 heures, avec une courte évaluation en fin de formation.

La formation doit être suivie tous les 3 ans. Elle comprend les éléments suivants :

- Rayonnement et radioprotection;
- Doses et effets biologiques;
- Risques liés aux appareils;
- Personnes en état de grossesse;
- Cadre réglementaire;
- Affichage – mises en garde;
- Contrôle de sécurité.

Procédure pour l'inscription

1. Lorsqu'une nouvelle date de formation est annoncée par courriel, les utilisateurs peuvent s'inscrire en remplissant le formulaire en ligne à l'adresse suivante : https://intranet.ssp.ulaval.ca/public/FormationsGRR.asp.

2. Choisir la formation intitulée « Radioprotection – Formation rayons X » avec la date prévue.

3. Cliquer sur l'icône en bas de la page (disquette).

Vous recevrez un courriel de confirmation, automatiquement généré. En cas de difficulté ou pour toute question, un courriel peut être envoyé à Radioprotection@ssp.ulaval.ca.

9. CONTRÔLE INTERNE ET INSPECTION

Des contrôles internes sont effectués par le SRP de façon périodique et des inspections sont réalisées par une firme externe tous les trois ans.

9.1 CONTRÔLES INTERNES DES APPAREILS ANALYTIQUES

Des contrôles périodiques sont effectués par le SRP dans les locaux où l'on utilise des appareils à rayons X. La fréquence des contrôles dépend du type d'utilisation, du type d'appareil, etc.

Des contrôles sont également faits lors d'une nouvelle acquisition, du déplacement d'un appareil ou à la suite d'une réparation ou d'une anomalie détectée.

Lors de ces contrôles, le SRP mesure les taux de comptage (CPM, CPS) autour de l'appareil en marche et vérifie que les points présentés à la section 8 sont respectés.

À la suite du contrôle, la responsable de la radioprotection transmet au responsable de l'appareil un rapport qui mentionne les points de non-conformité et les mesures correctives correspondantes, s'il y a lieu. Le responsable de l'appareil, ou la personne désignée par celui-ci, doit apporter les corrections demandées et en informer le secteur de la radioprotection dans les délais recommandés.

Le SRP vérifie le retour à la conformité et tient à jour un registre.

9.2 INSPECTION PAR UNE FIRME EXTERNE

Le SRP organise des inspections par une firme externe pour les appareils analytiques et radiologiques non utilisés chez les humains. Il organise également l'inspection du matériel de protection individuelle plombé porté par tous les utilisateurs à l'Université (tablier, cache-thyroïde, etc.).

9.2.1 Appareils analytiques et radiologiques non utilisés chez les humains

L'inspection a lieu tous les 3 ans pour tous les appareils analytiques et les appareils radiologiques non utilisés chez les humains. Ces inspections portent sur l'appareil, sur la structure de la salle et sur la qualité du blindage (s'il y a lieu), et elles assurent le respect des exigences de Santé Canada (section 1.2).

Les rapports d'inspection produits par les physiciens mandatés sont transmis au SRP.

9.2.2 Appareils radiologiques utilisés chez les humains

La gestion de la radioprotection, qui inclut l'inspection des appareils tous les 3 ans[42], est effectuée par la direction de la FMD.

[42] Article 149 du règlement. L'INSPQ recommande aussi l'application du Code de sécurité 30 de Santé Canada.

9.2.3 Contrôle du matériel de protection individuelle plombé

Afin d'assurer l'intégrité du matériel de protection individuelle (MPI) utilisé en radiologie, des inspections visuelles et tactiles, ainsi que des vérifications par radiographie/radioscopie, sont recommandées par Santé Canada.

Le MPI inclut :

- Tabliers plombés
- Cache-thyroïde de plomb (colliers thyroïdiens)
- Gants ou mitaines de protection
- Lunettes plombées

Les inspections visuelles et tactiles devraient être effectuées à l'interne au moins une fois par an, par les personnes responsables des appareils ou par des personnes désignées à l'interne, en appliquant la grille d'évaluation du SRP (voir encadré) ou une grille équivalente.

À partir de 2021, l'inspection par radiographie des MPI dont l'intégrité n'est pas assurée sera effectuée environ tous les 2 ans. Les inspections sont organisées par le SRP et seront effectuées sur le campus par un physicien certifié provenant d'une firme externe.

Les responsables d'appareils à rayons X radiologiques qui possèdent ce type d'équipement de protection peuvent s'informer auprès du SRP, via l'adresse courriel Radioprotection@ssp.ulaval.ca

La grille d'évaluation visuelle et tactile peut être téléchargée à partir du lien: https://www.ssp.ulaval.ca/matieres-dangereuses/secteur-des-matieres-dangereuses/

10. SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION

Le niveau de rayonnement autour des appareils à rayons X est vérifié par une firme externe et par le SRP afin d'assurer que l'exposition au rayonnement des personnes (utilisateurs et personnes occupant les locaux adjacents) ne dépasse pas les limites réglementaires.

10.1 VÉRIFICATION DES DÉBITS DE DOSES

Dans le respect du Code de sécurité 32 de Santé Canada, le titulaire de permis veille à ce que le niveau de rayonnement soit inférieur à la limite réglementaire de 0,5 mR/h (~ 5 µSv/h) à 5 cm de toutes les surfaces extérieures accessibles de l'appareil et lorsque celui-ci fonctionne à sa puissance maximale.

Le respect de cette limite est vérifié lors des inspections par une firme externe tous les 3 ans.

Entre ces inspections externes, le SRP fait des contrôles périodiques et vérifie si les taux de comptage (CPM, CPS) sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés au cours de l'inspection la plus récente de la firme externe, lorsque la limite prescrite par Santé Canada a été validée. La stabilité des mesures (répétabilité) permet de s'assurer que le système reste stable entre les inspections.

Important! Le SRP doit également effectuer des mesures dans les situations suivantes :

- Pour tous les appareils: lors du déplacement ou du déménagement de l'appareil
- Pour les appareils fonctionnant à faisceau ouvert : lorsqu'il y a un changement dans l'occupation des salles adjacentes au local d'utilisation

Pour les postes de travail permanents adjacents à une salle dans laquelle un appareil à faisceau ouvert est utilisé, le SRP s'assure que la dose reçue par toute personne ne dépasse pas 1 mSv par année.

11. ACQUISITION, ÉVACUATION ET TRANSFERT

L'utilisation d'appareils à rayons X à l'Université doit être sécuritaire de l'acquisition à l'évacuation des appareils.

La déclaration d'acquisition de tout appareil à rayons X (matériel neuf ou usagé, transferts, dons, etc.) est obligatoire* et doit être approuvée par le SRP.

*Ceci exclut l'acquisition des appareils radiologiques dentaires, qui s'effectue par la direction de la faculté de médecine dentaire.

11.1 ACQUISITION

L'acquisition d'un dispositif émettant des rayons X doit faire l'objet d'une déclaration dans la demande d'achat ainsi qu'auprès du SRP.

11.1.1 Demande d'achat

Lors de la demande d'achat dans le système informatique de gestion financière People Soft de l'Université, la demande doit être identifiée dans la catégorie EQRAY « Équipement à rayonnement ».

La demande d'achat est ensuite approuvée par le secteur de la radioprotection, sur le système de gestion financière People Soft.

11.1.2 Déclaration d'acquisition

Le responsable de l'acquisition doit faire l'inscription de son dispositif directement auprès du SRP, via l'adresse courriel Radioprotection@ssp.ulaval.ca. Les informations à transmettre sont suivantes :

- Nom et coordonnées de la personne responsable (personne contact)
- Local d'utilisation du dispositif émettant des rayons X
- Type d'appareil (analytique ou radiologique)
- Fonction de l'appareil (diffractomètre, FRX, radiographie, radioscopie, etc.)
- Fabricant et modèle
- Tension maximale (kV)
- Courant maximal (mA)

11.2 ÉVACUATION OU TRANSFERT VERS UNE AUTRE UNITÉ

11.2.1 Évacuation

Pour l'évacuation d'un appareil à rayons X (défectueux ou hors d'usage), il est d'abord recommandé de :

- Voir si l'appareil ou certaines de ses composantes peuvent leur être retournés au fabricant/fournisseur
- Voir dans le manuel de l'appareil si des instructions concernant l'évacuation sont rapportées

Si les composantes comportant des matières dangereuses ne sont pas retournées au fabricant, une demande de récupération doit être faite auprès du SRP. Ces composantes incluent (sans s'y limiter) :

- Tubes à rayons X
- Composantes comportant du béryllium (toxique à l'ingestion ou l'inhalation)
- Huile de transformateur comportant des biphénylpolychlorés (BPC) pour les appareils fabriqués avant 1980
- Certaines pièces comportant du plomb (selon la quantité, les pièces pourraient devoir être récupérées par le secteur de recyclage des métaux du Service des immeubles)

En collaboration avec le secteur de la gestion des risques chimiques, les matières dangereuses seront évacuées de façon sécuritaire et règlementaire.

Pour les autres composantes de l'appareil, le responsable devra s'assurer que l'appareil sera **rendu inopérable avant de le rebuter.** Par exemple : débrancher et enlever les câbles qui alimentent l'appareil et les autres raccordements électriques.

11.2.2 Transfert

Avant d'effectuer un transfert, le responsable de l'appareil doit aviser le SRP et fournir les informations suivantes :

- Nom, modèle et local qui concernent l'appareil à transférer
- Date prévue du transfert
- Nom et coordonnées du nouveau responsable de l'appareil

12. INCIDENTS

Le SSP gère un centre de traitement des appels (CTA) qui est en activité jour et nuit, ainsi que des équipes opérationnelles qui assurent une surveillance permanente sur le campus (patrouilles et interventions).

Site web : https://www.ssp.ulaval.ca/.

En cas d'incidents, communiquer avec le secteur des opérations du SSP, auquel le SRP est rattaché.

12.1 NUMÉROS DE TÉLÉPHONE D'URGENCE

Service de sécurité et de prévention de l'Université

- Sur le campus : au poste 555 ou par les téléphones rouges
- Avec un téléphone cellulaire : 418-656-5555

Responsable de la radioprotection de l'Université

- 418-656-2131 poste 402893 ou 418-654-8936

ANNEXE 1 – PROCÉDURE DE VÉRIFICATION (APPAREIL ANALYTIQUE)

UNIVERSITÉ LAVAL

Service de sécurité et de prévention

Procédure de vérification – Appareils à rayons X

La fiabilité des mécanismes de sécurité des appareils diminue avec l'âge et avec l'usage. Le responsable de l'appareil doit appliquer la procédure suivante **tous les 6 mois** OU avant l'utilisation si l'appareil n'a pas été utilisé pendant plus de 6 mois, ainsi que lors de toute anomalie détectée.

Procédure

1. Vérifier le fonctionnement des voyants lumineux. Par exemple :
    - « ready », « X-RAY-ON » lorsque le faisceau est ouvert
    - « shutter open » si un obturateur est utilisé
2. Démarrage : s'il y a lieu avec l'appareil, vérifier que le démarrage de la haute tension **n'est pas possible** lorsque l'accès au faisceau est possible (panneau/obturateur ouvert).
3. Vérifier les entrebarrages (systèmes de verrouillage intégrés, *interlock*) :
    a. S'assurer que le panneau d'accès **est verrouillé** pendant la haute tension

    OU

    b. S'assurer que la haute tension **cesse automatiquement** et/ou l'obturateur **se ferme** si le panneau d'accès peut être ouvert pendant la haute tension

        i. Suite à l'arrêt de la haute tension, effectuer un redémarrage forcé, lorsque l'accès est encore ouvert (panneau ouvert). Dans ce cas, le redémarrage **ne doit pas fonctionner**.
4. Vérifier que les ouvertures non utilisées donnant accès au faisceau sont bloquées ou vissées.
5. Vérifier que tous les blindages, fenêtres de sortie du faisceau, accessoires et raccords sont en bon état et fonctionnent parfaitement.
6. Tenir à jour le registre de vérification présent dans le cartable.

Note importante : Si le responsable de l'appareil doit déverrouiller un dispositif de sécurité pour faciliter une tâche particulière d'entretien ou pour des besoins de recherche, **il est impératif d'observer les consignes décrites dans le document d'entretien AVANT le déverrouillage**.

ANNEXE 2 – PROCÉDURE DE VÉRIFICATION (XRF)

UNIVERSITÉ LAVAL

Service de sécurité et de prévention

Procédure de vérification – Appareils à fluorescence X (XRF)

La fiabilité des appareils diminue avec l'âge et avec l'usage. Le responsable de l'appareil doit appliquer la procédure suivante **tous les 6 mois** OU avant l'utilisation si l'appareil n'a pas été utilisé pendant plus de 6 mois, ainsi que lors de toute anomalie détectée.

Procédure

1. Vérifier le fonctionnement des voyants lumineux. Par exemple :
   - « ready » « X-RAY-ON » lorsque le faisceau est ouvert
   - « shutter open » si un obturateur est utilisé
2. Démarrage : s'il y a lieu avec l'appareil, vérifier que le démarrage de la haute tension **n'est pas possible** lorsque l'accès au faisceau est possible (absence du capuchon).

   Cette étape vérifie le fonctionnement des capteurs de détection de proximité reliés au mécanisme de verrouillage des rayons X.
3. Vérifier les entrebarrages (systèmes de verrouillage intégrés, *interlock*) :
   a. S'assurer que la haute tension **cesse automatiquement** et/ou l'obturateur **se ferme** si le capuchon est retiré pendant la haute tension
4. Vérifier que les pièces d'équipement, fenêtres de sortie du faisceau, accessoires et raccords sont en bon état et fonctionnent parfaitement.
5. Tenir à jour le registre de vérification présent dans le cartable.

Note importante : Si le responsable de l'appareil doit déverrouiller un dispositif de sécurité pour faciliter une tâche particulière d'entretien ou pour des besoins de recherche, **il est impératif d'observer les consignes décrites dans le document d'entretien**.

Recommandation supplémentaire :

- Ne jamais tenir un échantillon avec les mains pendant une analyse.

ANNEXE 3 – ENTRETIEN ET DÉSACTIVATION DES SYSTÈMES DE SÉCURITÉ DES APPAREILS

UNIVERSITÉ LAVAL

Service de sécurité et de prévention

Entretien et désactivation des systèmes de sécurité d'appareils émettant des rayons X

Responsabilités et procédure lors d'un entretien ou lors de la désactivation d'un système de sécurité de l'appareil. Seule la personne responsable désignée peut effectuer ces étapes.

Responsabilités des personnes responsables de l'entretien des appareils

1. Avoir reçu une formation adéquate relativement à l'entretien et à la réparation des appareils.

2. Avoir lu et compris les documents présents dans le cartable du secteur de la radioprotection de l'Université.

3. Porter des dosimètres individuels au corps entier ou aux extrémités, selon les tâches à accomplir.

Étapes à suivre en cas de déverrouillage d'un dispositif de sécurité

a. Avant le déverrouillage, fournir au professeur responsable de l'appareil un résumé qui décrit l'activité présentant un risque d'exposition aux rayons X et la procédure qui sera suivie.

b. Informer le secteur de la radioprotection du SSP, qui s'assurera de fournir un appareil de contrôle radiologique approprié si la tâche à accomplir risque de s'accompagner d'une exposition au rayonnement. Il veillera à ce que les limites de dose admissibles ne soient pas dépassées.

c. Empêcher toute utilisation de l'appareil à rayons X pendant la désactivation, par exemple en appliquant une des mesures suivantes :

- Apposer une note écrite indiquant de manière explicite que le dispositif de sécurité a été déverrouillé et que l'appareil ne doit pas être utilisé.
- Installer un voyant rouge clignotant ou un signal sonore intermittent, clairement visible ou audible, à proximité de l'élément dont le dispositif de sécurité a été déverrouillé.

d. Veiller à ce que le dispositif de sécurité soit réenclenché (retour **aux conditions de sûreté intégrales**) et que tout blindage enlevé ou modifié pour faciliter la tâche soit remis en place une fois la tâche accomplie.

ANNEXE 4 – RÈGLES DE SÉCURITÉ (APPAREIL ANALYTIQUE)

UNIVERSITÉ LAVAL

Service de sécurité et de prévention

Règles de sécurité - Appareil à rayons X

APPAREIL : _____

RESPONSABLE : _____

1. Seules les personnes qualifiées ayant reçu une formation spécifique à l'appareil et une formation en radioprotection peuvent utiliser l'appareil.

2. Les documents de règlementation présents dans le cartable doivent avoir été lus et compris.

3. La clé de fonctionnement, s'il y a lieu, doit être retirée d'un appareil qui est non utilisé et rangée dans un endroit connu des utilisateurs seulement.

4. Aucune utilisation n'est permise si un des systèmes de sécurité est désactivé.

5. Ne jamais ouvrir les panneaux de protection donnant accès au faisceau primaire (réservé au personnel détenant une autorisation).

6. AUCUN ajustement ou alignement n'est permis lors de l'émission de rayons X. AUCUN déverrouillage non autorisé des dispositifs de sécurité n'est permis.

7. Les dosimètres doivent être portés. Si un dosimètre témoin est utilisé, le registre d'utilisation doit être rempli :

   Corps : _____ Témoin + registre :_____ Extrémité :_____

8. Toute anomalie des dispositifs de sécurité doit être immédiatement rapportée à la personne responsable.

9. Le secteur de la radioprotection (Radioprotection@ssp.ulaval.ca) doit être contacté **lors d'un déplacement de l'appareil et lorsqu'une anomalie est détectée** afin qu'un contrôle soit effectué avant toute nouvelle utilisation de l'appareil.

Pour toute information, contacter la responsable de la radioprotection au poste 402893.
En cas d'urgences, faites le 418-656-5555.

ANNEXE 5 – RÈGLES DE SÉCURITÉ (APPAREIL DE RADIOGRAPHIE)

UNIVERSITÉ LAVAL

Service de sécurité et de prévention

Règles de sécurité - Appareil de radiographie

APPAREIL : _____

RESPONSABLE : _____

1. Seules les personnes qualifiées ayant reçu une formation spécifique à l'appareil et une formation en radioprotection peuvent utiliser l'appareil.

2. Les documents de règlementation présents dans le cartable doivent avoir été lus et compris.

3. Le port d'un dosimètre personnel est obligatoire.

4. Le matériel de protection individuelle (tabliers plombés, cache-thyroïde, etc.) doit être utilisé correctement et doit faire l'objet de vérifications[1]. Le dosimètre doit être porté sous le tablier de plomb.

5. Aucune personne n'est autorisée à rester dans la salle de radiographie durant l'exposition, sauf si absolument nécessaire.

6. L'opérateur doit se tenir aussi loin que possible du faisceau de rayons X. Il devrait sortir de la pièce lorsque possible.

7. Durant toute exposition, les portes de la salle de radiographie devront être fermées.

8. Les appareils sous tension et prêts à produire des rayons X ne doivent pas être laissés sans surveillance.

9. Le secteur de la radioprotection (Radioprotection@ssp.ulaval.ca) doit être contacté **lors d'un déplacement de l'appareil et lorsqu'une anomalie est détectée** afin qu'une inspection puisse être organisée.

Pour toute information, contacter la responsable de la radioprotection au poste 402893.

En cas d'urgences, faites le 418-656-5555.

[1] Vérification visuelle et tactile annuelle par le responsable de l'appareil et vérification radiographique par le physicien d'une firme externe spécialisée, organisée tous les 2 ans par le SSP.