



# **Opérateur d'Analyseurs à fluorescence rayons-X (FRX)**

## **Livret de renseignements sur la certification et la préparation aux examens**

**Droit d'auteur**

**Ressources naturelles Canada (RNCan)**

***Gouvernement du Canada***

**Version 5**

**Mise à jour : 17 décembre 2024**



## Table des matières

<b>I. Avant-propos et portée .....</b>	<b>4</b>
<b>II. Le Programme national de certification des opérateurs d'analyseurs FRX –</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>III. Niveaux de certification en fluorescence X et examens .....</b>	<b>7</b>
<b>IV. Exigences en matière de certification, de renouvellement et de recertification .....</b>	<b>9</b>
<b>V. Exigences et programme de formation des opérateurs d'analyseurs FRX.....</b>	<b>11</b>
<b>VI. THÉORIE.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Propriétés fondamentales de la matière.....</b>	<b>13</b>
1.1 Atomes, éléments, molécules et composés .....	13
1.2 Particules atomiques : propriétés des protons, électrons et neutrons .....	14
1.3 Structure atomique .....	14
1.4 Le numéro atomique et le nombre de masse.....	15
<b>2. Types de rayonnement .....</b>	<b>16</b>
2.1 Spectre électromagnétique .....	18
2.2 Le rayonnement pénétrant : les rayons X et gamma.....	18
2.3 Sources de rayons X.....	19
2.4 Rayons X du bremsstrahlung .....	19
2.5 Production des rayons X.....	19
2.6 Rayons X caractéristiques .....	21
<b>3. Principes de la fluorescence X.....</b>	<b>22</b>
3.1 Énergies caractéristiques des rayons X émis par les éléments .....	23
<b>4. Analyseurs par fluorescence X (analyseurs FRX) .....</b>	<b>24</b>
4.1 Constituants principaux .....	24
4.2 Appareil à fluorescence X.....	25
4.3 Détection des rayons X.....	25
4.4 Analyseur multi-canaux .....	27
4.5 Ordinateur .....	29
<b>5. Sources d'erreur.....</b>	<b>30</b>
5.1 Erreurs systématiques et aléatoires.....	30
5.2 Exactitude, précision et biais .....	31
<b>6. Fonctionnement de l'analyseur à fluorescence X .....</b>	<b>34</b>
6.1 Utilisation de l'analyseur à fluorescence X – Généralités.....	34
6.2 Avantages des analyseurs à fluorescence X portatifs .....	35
6.3 Limites typiques des analyseurs à fluorescence X portatifs.....	35
6.4 Éléments habituels des analyseurs.....	35
6.5 Modes d'essai .....	36
<b>7. Applications de la fluorescence X .....</b>	<b>38</b>
7.1 Identification et analyse chimique des alliages .....	38
7.2 Analyse des sols .....	39
7.3 Analyse des minerais.....	40
7.4 Comment obtenir des données de qualité.....	42
<b>8. Interaction du rayonnement avec la matière.....</b>	<b>42</b>
8.1 Ionisation.....	42
8.2 Interaction du rayonnement avec la matière .....	43
8.3 Unités d'exposition au rayonnement : le coulomb/kg et le röntgen .....	44
8.4 Atténuation du rayonnement électromagnétique .....	44
<b>9. Effets biologiques du rayonnement.....</b>	<b>45</b>
9.1 Unités de la dose absorbée : le gray et le rad (toute substance).....	45
9.2 Unités de dose équivalente : le sievert et le rem (effets biologiques).....	45



9.3	Norme de 2007 de la CIPR relative aux limites de dose .....	46
9.4	Rayonnement naturel .....	47
9.5	Radiosensibilité des organes – radiolésions et rétablissement .....	47
9.6	Symptômes du mal des rayons .....	47
9.7	Irradiation aiguë et dommages corporels .....	48
9.8	Contrôle de l'exposition du personnel au rayonnement .....	49
9.9	Le concept d'ALARA (As Low As Reasonably Achievable) .....	49
10.	Détection du rayonnement .....	51
10.1	Les instruments de détection et de mesure du rayonnement .....	51
10.2	Contrôle des rayonnements reçus par le personnel .....	52
10.3	Radiamètres .....	52
10.4	Rapport d'observation avec le radiamètre .....	53
11.	Pratiques sécuritaires du travail en FRX .....	53
11.1	Caractéristiques de l'analyseur FRX .....	53
11.2	Étiquettes FRX .....	54
11.3	Responsabilités de l'opérateur d'analyseur FRX .....	54
11.4	Temps, distance et blindage permettant de réduire l'exposition au rayonnement .....	56
11.5	Contrôle exercé par le propriétaire sur les analyseurs FRX lorsqu'ils ne sont pas utilisés .....	57
12.	Normes canadiennes applicables aux analyseurs FRX .....	58
12.1	Loi sur les dispositifs émettant des radiations (LDER) .....	58
12.2	Code canadien du travail .....	58



## I. Avant-propos et portée

---

Ressources naturelles Canada (RNCAN) est un ministère fédéral qui gère le programme pancanadien de certification des personnes qui effectuent des essais non destructifs (END). L'Organisme National de Certification en END de RNCAN (OCEND), par l'entremise de CanmetMATÉRIAUX, certifie les personnes dans le cadre du Programme national de certification du personnel affecté aux END.

L'OCEND de RNCAN a adopté une version modifiée de la norme internationale ISO 20807:2004, « Essais non destructifs – Qualification du personnel pour des applications limitées en essais non destructifs » comme base de la certification des opérateurs d'analyseur à fluorescence X (FRX). Le programme de certification des opérateurs d'analyseur FRX de OCEND de RNCAN a été élaboré et mis en œuvre par RNCAN avec la collaboration de Santé Canada. Santé Canada publie des codes de sécurité qui sont incorporés par renvoi dans le Code canadien du travail, qui s'applique aux secteurs sous réglementation fédérale. Un addenda qui s'applique aux analyseurs à fluorescence X portatifs à tube à rayons X et à faisceau ouvert relève du champ d'application du Code de sécurité 32 et exige que l'utilisateur d'un « analyseur à fluorescence X portatif à tube à rayons X et à faisceau ouvert » soit un opérateur d'analyseur FRX certifié par l'OCEND de RNCAN. Les analyseurs FRX ont des applications dans des techniques d'analyse qui (a) sont répétitives ou automatisées, et (b) relèvent des END industriels limités. Un opérateur d'analyseur FRX certifié est une personne qui possède une certification valide administrée par RNCAN pour une méthode d'END par FRX. Le programme de certification en FRX de RNCAN comprend un volet de la formation à la radioprotection et des examens fondés sur ceux des END par radiographie industrielle.

La certification par l'OCEND de RNCAN est un programme fédéral qui a pour but de fournir des services de certification impartiaux à l'échelle nationale. Afin que cet objectif soit atteint, un comité consultatif composé de personnes qui connaissent bien les méthodes des END conseille OCEND de RNCAN sur le fonctionnement de son programme.

Le présent livret de préparation aux examens de certification en FRX de RNCAN contient des informations sur la théorie, l'utilisation, l'entretien et l'entreposage des analyseurs à fluorescence X portatifs à tube à rayons X et à faisceau ouvert ainsi que sur les considérations de radioprotection et de sécurité.

Dans le contexte de la norme ISO 20807:2004, RNCAN est l'« organisme de certification » et le régime et les lignes directrices de certification présentés dans le présent livret l'emportent sur tout détail de la norme de certification générique en cas de contradiction.

Un opérateur doit posséder des connaissances fondamentales de la théorie de la fluorescence des rayons X et de ses utilisations, ainsi que des principes et des pratiques de la protection en ce qui concerne les analyseurs FRX portatifs à faisceau ouvert. Il est conseillé aux candidats de pratiquer l'autoformation avant de passer l'examen. Les candidats ont la responsabilité de s'assurer d'utiliser la dernière version du présent livret pour se préparer à la certification d'opérateur d'analyseur FRX. Le présent livret peut être révisé périodiquement.

L'OCEND de RNCAN remercie tous les organismes, organisations et personnes dont la contribution, les commentaires et les suggestions lui ont été utiles dans la préparation du présent livret ainsi que le comité consultatif technique et schématique du FRX, qui a travaillé à guider et à renforcer le programme de certification des opérateurs d'analyseurs FRX. La rédaction du présent document, qui fournit de



l'information concise, a exigé beaucoup d'attention. Il est toutefois possible que des erreurs ou des omissions s'y trouvent. Ceci dit, Ressources naturelles Canada ne pourra être tenu responsable de l'exactitude des informations présentées. Nous encourageons le lecteur à consulter les autres documents donnés en référence, ainsi que tous les lois, règlements et codes de sécurité applicables ou d'autres références subordonnées citées dans le livret. Sous aucune considération le gouvernement du Canada ne sera tenu responsable à l'égard d'une personne, d'une entreprise ou d'une entité commerciale concernant des conséquences présumées, directes ou indirectes, ou d'autres dommages causés en raison de l'usage de ce livret.

L'OCEND de RNCAN s'engage à protéger vos renseignements personnels, que vous soyez déjà client ou un nouveau demandeur. Tous les renseignements personnels créés, détenus ou recueillis par le gouvernement du Canada sont protégés en vertu de la Loi sur la protection des renseignements personnels. Notre bureau veillera à ce que les renseignements personnels recueillis ne soient divulgués à personne, sauf les employés du gouvernement du Canada qui en ont besoin pour assumer leurs fonctions ou aux tiers autorisés par écrit par le client ou le demandeur auprès de notre bureau. Toute communication entre l'OCEND et ses clients ou les demandeurs est réputée être confidentielle et est réservée à l'usage exclusif du destinataire visé. À titre d'exception à cette politique, le nom de l'employé certifié, ainsi que la ville et la province où il habite et l'état de sa certification, seront rendus publics comme moyen supplémentaire pour vérifier l'état de la certification.

**REMARQUE IMPORTANTE :** Nous conseillons aux utilisateurs d'appareils à fluorescence à rayons X auquel il est fait référence dans le présent livret de contacter l'organisme fédéral, provincial ou territorial responsable de la radioprotection pour prendre connaissance des règles d'exploitation en vigueur.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. Toute utilisation, reproduction ou distribution non-autorisée serait illégale et, donc, entraînerait les sanctions prévues par la loi.

**Pour présenter des informations sur la certification, veuillez communiquer avec :**

Organisme National de Certification en Essais Non Destructifs  
CanmetMATÉRIAUX, Ressources naturelles Canada, gouvernement du Canada  
183, chemin Longwood Sud Hamilton (Ontario) L8P 0A5  
Courriel : [ndt-end@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:ndt-end@nrcan-rncan.gc.ca)  
Téléphone : 1-866-858-0473  
Site web : [ndt.nrcan.gc.ca](http://ndt.nrcan.gc.ca)



## II. Le Programme national de certification des opérateurs d'analyseurs FRX – Introduction

---

La fluorescence des rayons X (« ou fluorescence X ») est une technique d'essais non destructifs (END) permettant de détecter et de mesurer la concentration d'éléments dans les objets. On appelle fluorescence l'absorption d'un rayonnement incident et sa réémission sous la forme d'un rayonnement de plus basse énergie. Un exemple de fluorescence est la lumière visible émise par les t-shirt exposés à la lumière ultraviolette invisible. Certains minéraux « fluorescent » : ils émettent de la lumière visible lorsqu'ils sont exposés à la lumière ultraviolette.

À l'échelle atomique, la fluorescence de lumière visible est causée par l'absorption de rayons ultraviolets causant l'éjection d'électrons peu énergétiques sur des couches externes des atomes. Les « trous » laissés par les électrons éjectés sont remplis par d'autres électrons qui descendent des couches encore plus éloignées du noyau. Cette chute s'accompagne de la libération de quantités spécifiques d'énergie que nous percevons comme de la lumière visible d'une couleur donnée.

Le même phénomène est en jeu pour la fluorescence X, mais l'énergie du rayonnement incident est plus élevée. Plutôt que d'exposer une substance au rayonnement ultraviolet et d'observer une fluorescence dans la lumière visible, on expose une substance aux rayons X et on observe la fluorescence de rayons X de moindre énergie.

À l'échelle atomique, la fluorescence des rayons X est causée par l'éjection d'un électron de haute énergie d'une des couches les plus intérieures des atomes par des rayons X incidents. Les trous laissés par les électrons éjectés sont remplis par d'autres électrons qui « atterrissent » des couches externes. Cette chute libère une quantité spécifique d'énergie, sous la forme d'un rayonnement X caractéristique.

Les rayons X émis par fluorescence possèdent des quantités discrètes d'énergie, qui résultent des niveaux d'énergie des couches électroniques d'un élément. Or, ces niveaux d'énergie sont caractéristiques de chaque élément. Ainsi, en analysant les énergies du spectre des rayons X qu'une substance émet par fluorescence, on peut déterminer quels éléments composent une substance et quelle est leur concentration. L'information contenue dans le spectre peut être suffisante pour identifier la substance.

Pour utiliser de façon compétente les analyseurs à fluorescence X portatifs (appareils FRX), les candidats doivent comprendre comment un analyseur de FRX fonctionne, comment l'actionner, les sources potentielles d'erreur de mesure et les applications générales de FRX. Pour utiliser en toute sécurité les analyseurs à fluorescence X portatifs (appareils FRX), les candidats doivent comprendre les dangers des rayons X, connaître les principes fondamentaux de la radioprotection et appliquer les pratiques de travail sécuritaires en matière de XRF selon les exigences réglementaires canadiennes applicables.



### **III. Niveaux de certification en fluorescence X et examens**

---

Toutes les questions d'examen sont basées sur le contenu de ce livret de préparation à l'examen de certification des opérateurs d'analyseurs à fluorescence X portatifs produit par OCEND de RNCAN.

**Remarque :** L'examen pratique et l'expérience ne sont pas des éléments obligatoires de la certification d'opérateur d'analyseur FRX.

Il y a deux niveaux de certification pour les opérateurs d'analyseurs à fluorescence X :

#### **Niveau 1**

Un opérateur certifié de niveau 1 est qualifié pour utiliser des analyseurs FRX portatifs manuels à faisceau ouvert.

L'examen pour le niveau 1 est en une seule partie.

**Examen de niveau 1 :** 30 questions à choix multiples portant sur les notions de base de la théorie et de l'utilisation de la fluorescence X.

- 10 questions sur la théorie et l'application et;
- 20 questions sur la radioprotection liée à la fluorescence X

Le candidat a 90 minutes pour faire l'examen. La note de passage est de 70 %.

#### **Niveau 2**

En plus d'être qualifié pour exercer les responsabilités d'un opérateur d'analyseurs à fluorescence X de niveau 1, l'opérateur de niveau 2 possède les qualifications nécessaires pour dispenser la formation officielle acceptée en fluorescence X à des fins de certification.

Les titulaires de la certification de niveau 2 peuvent être :

- des représentants du fabricant;
- des employés d'une entreprise, aux fins de la formation d'autres membres du personnel au sein de la même compagnie, des mêmes locaux ou du même projet.

L'examen de niveau 2 comprend l'examen de niveau 1 et un examen supplémentaire de niveau 2. Le candidat doit réussir les examens des niveaux 1 et 2 pour obtenir la certification de niveau 2.

**Remarque :** Les titulaires d'une certification d'opérateur d'analyseurs FRX de niveau 1 de réussir l'examen de niveau 2 pour obtenir une certification de niveau 2.

**Examen de niveau 2 :** 30 questions à choix multiples sur des connaissances théoriques plus détaillées ou avancées sur la technique d'analyse FRX, la radioprotection, l'équipement et les responsabilités des intervenants.

Le candidat a 90 minutes pour faire l'examen. La note de passage est de 70 %.



## Processus d'examen

- Les **examens en FRX écrits sur papier** sont réservés aux premières tentatives d'examen pour les candidats à la certification initiale et à la recertification. Ils ne sont administrés que par un centre d'examens en FRX spéciaux (CEFS) autorisé par l'OCEND.
- Un formulaire d'admission à l'examen de RNCAN valide et rempli est délivré par un CEFS avant le début d'un examen et doit être inclus avec la soumission de l'examen terminé à l'OCEND de RNCAN.
- Les candidats doivent toujours communiquer au préalable avec l'administrateur de l'examen pour s'assurer que leur examen peut être correctement administré au jour et à l'heure prévus.
- Les formulaires d'admission sont valables pour une (1) tentative d'examen. Si un candidat échoue à un examen, il doit présenter une demande de reprise d'examen à l'OCEND de RNCAN.
- Les tentatives de reprise de l'examen doivent être planifiées et effectuées au moyen du système électronique en ligne.
- Les autorisations des **examens écrits en ligne** sont fournies aux candidats par courriel lorsqu'une demande de certification d'opérateur d'analyseur FRX initiale est reçue sans examen et est traitée ou lorsqu'une demande de reprise d'examen est traitée.

**Remarque :** Les candidats peuvent consulter les résultats d'examen non officiels immédiatement après avoir terminé l'examen s'ils utilisent le système d'examen en ligne.

Veuillez visiter le site Web de l'OCEND de RNCAN à l'adresse <http://ndt.nrcan.gc.ca> pour obtenir de plus amples renseignements.

- Il incombe au candidat de s'assurer qu'il a satisfait à toutes les exigences avant l'examen. Veuillez consulter la section IV pour connaître les exigences.
- L'OCEND de RNCAN n'a pas la responsabilité d'assurer la coordination individuelle de la planification des examens et la disponibilité des services.

**Remarque :** À l'exception du centre d'examen officiel de l'OCEND situé dans les installations de CanmetMATÉRIAUX de RNCAN, tous les autres centres d'examen sont détenus et exploités en tant qu'organisations distinctes de l'OCEND de RNCAN et fournissent uniquement des services de surveillance des examens au nom du programme de certification de l'OCEND de RNCAN.

## Frais d'examen

Il y a deux types de frais à payer associés à l'examen du candidat :

### 1. Frais de demande et d'examen de l'OCEND de RNCAN

Ces frais sont payés à l'OCEND de RNCAN et couvrent ce qu'il en coûte à l'OCEND pour traiter les demandes, noter les examens, tenir les dossiers, communiquer et fournir les services d'examen et les autres services de soutien nécessaires au processus de certification.

Veuillez consulter la page Frais pour la certification – Opérateur d'analyseur FRX sur le site Web de l'OCEND de RNCAN à l'adresse <http://ndt.nrcan.gc.ca> pour obtenir des renseignements à jour sur les frais de l'OCEND de RNCAN.

### 2. Frais de surveillance du centre d'examen

Ces frais sont payés au centre d'examen et couvrent la surveillance physique du processus d'examen au centre d'examen ou dans une installation à distance, ainsi que la gestion des besoins associés à l'examen.



Le réseau de centres d'examen de RNCAN est mis en œuvre pour offrir aux candidats des options flexibles et pratiques partout au Canada. L'OCEND de RNCAN suggère des frais d'examen aux centres d'examen pour favoriser l'uniformité. Cependant, les centres d'examen peuvent raisonnablement ajuster leurs frais pour répondre adéquatement à leurs exigences opérationnelles particulières qui peuvent exister dans leur région ou leur établissement.

## IV. Exigences en matière de certification, de renouvellement et de recertification

### IMPORTANT!

- Les tout derniers formulaires et exigences relatives à la demande sont disponibles sur le site Web de l'OCEND de RNCAN : <http://ndt.nrcan.gc.ca> **Téléchargements rapides : Organisme de certification en END : Formulaires et guides.**
- Le paiement des frais ne termine ni ne garantit le processus de demande et d'examen. Les examens ne seront pas traités tant que la demande n'aura pas été entièrement remplie, vérifiée et approuvée par RNCAN, que les frais exigés n'auront pas été payés et que les conditions n'auront pas été respectées.
- Il incombe à l'opérateur d'analyseur FRX de connaître la date d'expiration de sa certification en FRX. À l'approche de la date d'expiration, il incombe au candidat de présenter une demande de renouvellement ou de recertification à l'OCEND de RNCAN.
- RNCAN n'avisera pas l'opérateur d'analyseur FRX qu'il est temps de procéder au renouvellement ou à la recertification.
- Les candidats doivent avoir atteint l'âge de la majorité dans la province où ils résident au moment de la certification.
- Le paiement des frais ne termine ni ne garantit le processus de demande et d'examen. **Les examens ne seront pas traités tant que la demande n'aura pas été entièrement remplie, vérifiée et approuvée par RNCAN, que les frais exigés n'auront pas été payés et que les conditions n'auront pas été respectées.**

### Certification d'opérateur d'analyseur FRX initiale

Pour être admissible à la certification d'opérateur d'analyseur FRX initiale, le candidat doit :

1. soumettre un formulaire de demande de certification d'opérateur d'analyseur FRX de RNCAN dûment rempli;
2. soumettre un formulaire d'identification photographique de RNCAN dûment rempli, accompagné de deux photos de passeport, tel que décrit à la section 4 en page 2 du formulaire de demande;
3. soumettre un formulaire de vérification d'identité de RNCAN dûment rempli;
4. fournir une déclaration de formation de RNCAN dûment remplie;
5. soumettre un formulaire de rapport de test de vision d'opérateur d'analyseur FRX de RNCAN dûment rempli;
6. soumettre un code de conduite signé de RNCAN;



7. payer les frais de demande. Le barème des frais en vigueur est disponible sur le [site Web de l'OCEND de RNCAN](#);
8. réussir le ou les examens de qualification à la certification initiale.

## Renouvellement de la certification d'opérateur d'analyseur FRX

À l'approche de la date d'expiration de la certification initiale (pas plus de six mois avant la date d'expiration) ou après la recertification, la personne certifiée peut demander le renouvellement. Le renouvellement doit être obtenu dans les cinq (5) années qui suivent la date d'expiration de la dernière certification.

Pour demander le renouvellement de la certification d'opérateur d'analyseur FRX, la personne doit :

1. soumettre un formulaire de demande de renouvellement de la certification d'opérateur d'analyseur FRX de RNCAN dûment rempli;
2. soumettre un formulaire de RNCAN dûment rempli qui atteste une activité professionnelle continue et satisfaisante en FRX;
3. soumettre un rapport de test de vision d'opérateur d'analyseur FRX de RNCAN dûment rempli;
4. soumettre un code de conduite de RNCAN signé;
5. payer les frais de renouvellement, payables à l'OCEND de RNCAN. Le barème des frais en vigueur est disponible sur le [site Web de l'OCEND de RNCAN](#).

Si une personne renouvelle après la date d'expiration de sa certification, des frais de renouvellement tardif sont exigés.

**Si plus de 365 jours se sont écoulés depuis la date d'expiration, le renouvellement n'est pas offert. Seule la recertification est possible.**

## Recertification d'opérateur d'analyseur FRX

À l'issue de chaque deuxième période de validité (cinq ans après le renouvellement, ou suite à une interruption importante de l'activité professionnelle), un nouveau certificat est exigé.

Pour demander la recertification d'opérateur d'analyseur FRX, la personne doit :

1. soumettre une demande de recertification d'opérateur d'analyseur FRX de RNCAN dûment remplie;
2. soumettre deux photos de passeport tel que décrit à la section 4 en page 2 de la demande de certification d'opérateur d'analyseur FRX;
3. soumettre une déclaration de formation en FRX de RNCAN;
4. soumettre un rapport d'examen de la vue d'opérateur d'analyseur FRX de RNCAN dûment rempli;
5. soumettre un code de conduite de RNCAN signé;
6. réussir le ou les examens de recertification;
7. payer les frais de demande. Le barème des frais en vigueur est disponible sur le [site Web de l'OCEND de RNCAN](#).

La recertification prolonge la validité de cinq (5) ans à compter de la date de la recertification.



## V. Exigences et programme de formation des opérateurs d'analyseurs FRX

---

### Exigences de formation pour les opérateurs d'analyseurs FRX

La formation officielle acceptée sera offerte par un membre du personnel possédant une certification FRX de niveau 2, aux conditions suivantes :

1. Pour toute formation, la démonstration et la présence physique d'un analyseur à fluorescence X portatif à tube à rayons X et à faisceau ouvert conforme à la Loi sur les dispositifs émettant des radiations sont exigées.
2. La formation sera fournie par un membre du personnel possédant une certification FRX de niveau 2 qui peut être :
  - Un représentant d'un fabricant de ce type d'analyseur FRX ou d'un organisme de formation reconnu;
  - Un employé d'une entreprise, aux fins de la formation d'autres membres du personnel au sein de la même compagnie, des mêmes locaux ou du même projet.
3. Le non-respect de ces conditions peut entraîner l'inacceptabilité de la formation pour la certification.

Toute la formation doit être attestée par écrit par le moniteur de formation en FRX certifié de niveau 2 et le candidat. La déclaration de formation remplie doit être fournie à l'OCEND avec la demande. Les heures de formation minimales suivantes sont suggérées :

- Minimum d'une heure – démonstration et pratique de l'utilisation de l'analyseur portable pour la prise de mesures précises et sûres
- Minimum d'une heure – démonstration et pratique du réglage, de la manipulation, du fonctionnement, de l'entretien général et de l'entreposage sécuritaires de l'analyseur.
- Minimum de 3 heures – aperçu d'ensemble de la matière traitée dans ce livret de FRX

**Note :**

Les questions d'examen sont basées sur les sujets abordés dans ce livret de FRX. Afin de réussir aux examens de FRX, tout candidat doit étudier par lui-même le contenu de ce livret en plus de suivre la formation de 3 heures donnant un aperçu de la matière traitée.

Il est conseillé au candidat d'étudier seul le contenu du présent livret avant de suivre la formation de trois heures donnant un aperçu de ce livret et de passer les examens.



## Programme de formation des opérateurs d'analyseurs FRX

Les sujets de formation recommandés dans le livret de la FRX sont les suivants.

### SUJETS

1. Propriétés fondamentales de la matière
2. Types de rayonnement
3. Principes de la fluorescence X
4. Analyseurs de fluorescence X
5. Sources d'erreur
6. Fonctionnement des analyseurs à fluorescence X
7. Applications de la fluorescence X
8. Interaction du rayonnement avec la matière
9. Effets biologiques du rayonnement
10. Détection du rayonnement
11. Pratiques sécuritaires du travail en fluorescence X
12. Normes Canadiennes applicables aux analyseurs FRX

La formation d'appoint officielle offerte aux fins du renouvellement ou de la recertification doit également satisfaire aux attentes relatives au contenu indiquées ci- dessus.

Notes :

**Dans le présent livret, certaines sections sont marquées « Exemples » et ont pour but d'aider le candidat ou l'opérateur d'analyseur FRX à mieux comprendre la matière.**

Certaines sections sont également désignées comme étant « **Recommandées pour le niveau 2** ». Le contenu de ces sections n'est exigé que pour la certification de niveau 2. L'examen de niveau 1 ne portera pas sur le contenu de ces sections.



## VI. THÉORIE

### 1. Propriétés fondamentales de la matière

#### 1.1 Atomes, éléments, molécules et composés

Notre monde physique est composé de matériaux fondamentaux appelés éléments.

**Élément** : Désigne une substance chimique fondamentale qu'on ne peut diviser en substance plus simple. (P. ex. l'hydrogène, l'oxygène, le sodium, le chlore, etc.)

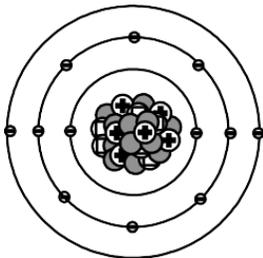


diagramme adjacent).

L'unité fondamentale de chaque élément est **l'atome**. Bien qu'il soit minuscule, tout atome possède l'ensemble des propriétés chimiques propres à un élément.

**Atome** : La plus petite portion de matière possédant toutes les propriétés chimiques d'un élément. Il est formé de deux parties (i) un noyau central, composé de protons, qui sont chargés positivement et de neutrons, qui n'ont pas de charge; et (ii) des électrons, qui sont des particules portant une charge négative qui tournent en orbite autour du noyau (tel qu'illustré dans le

Toutes les substances sont formées d'une combinaison d'atomes. Les atomes du même élément peuvent se combiner pour former des **molécules** du même élément. Ils peuvent aussi s'allier à différents éléments pour former des molécules d'une nouvelle substance.

**Molécule** : La plus petite particule d'une substance qui possède les propriétés physiques et chimiques qui lui sont propres. Une molécule est formée d'un ou plusieurs atomes, d'un ou plusieurs éléments.

**Exemple** : Les atomes d'hydrogène (H) ne se présentent pas un atome à la fois, mais se combinent avec un deuxième atome d'hydrogène pour former une **molécule** de gaz hydrogène :  $H_2$

**Exemple** : La plus petite particule d'eau ( $H_2O$ ) qui peut exister est une molécule composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.

**Composé** : Une substance pure, formée de deux ou plusieurs éléments qui sont liés chimiquement dans une proportion fixe et définie en masse.

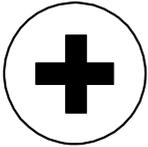
**Exemple** : Exemple : L'eau ( $H_2O$ ) est un composé formé par la liaison chimique de deux atomes de l'élément hydrogène (H) et d'un atome de l'élément oxygène (O). Ainsi,  $2H + O$  font  $H_2O$ .



## 1.2 Particules atomiques : propriétés des protons, électrons et neutrons

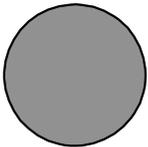
### Les composants de l'atome

De même que les corps sont formés d'atomes, les atomes sont composés de trois particules fondamentales appelées **protons**, **neutrons** et **électrons**. Ensemble, ces particules déterminent les propriétés, la charge électrique et la stabilité d'un atome.



#### Les protons :

- Ils se trouvent dans le noyau (le cœur) d'un atome.
- Ils portent une charge électrique positive.
- Leur nombre dans le noyau détermine l'identité de l'élément.
- Le nombre de protons dans le noyau s'appelle numéro atomique.



#### Les neutrons :

- Ils se trouvent dans le noyau de tout atome, excepté l'hydrogène (H).
- Ils ne portent pas de charge électrique.
- Leur masse est légèrement supérieure à celle d'un proton.

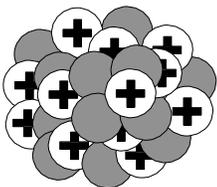


#### Les électrons :

- De même que les planètes tournent autour du soleil, les électrons tournent autour du noyau dans des orbitales précisément espacées que l'on appelle couche.
- Ils portent une charge électrique négative.
- Ils déterminent les propriétés chimiques d'un atome.
- Leur masse est minuscule, seulement 1/1840 fois celle d'un proton.

## 1.3 Structure atomique

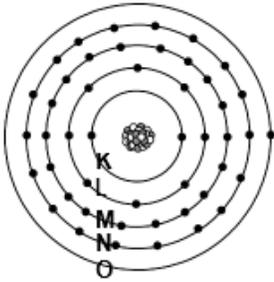
On peut diviser la structure d'un atome en deux parties principales : le **noyau** et les **couches électroniques** qui l'entourent.



#### Le noyau :

- Il est au centre de l'atome.
- Il est composé de protons et de neutrons.
- Il émet un champ électrique positif.
- Il porte presque toute la masse de l'atome.

Les protons et les neutrons d'un noyau sont très fortement liés par les forces nucléaires.



### Les couches électroniques :

- Elles encerclent le noyau d'un atome à des distances fixes équivalentes à des niveaux d'énergie discrets et distincts; les électrons des couches les plus internes ont plus d'énergie.
- Elles portent un nombre précis d'électrons.
- Elles produisent un champ électrique négatif.
- Elles régissent les réactions chimiques.

Les électrons (-) sont maintenus dans leur orbite par leur attraction électromagnétique avec les protons (+) du noyau. De même que les planètes orbitent autour du soleil, les électrons tournent autour du noyau dans des orbitales rigoureusement espacées, appelées couches.

La distance entre les couches est typique de chaque élément. L'énergie d'un électron varie en fonction inverse de sa distance du noyau. Les électrons dans la couche la plus interne (K) sont ceux les plus fortement liés au noyau. Ils ont, ainsi, plus d'énergie que les électrons des couches externes (L, M, N, O et P).

Chaque couche électronique peut porter un nombre maximal d'électrons :

Par exemple, la couche K a deux électrons, la couche L en a 8, la couche M en a 18, etc.

Chaque élément a un ensemble unique d'électrons orbitant dans des couches d'énergie différente.

L'unité d'énergie utilisée à l'échelle atomique est l'électronvolt (**eV**).

**1 eV** = l'énergie acquise par un électron traversant une différence de potentiel de 1 volt.

L'électronvolt est une petite unité d'énergie. C'est pourquoi on utilise souvent des unités plus grosses :

**1 keV** = un millier d'électronvolts

**1 MeV** = un million d'électronvolts

## 1.4 Le numéro atomique et le nombre de masse

Chaque atome d'un élément possède un nombre spécifique de protons dans son noyau. Ce nombre s'appelle numéro atomique et est dénoté par la lettre Z. Le **numéro atomique** peut être utilisé désigner précisément chaque élément.

**Numéro atomique (Z)** : Nombre de protons dans le noyau d'un atome.

**Nombre de masse (A)** : Somme du nombre de protons et de neutrons d'un noyau.

**Masse atomique** : Moyenne pondérée des nombres de masse des **isotopes** d'un même élément.

**Isotopes** : Se dit des atomes d'un élément ayant le même numéro atomique (donc les mêmes propriétés chimiques), mais dont le nombre de masse diffère (compte différent de neutrons dans le noyau).



## 2. Types de rayonnement

Le rayonnement est composé d'ondes invisibles ou de particules énergétiques qui peuvent affecter la santé humaine s'ils sont reçus en trop grande quantité. Il existe deux types distincts de rayonnement : les rayonnements **non ionisants** et **ionisants**.

### Ionisation :

- division, ou désintégration, d'une molécule en ses atomes constituants électriquement chargés (ions).
- enlèvement d'électrons d'un atome neutre.

Les **ions** portent une charge positive ou négative. Un atome qui perd des électrons s'appelle ion positif, tandis qu'un atome qui acquiert des électrons s'appelle ion négatif. Chimiquement, les ions sont très réactifs et essaient de redevenir neutres en se combinant avec des ions qui portent une charge opposée. Une réaction chimique se produit lorsque des ions de deux éléments se combinent pour former un nouveau composé.

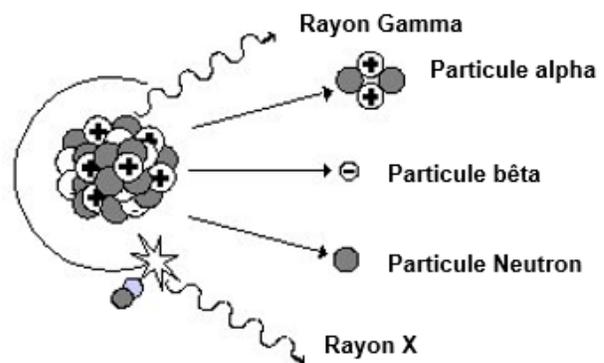
**Rayonnement non-ionisant** : Le rayonnement non-ionisant ne porte pas suffisamment d'énergie pour ioniser un atome, c'est-à-dire pour éjecter les électrons d'un atome neutre. Les ondes radio, les micro-ondes, la lumière sont des formes de rayonnement non-ionisant (voir le diagramme dans la section 2.1). Bien que ces rayonnements puissent causer des dommages biologiques, comme les brûlures, on pense qu'ils sont moins dangereux que le rayonnement ionisant.

**Rayonnement ionisant** : Le rayonnement ionisant porte assez d'énergie pour ioniser un atome (>4 eV).

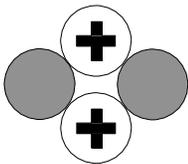
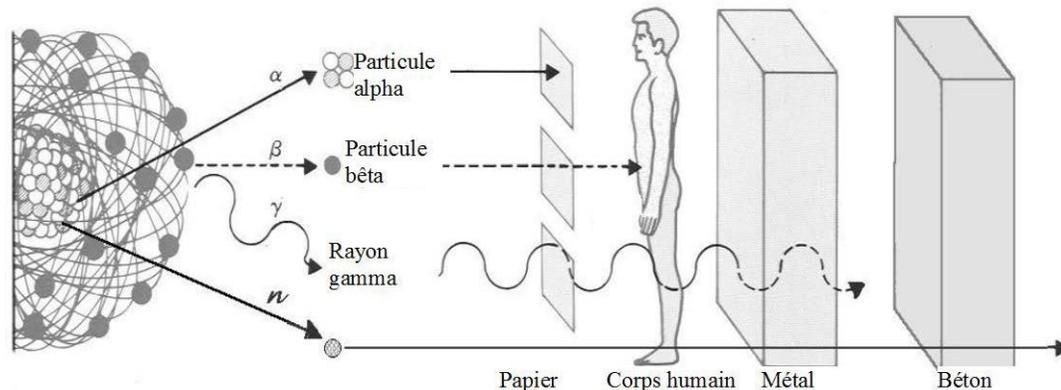
**Le rayonnement ionisant constitue un souci pour la santé puisqu'il peut modifier la structure chimique des cellules vivantes.** Or, ces changements chimiques peuvent nuire au fonctionnement normal des cellules. Une exposition suffisante au rayonnement ionisant peut provoquer la perte des cheveux, des changements dans le sang, différentes maladies, et la mort.

Il existe quatre types de rayonnement ionisant :

- les particules alpha,
- les particules bêta,
- les neutrons,
- les rayons gamma ou rayons X (analyseurs FRX)



Le pouvoir de pénétration des quatre types de rayonnement diffère énormément.



### Les particules alpha :

- Formées de deux protons et de deux neutrons, elles sont massives.
- Elles portent deux charges positives et sont émises par les noyaux de certaines matières radioactives.
- Elles ionisent la matière en arrachant des électrons (-) aux atomes.

Portée : Les particules alpha peuvent traverser entre un ou deux pouces d'air.

Blindage : Elles sont arrêtées par une feuille de papier ou par la couche superficielle de la peau.

Danger : Elles ne constituent pas un danger de rayonnement externe, mais elles sont très dangereuses si on ingère une source.



### Les particules bêta :

- Leur masse est minuscule et elles portent une charge négative (-), tout comme les électrons.
- Elles sont émises par les noyaux de certains atomes radioactifs.
- Elles ionisent d'autres atomes en éjectant des électrons (-) de leur orbite.

Portée : Les particules bêta peuvent traverser environ dix pieds d'air.

Blindage : Elles sont arrêtées par un blindage de quelques millimètres de plastique, de verre ou une feuille métallique.

Danger : À courte distance de leur source, elles posent un danger externe pour la peau et les yeux. Si une source est ingérée ou inhalée, le rayonnement bêta peut poser un danger aux tissus internes du corps.



### Les neutrons :

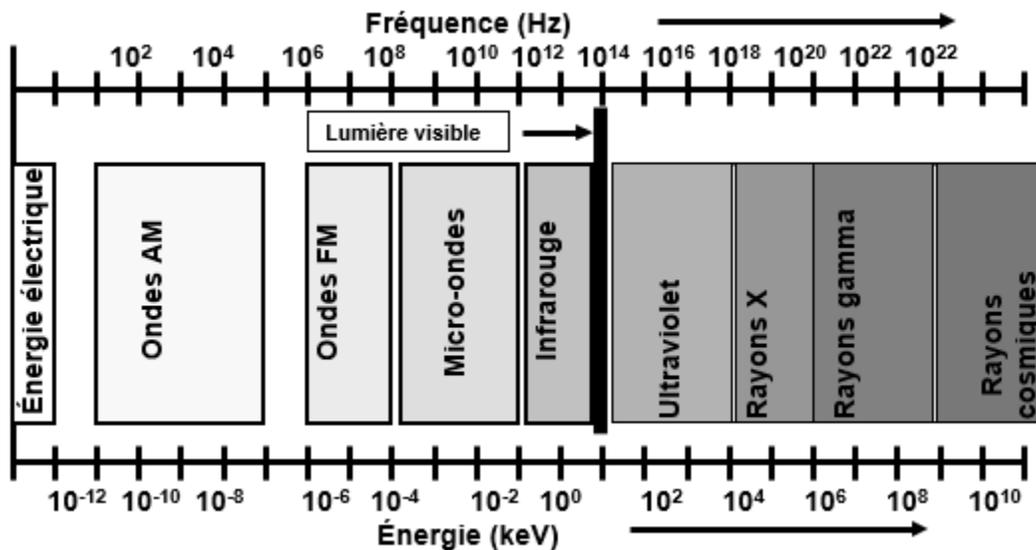
- Ils sont produits par la désintégration naturelle de certains éléments radioactifs, ainsi que dans les réacteurs nucléaires ou les accélérateurs de particules.
- Ils peuvent diviser les atomes par fission, ce qui produit deux atomes instables, ou plus, qui se désintégreront en produisant un rayonnement ionisant composé de particules alpha et bêta et de rayons gamma.
- Certains atomes peuvent absorber les neutrons (fusion), ce qui provoque la création d'un atome possiblement radioactif en fonction de l'élément de départ.



- Portée :** Les neutrons peuvent traverser plusieurs centaines de pieds d'air.
- Blindage :** Une barrière très épaisse de matériel de blindage est nécessaire pour arrêter ces particules très pénétrantes. Les meilleurs matériaux de blindage sont ceux riches en oxygène (l'eau, le béton ou le plastique).
- Danger :** Ils constituent principalement un danger externe, étant donné leur longue portée et leur pouvoir de pénétration.

## 2.1 Spectre électromagnétique

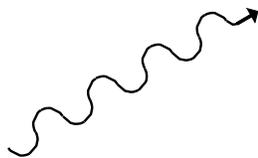
On désigne sous le terme de spectre électromagnétique l'ensemble de toutes les fréquences, et donc de toutes les énergies, de toutes les ondes électromagnétiques, du 60 Hz circulant dans les fils électriques jusqu'aux rayons cosmiques les plus énergétiques.



On se rappellera que **quatre électronvolts d'énergie sont nécessaires pour l'ionisation**. En voyageant de gauche à droite du graphique, on atteint cette quantité d'énergie dans la zone « ultraviolet ». Les rayons X et gamma sont donc ionisants.

## 2.2 Le rayonnement pénétrant : les rayons X et gamma

Les rayons X et gamma sont des ondes électromagnétiques, ou photons, de haute énergie; ils n'ont ni masse, ni charge électrique.



**Portée :** Puisque les rayons X et gamma ont beaucoup d'énergie et n'ont ni charge, ni masse, ils sont très pénétrants et peuvent parcourir de grandes distances.

- Les rayons émis par fluorescence ont peu d'énergie (~40 keV). Leur portée est d'environ trois mètres dans l'air.

**Rayon X ou gamma** **Blindage :** Les meilleurs matériaux de blindage contre les rayons X et gamma sont les substances denses comme le plomb, l'acier ou le béton.



**Il n'existe pas de différence observable entre les rayons X et gamma. La seule distinction fondamentale entre ces deux types de rayons est leur origine. Les rayons X sont produits par l'accélération d'électrons près des noyaux atomiques tandis que les rayons gamma proviennent de la désintégration radioactive de noyaux atomiques.**

## 2.3 Sources de rayons X

On distingue deux types de rayons X, selon leur source :

- **le bremsstrahlung au rayonnement de freinage** : spectre continu, source : accélération d'électrons
- **caractéristique** : raie d'émission, source : transition entre deux couches électroniques

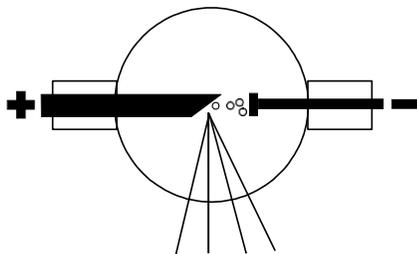
## 2.4 Rayons X du bremsstrahlung

« Bremsstrahlung » contient le mot allemand brems, qui signifie freinage. Ce terme a été créé pour décrire le rayonnement pénétrant (les rayons X), alors inconnu, émis par l'impact soudain d'électrons très rapides sur une cible de métal. Le bremsstrahlung, ou rayonnement de freinage, se produit dans des tubes à rayons X spécialement conçus ou dans toute substance bombardée par des électrons très rapides qui sont soudainement freinés ou qui changent de direction.

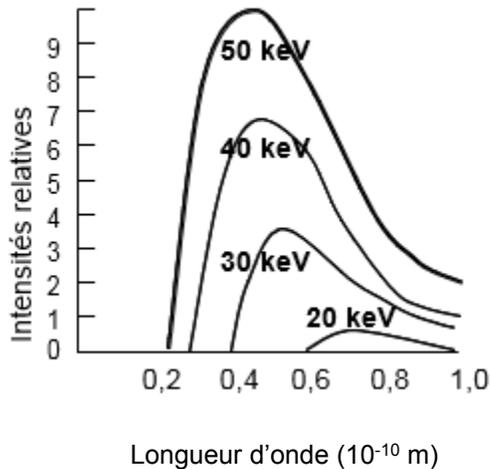
**Toute particule chargée émet un rayonnement électromagnétique lorsqu'elle est accélérée dans le champ d'un noyau.**

**Accélération : se dit de toute modification de la vitesse : augmentation, diminution ou changement de direction.**

## 2.5 Production des rayons X



Un tube industriel à rayons X moderne est formé d'une enveloppe céramique dans laquelle l'air a été évacué. Il se compose d'une anode et d'une cathode. Les électrons sont émis par un filament configuré dans une cathode. Lorsqu'une tension élevée est appliquée entre la borne de l'anode maintenue à un potentiel positif (+) et la borne de la cathode maintenue à un potentiel négatif (-), les électrons sont accélérés et entrent en collision avec une cible incorporée dans l'anode.



Ces électrons transfèrent la plus grande partie de leur énergie au matériau de la cible sous forme de chaleur (~ 97 %) et le reste de l'énergie est converti en rayons X tandis que les électrons décélèrent près des noyaux des atomes. C'est la décélération rapide des électrons qui produit le **bremsstrahlung** : **un spectre continu de rayons X**. Ces rayons X ont une gamme d'énergies dont la valeur maximale correspond à la tension maximale en kilovolts (kV) appliquée au tube à rayons X. La figure adjacente montre par exemple le spectre d'énergie des rayons X pour des tubes à rayons X qui fonctionneraient à 20, 30, 40 et 50 kV.

### Rayons X émis par le bombardement électronique à des tensions différentes d'une cible de tungstène

Pour garantir la production efficace de rayons X, la cible doit être un matériau de numéro atomique élevé. Le tungstène est souvent utilisé comme cible mais d'autres matériaux comme le chrome, l'argent et le molybdène sont également utilisés. L'anode doit être un bon conducteur thermique afin d'éliminer la chaleur produite par l'impact des électrons sur la cible. La chaleur peut être évacuée dans l'air, l'eau ou l'huile. Les tubes à rayons X comportent habituellement une fenêtre en béryllium permettant aux rayons X de faible énergie de s'échapper. Des filtres ajoutés sur la trajectoire du faisceau de rayons X modifient le spectre d'énergie des rayons X.

Un analyseur FRX qui fonctionne à 40 kV (milliers de volts) émet des rayons X ayant une gamme d'énergies pouvant atteindre 40 keV.

Le courant qui traverse un tube à rayons X détermine l'intensité du faisceau de rayons X : plus l'intensité du courant est élevée, plus il y a de rayons X produits. Les analyseurs FRX comportent habituellement des tubes à rayons X qui fonctionnent avec des intensités de courant pouvant atteindre quelques centaines de microampères.

Selon les paramètres de fonctionnement, l'intensité du rayonnement émis à la surface de la fenêtre d'un analyseur FRX peut atteindre 2 000 roentgens/heure.

Consultez le manuel de votre analyseur FRX ou le fabricant concernant les spécifications opérationnelles et l'intensité du rayonnement émis par l'analyseur FRX.

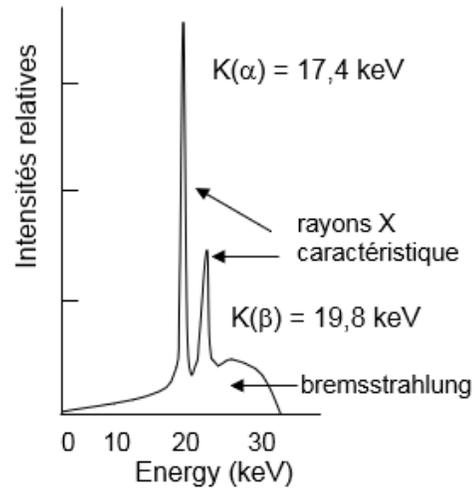
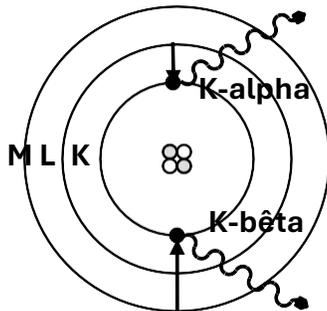


## 2.6 Rayons X caractéristiques

Le bombardement électronique de certains éléments produit, en plus du rayonnement de freinage, des raies d'émission dans les rayons X, dont les énergies sont propres à ces éléments.

On les appelle rayons caractéristiques.

**Rayons X caractéristiques** : raies d'émission dans les rayons X causées par la chute d'électrons d'une couche à une autre.



Rayons X émis par le bombardement d'une cible de molybdène par des électrons de 30 keV

Les électrons à grande vitesse et les rayons X émis par bremsstrahlung peuvent éjecter des électrons des couches intérieures des atomes. Les trous sont rapidement comblés par les électrons qui tombent des couches externes plus éloignées, tandis que les atomes tentent de retrouver leur stabilité. Ceci se traduit par l'émission de **rayons X caractéristiques** ayant des énergies discrètes, correspondant aux différences d'énergie entre les couches électroniques externes et internes de l'atome.

**L'émission des rayons X caractéristiques est la base de l'analyse par fluorescence X.**

En analyse par fluorescence X, la source importante de rayons X est le mouvement des électrons à l'intérieur même des atomes. La chute de l'électron d'une couche externe à une couche interne s'accompagne de l'émission d'un rayon X ayant une énergie précise. L'énergie du rayon X **caractéristique** est **équivalente** à la différence d'énergie entre deux couches électroniques.

Chaque élément présente des écarts différents entre les couches électroniques. En d'autres mots, le niveau d'énergie de chaque couche électronique et la différence d'énergie entre les couches diffèrent d'un élément à l'autre. C'est pourquoi on dit de ces rayons X qu'ils sont **caractéristiques de l'élément** qui les a émis.

### (Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 2)

On utilise une terminologie particulière pour décrire les rayons X émis par les transitions d'une couche électronique à l'autre, par exemple, K-alpha.

- La première lettre (K, L, M, N ou O) indique la couche d'arrivée de l'électron.
  - La seconde lettre (alpha [ $\alpha$ ] ou bêta [ $\beta$ ]) indique la couche d'où provient l'électron.
- $\alpha$  = la couche externe immédiatement supérieure,  $\beta$  = la deuxième couche externe.



K- $\alpha$  = chute de l'électron sur la couche K depuis la couche L  
 K- $\beta$  = chute de l'électron sur la couche K depuis la couche M  
 L- $\alpha$  = chute de l'électron sur la couche L depuis la couche M  
 L- $\beta$  = chute de l'électron sur la couche L depuis la couche N

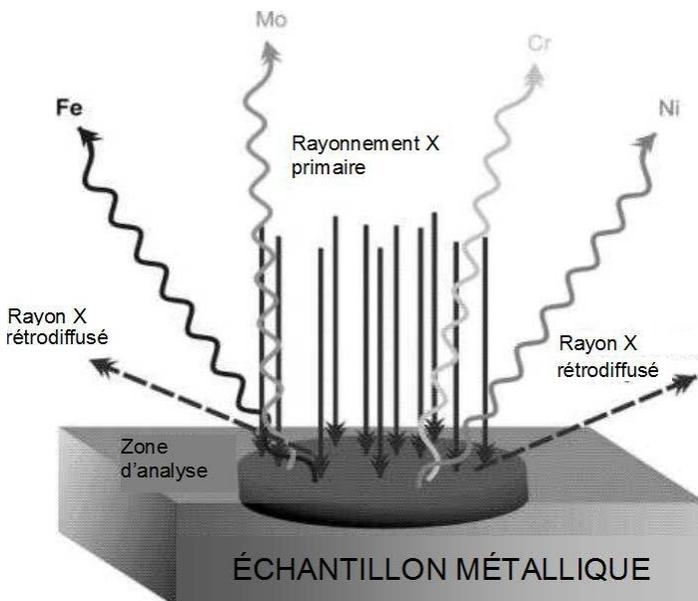
Par exemple, le tableau suivant illustre les énergies des rayons X caractéristiques émis par des éléments entrant dans la composition d'aciers courants.

<b>Exemple : Quelques matériaux et leur énergie caractéristique d'un rayon X (keV)</b>						
Élément	Symbole	Numéro atomique	K- $\alpha$	K- $\beta$	L- $\alpha$	L- $\beta$
Vanadium	V	23	4,95	5,43	0,51	0,52
Chrome	Cr	24	5,41	5,95	0,57	0,58
Manganèse	Mn	25	5,9	6,49	0,64	0,65
Fer	Fe	26	6,4	7,06	0,70	0,72
Cobalt	Co	27	6,93	7,65	0,78	0,79
Nickel	Ni	28	7,47	8,26	0,85	0,87

Chaque élément est caractérisé par les énergies différentes des deux raies caractéristiques émises par un électron tombant sur la couche K. Remarquez que pour un élément donné, on trouve une différence d'environ 500 eV entre les raies K- $\alpha$  et K- $\beta$ . Cependant, lorsque plusieurs de ces éléments sont présents dans un alliage, il peut être difficile de distinguer et d'identifier certaines raies peu espacées.

P. ex. la raie K- $\beta$  (5,95 keV) du chrome (Cr) et la raie K- $\alpha$  (5,9 keV) du manganèse (Mn).

### 3. Principes de la fluorescence X



Dans un analyseur FRX, les atomes de l'échantillon sont bombardés par des rayons X. Cela produit une avalanche d'électrons, de rayons X du bremsstrahlung et de rayons X caractéristiques, y compris des rayons X rétrodiffusés à partir de l'échantillon et du matériau sous-jacent. Ces rayons X rétrodiffusés peuvent poser un risque pour la santé.

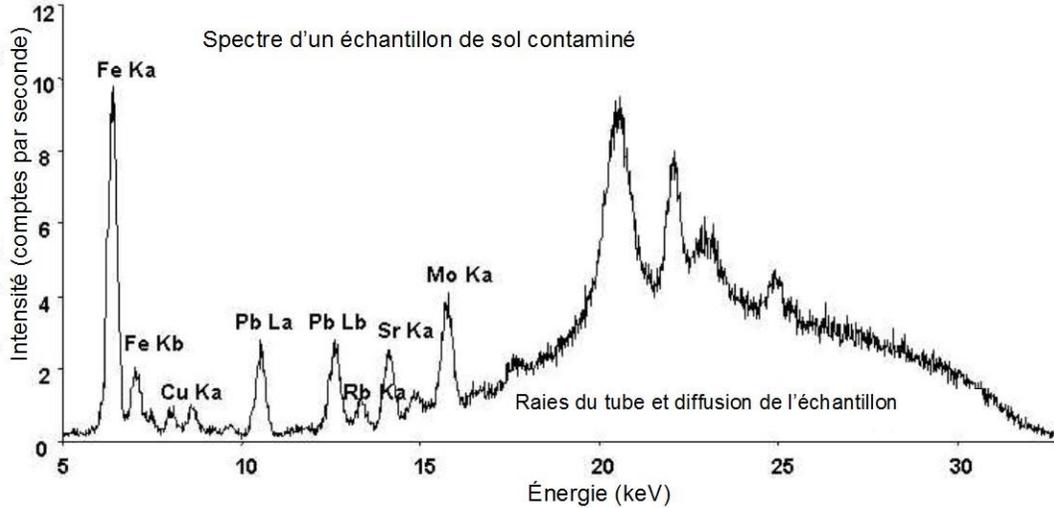
**[Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 3]**

Certains rayons X entrent en collision avec les électrons des couches K et L des spécimens d'atomes, ce qui provoque l'éjection des électrons de leurs orbites atomiques. Les trous créés dans la couche K (ou L) sont immédiatement remplis par les électrons

tombant des couches externes L, M ou N de l'atome touché. Chaque transition électronique émet un rayon X caractéristique (photon de fluorescence); ce rayon X a une énergie égale à la différence d'énergie entre deux couches de l'atome spécifique.



Puisque pour un même élément, toutes les couches électroniques ont les mêmes niveaux fixes d'énergie, chaque transition électronique identique se traduira par l'émission d'un rayon X ayant la même énergie discrète. Donc, lorsque des électrons sont éjectés d'atomes du même élément, les rayons X émis que l'on pourra détecter seront identiques. La quantité de rayons X émis par une transition vers la couche K ou la couche L sera proportionnelle au nombre d'atomes du ou des éléments présents dans l'échantillon.



La figure ci-dessus montre un spectre d'énergie typique en fluorescence X (intensité en fonction de l'énergie). Il reflète la concentration (intensité) des différents éléments détectés dans un échantillon de sol. Les rayons X caractéristiques de plusieurs éléments sont clairement visibles. Plus un pic est élevé, plus grande est la concentration de cet élément.

### 3.1 Énergies caractéristiques des rayons X émis par les éléments

Le tableau ci-dessous indique les rayons X caractéristiques de certains éléments.

Par exemple : Certains éléments et leurs énergies des rayons X caractéristiques en keV						
Élément	Symbole	Numéro atomique	Raie K-alpha	Raie K-bêta	Raie L-alpha	Raie L-bêta
Hydrogène	H	1	0	0	0	0
Carbone	C	6	0,282	0	0	0
Néon	Ne	10	0,851	0,86	0	0
Sodium	Na	11	1,04	1,07	0	0
Magnésium	Mg	12	1,25	1,30	0	0
Silicium	Si	14	1,74	1,83	0	0
Calcium	Ca	20	3,69	4,01	0,34	0
Cuivre	Cu	29	8,04	8,9	0,93	0,95
Zinc	Zn	30	8,63	9,57	1,01	1,03
Molybdène	Mo	42	17,48	19,63	2,29	2,4
Étain	Sb	50	25,27	28,5	3,44	3,66
Gadolinium	Gd	64	42,6	49,3	6,06	6,71
Tungstène	W	74	59,31	67,23	8,39	9,67
Bismuth	Bi	83	77,1	87,34	10,84	13,02
Uranium	U	92	98,43	111,29	13,61	17,22



On peut tirer du tableau plusieurs informations importantes :

- Les raies K contiennent beaucoup plus d'énergie (environ sept fois plus) que les raies L, pour un même élément.
- Plus le numéro atomique, Z, est élevé, plus les rayons X caractéristiques ont de l'énergie.
- **Il est difficile de détecter les éléments légers ( $Z < 14$ ) étant donné l'absorption des rayons X caractéristiques de faible énergie ( $< 2$  keV) dans l'air, qui fait en sorte qu'ils n'atteignent pas le détecteur de manière efficace.**

P. ex., on ne peut détecter le carbone avec des analyseurs FRX portatifs.

- Pour mesurer la concentration d'éléments lourds (92 Uranium), on utilisera les raies L et un tube à rayons X qui produit des rayons X de  $\sim 20$  à  $40$  keV.
- Un tube à rayons X qui produit des énergies de rayons X de  $20$  à  $40$  keV devrait globalement donner de bons résultats.

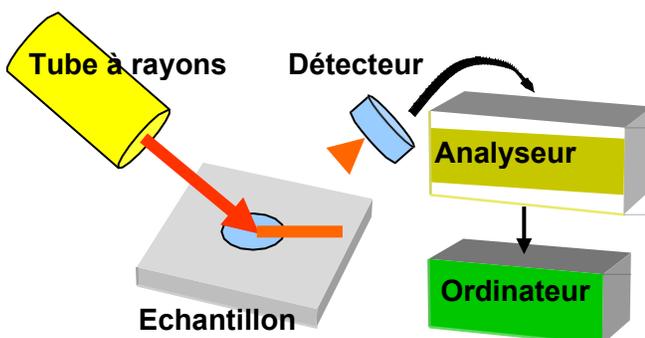
Un tube ne pourra produire de rayons X caractéristiques que si sa source d'énergie des rayons est supérieure à l'énergie des raies d'émission.  **$E(\text{tube}) > E(\text{atome})$**

#### Aperçu de la fluorescence X :

L'énergie de chaque raie de fluorescence X émise est caractéristique de l'élément qui a été excité. Ainsi, l'analyse des énergies des rayons X caractéristiques émis permet de déterminer quels éléments composent un échantillon. En outre, l'analyse de l'intensité des rayons X émis permet de déterminer la concentration relative de chaque élément. Lors de « l'analyse des alliages », on compare les résultats avec la composition connue de plusieurs alliages, ce qui permet d'obtenir une identification sans équivoque.

## 4. Analyseurs par fluorescence X (analyseurs FRX)

### 4.1 Constituants principaux



Un analyseur à fluorescence X est composé :

- d'un tube à rayons X miniaturisé;
- d'un détecteur à rayons X;
- d'un analyseur multi-canaux (MC);
- d'un ordinateur.

Les rayons X émis par le tube interagissent avec l'échantillon et produisent ainsi des rayons fluorescents caractéristiques des éléments présents. Les rayons X fluorescents tombent sur un détecteur qui les convertit les signaux en impulsions électriques. Un analyseur multi-canaux classe les impulsions

© 2025 Tous droits réservés par l'Organisme de certification national en essais non destructifs de Ressources naturelles Canada



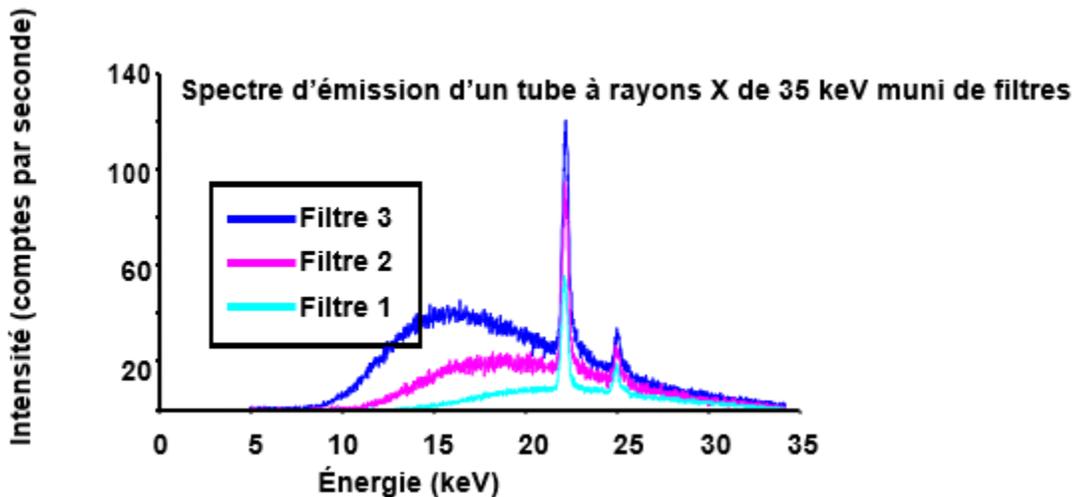
électriques dans un nombre fixe de canaux d'énergie « quantifiés » (numériques) et compte le nombre d'impulsions correspondant à chaque canal. À la sortie, on obtient un spectre d'énergie : des comptes par seconde, en fonction de l'énergie des photons en keV. Les données de l'analyseur multi-canaux passent à l'ordinateur qui corrige les données pour différents facteurs et calcule la composition chimique de l'échantillon à partir du spectre d'énergie « corrigé ».

## 4.2 Appareil à fluorescence X

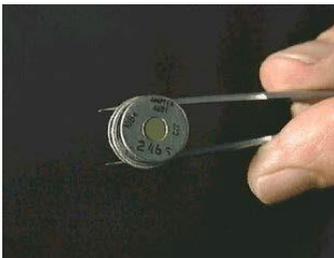


Un analyseur à fluorescence X portable contient un tube à rayons X miniaturisé, dont le diamètre est d'environ 20 mm, qui fonctionne à une tension entre 15 et 50 keV, avec un courant entre 2 et 200 micro-ampères. En dépit de sa petite taille, le tube à rayons X peut produire des rayonnements intenses (environ 2 000 R/h) à la fenêtre de sortie.

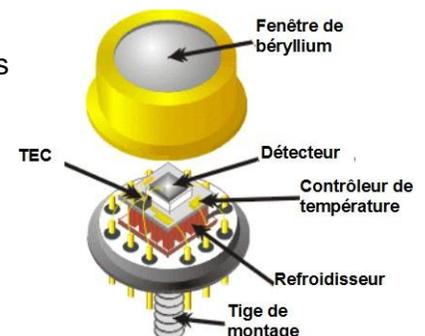
On peut placer différents filtres dans le faisceau primaire pour modifier le spectre d'émission, tel qu'illustré dans la prochaine figure.



## 4.3 Détection des rayons X



Les détecteurs de rayons X utilisés dans les analyseurs à fluorescence X portatifs sont miniaturisés : leur diamètre est d'environ 8 mm. Le détecteur est doté d'une fenêtre de béryllium ( $Z=4$ ), ce qui permet la transmission des rayons X de basse énergie, sans l'émission d'un rayon X caractéristique supplémentaire.



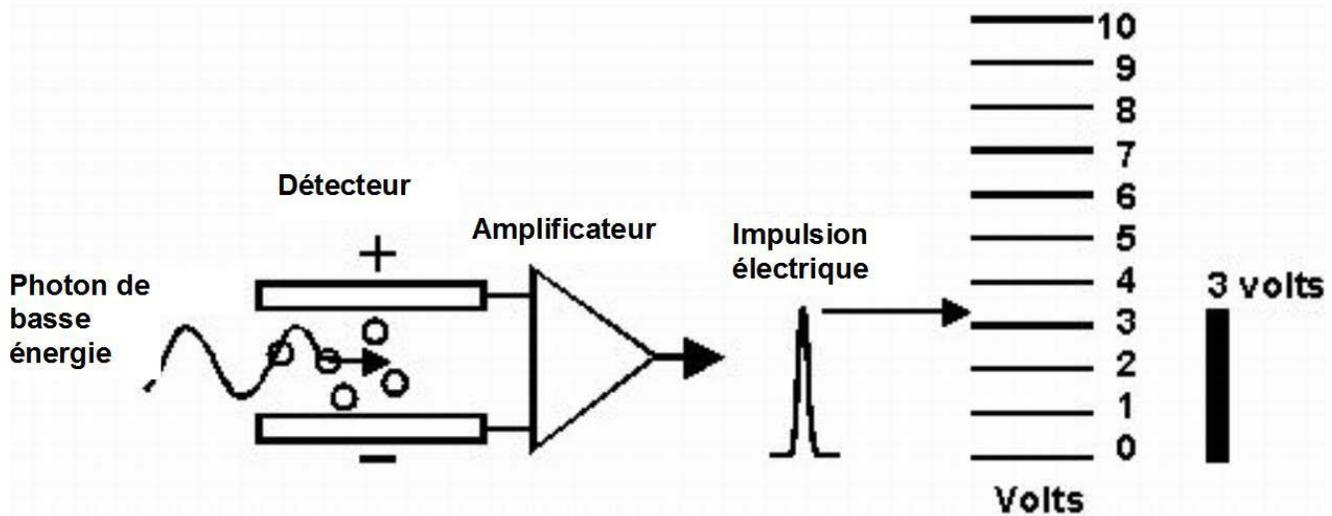
Pour réduire le bruit de fond électronique, ce détecteur à semi-conducteur est maintenu à basse température par un refroidisseur à effet Peltier.



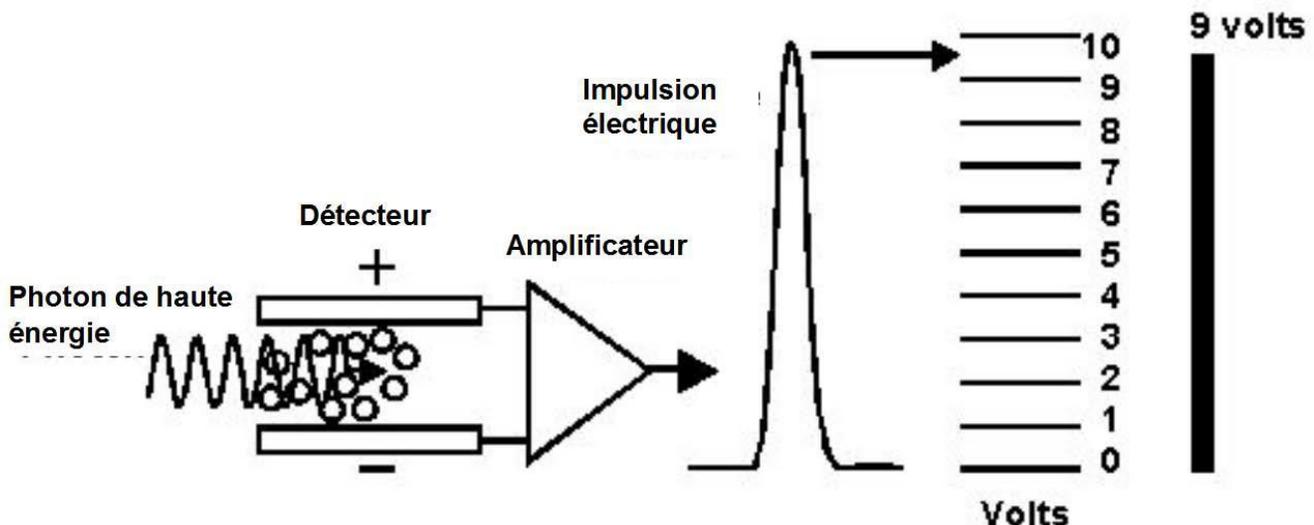
**(Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 4.3)**

La détection de rayons X comprend les étapes suivantes :

1. Conversion des photons X en charges électriques
2. Accumulation d'une charge totale et conversion en impulsion électrique
3. Amplification pour que la hauteur du pic en volts soit proportionnelle à l'énergie des rayons X.



Un photon X incident pénètre dans le détecteur et provoque la libération d'un certain nombre de charges électriques. À cause de la tension élevée appliquée sur le détecteur, ces charges se déplacent vers les côtés du détecteur et contribuent à créer une petite variation de tension électrique, laquelle est amplifiée et mesurée. Le photon X progresse, pénétrant plus loin dans le détecteur et libérant plus de charges jusqu'à ce qu'il ait perdu toute son énergie et soit finalement absorbé. Pendant ce processus, la tension de sortie du détecteur augmente d'une valeur près de 0, jusqu'à une valeur maximale, puis elle retourne très rapidement à sa valeur initiale, ce qui crée une impulsion électrique. Un photon de haute énergie libère plus de charges qu'un photon de moindre énergie et, donc, créera une impulsion électrique plus intense.





La hauteur de l'impulsion électrique est proportionnelle à l'énergie du photon X. Le détecteur émet une série d'impulsions dont la hauteur est proportionnelle à l'énergie des photons X incidents. Si l'on connaît les énergies des rayons X caractéristiques de chaque élément, on pourra utiliser la hauteur des impulsions pour découvrir quels éléments sont présents dans la substance analysée.

La détection est un processus statistique. Ainsi, la hauteur des impulsions produites par des photons de même énergie fluctue.

**Exemple :** On observe des impulsions de 9,7 et 19,5 volts. Ces impulsions correspondent à la raie K- $\alpha$  du zinc à 9,6 keV et à la raie K- $\alpha$  du molybdène à 19,6 keV.

Considérons maintenant un échantillon de zinc ne contenant pas de molybdène. Il est possible que deux photons de 9,7 keV émis par le zinc puissent tomber sur le détecteur au même moment. On obtiendra une impulsion unique dont la hauteur sera  $9,7 + 9,7 = 19,4$  volts. Ceci pourrait nous faire croire que l'échantillon contient du molybdène.

On notera qu'un détecteur reçoit des milliers de rayons X par seconde.

**La réponse du détecteur doit être rapide, afin de détecter chaque photon X.**

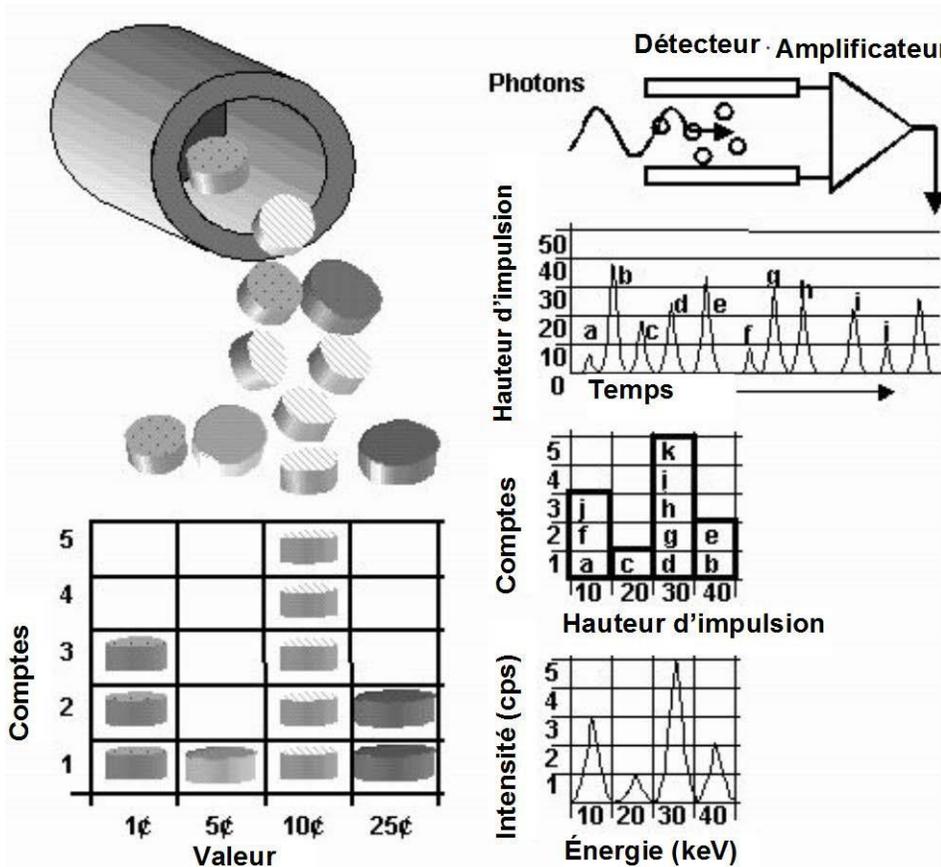
#### 4.4 Analyseur multi-canaux

En termes simples, un analyseur multi-canaux est un trieur électronique : il trie les rayons X caractéristiques en fonction de leur énergie. Cette information est ensuite traitée à l'aide d'un logiciel approprié et les données sont affichées sur l'écran de l'utilisateur (de sortie) de l'analyseur FRX.

##### **(Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 4.4)**

L'énergie des rayons X caractéristiques est déterminée par le processus de transfert d'une couche électronique à l'autre. Pour **identifier les éléments** présents dans une substance, on doit, pour l'analyse, enregistrer la **hauteur d'impulsion** de chaque photon X capté par le détecteur.

L'intensité d'un rayon caractéristique dépend du nombre de transitions électroniques identiques. Plus la concentration d'un élément est élevée, plus l'appareil captera de rayons X ayant la même énergie ou la même hauteur d'impulsion. Pour établir la **concentration des éléments** présents dans un échantillon, on doit compter l'incidence des impulsions de même hauteur, en vue de leur analyse.



Un analyseur multi-canaux trie et compte les impulsions électriques. Comme le montre la figure, ce processus ressemble à celui consistant à classer sa monnaie. Une personne prend une pièce, détermine sa valeur (elle trie) et place la pièce dans la case appropriée (1 ¢, 5 ¢, 10 ¢ ou 25 ¢). Elle augmente alors le compte de pièces de cette case de « un ». L'analyseur multi-canaux reçoit chaque impulsion électrique émise par le détecteur, détermine sa hauteur en volts (il trie), et augmente de « un » le compte dans la case correspondant à la valeur de tension. Ceci crée un tableau de comptes (en ordonnée) en fonction de la hauteur d'impulsion en volts (en abscisse).

**Le spectre des rayons X :** La hauteur des impulsions reflète l'énergie des photons X (keV). Les comptes reflètent l'intensité du rayonnement. Aux fins de comparaison des graphiques, on normalise les comptes en intervalle d'une seconde. Ainsi, l'ordonnée montre les comptes par seconde (cps).

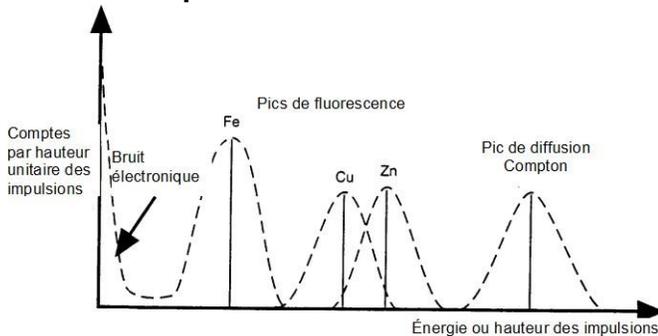
### Difficultés : le spectre d'énergie

En pratique, la production d'un spectre d'énergie des rayons X est compliquée par plusieurs facteurs :

- le bremmstrahlung du tube à rayons X et la diffusion d'électrons
- le fond de rayonnement de basse énergie produit par les éléments légers
- élargissement des impulsions dû au détecteur
- les variations statistiques de la hauteur des impulsions et du taux de comptage
- le chevauchement des impulsions produites par différents éléments
- les effets d'absorption de la matrice



## Résolution spectrale



À cause des aspects statistiques de la détection, la hauteur des impulsions fluctue aléatoirement de part et d'autre d'une valeur moyenne. Le détecteur transforme chaque raie d'émission étroite en une impulsion électrique en forme de cloche, large d'environ 200 eV.

Le **chevauchement spectral** se produit lorsque deux pics ne sont pas complètement résolus – difficulté caractéristique des éléments dont le numéro atomique est voisin, comme le Cu et le Zn.

Les deux impulsions d'énergie se chevauchent et forment deux bosses plutôt que deux raies clairement séparées. Puisque l'analyseur brise le spectre d'énergie en une série fixe de cases (1024, 2048, etc.), il distribuera les deux bosses dans un certain nombre de cases, plutôt que seulement deux. La résolution d'un système d'analyse FRX est donc limitée. Elle dépend également de l'énergie des photons incidents.

## 4.5 Ordinateur

L'ordinateur est une partie intégrante d'un analyseur FRX. Il remplit plusieurs fonctions :

- la commande du tube à rayons X, du détecteur et de l'analyseur multi-canaux
- le calcul du spectre d'énergie et des corrections à lui appliquer
- l'affichage des informations relatives à la composition chimique de l'échantillon
- l'identification d'un alliage en comparant le spectre d'énergie de l'échantillon à une bibliothèque de spectre

### Élimination de l'interférence spectrale provenant du fond et des chevauchements (Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 4.5)

Une fois que l'analyseur multi-canaux aura accumulé le spectre d'énergie, l'appareil commence à supprimer mathématiquement le fond et le chevauchement des pics.

Le fond est constitué de la diffusion des rayons gamma et X et de la queue de la courbe de chaque impulsion. L'interférence que le fond cause provient d'un processus imparfait de détection des photons et est proportionnelle à la hauteur du pic produit.

Les calculs du chevauchement spectral sont effectués pendant l'étalonnage de l'instrument, à partir du spectre d'étalons de référence (matériaux étalons ou étalons appropriés pour un site donné).

### Calcul des concentrations

Une fois que l'on a obtenu les intensités nettes des rayons X, on peut les convertir en concentrations élémentaires. Cette étape est réalisée grâce à un procédé mathématique – un algorithme – qui utilise des coefficients empiriques et des régressions multi-paramétrées linéaires ou polynomiales.

On étalonne l'appareil en mesurant plusieurs étalons contenant des concentrations exactes et précisément connues d'un élément. Le micro-processeur de l'analyseur calcule, pour chaque élément, le facteur de correction.



### **Relation entre l'intensité et la concentration**

La concentration (C) des éléments d'un échantillon est directement proportionnelle à l'intensité [I] des rayons X (en comptes par seconde) du spectre.

$$I = N/t = k \times I_0 \times C$$

Où :

I = intensité des rayons X (comptes par seconde)

N = compte net (une fois supprimés le fond et les chevauchements)

t = temps d'observation (secondes)

k = constante (dépendant de la géométrie du détecteur et de l'échantillon, de la section efficace et de la matrice)

I<sub>0</sub> = Intensité originale des rayons X

C = proportion en masse d'un élément dans le mélange

### **Coefficient d'absorption de la matrice**

La présence d'un élément dont le coefficient d'absorption des rayons X est nettement supérieur (ou inférieur) à celui du reste de l'échantillon peut modifier l'intensité apparente des rayons X émis par un élément cible – même pour une concentration (C) identique de l'élément cible. Ce phénomène peut être la cause d'une erreur dans l'estimation de la concentration de l'élément cible.

### **Étalonnage**

Cette opération a pour but d'étalonner l'échelle des énergies des éléments.

- Les analyseurs FRX sont étalonnés en usine
- L'utilisateur peut également étalonner l'appareil s'il reproduit les conditions d'étalonnage en usine
- Certains analyseurs sont dotés d'un étalon interne permettant de maintenir ou de vérifier les valeurs de l'étalonnage en usine
  - L'étalonnage de toute l'échelle d'énergie est automatisé
  - Étant donnée la stabilité de l'électronique et du détecteur, les valeurs d'étalonnage sont correctes pendant des jours, voir des semaines.
- On peut utiliser « l'échantillon de contrôle » fournit par le fabricant, pour vérifier la précision de l'étalonnage ou des résultats.

## **5. Sources d'erreur**

---

### **5.1 Erreurs systématiques et aléatoires**

On peut classer les erreurs en erreurs systématiques et erreurs aléatoires.

#### **Erreurs systématiques (biais)**

Les erreurs systématiques proviennent d'un biais du système de mesure : les résultats sont invariablement trop élevés ou trop bas. On peut réduire les erreurs systématiques par l'étalonnage et le respect de procédures précises.



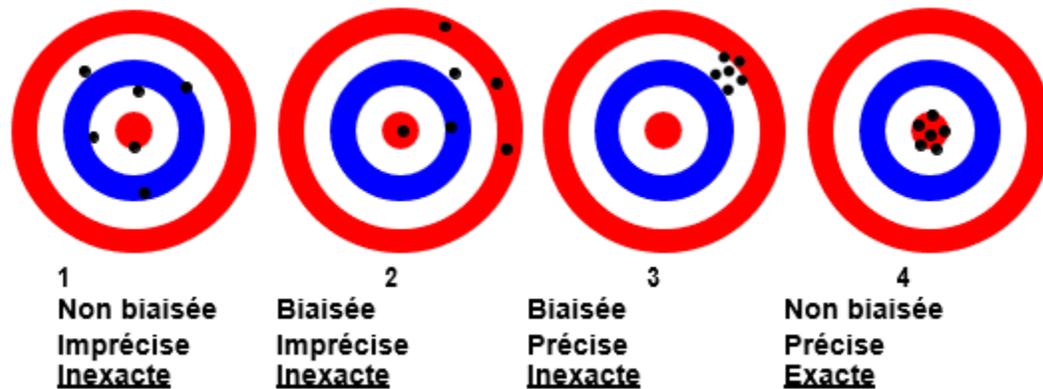
## Erreurs aléatoires (imprécision)

Les erreurs aléatoires proviennent de l'incertitude (l'imprécision) d'un appareil de mesure : les résultats diffèrent de la valeur vraie de façon aléatoire et sont statistiquement trop élevés ou trop bas. On peut réduire les erreurs aléatoires en prenant la moyenne des résultats de mesures répétées.

## 5.2 Exactitude, précision et biais

**Pour être exacte, une mesure doit être non biaisée et précise.**

Il est facile de confondre précision, exactitude et biais. La figure ci-dessous aide à comprendre la relation entre ces mots.



### Biais

Le biais provient d'erreurs systématiques comme une variation de la tension apparue après l'étalonnage ou utilisation de mauvaises constantes d'étalonnage, ce qui introduit une erreur systématique dans chaque mesure. On peut réduire le biais par un nouvel étalonnage et en suivant avec soin les procédures prescrites pour les mesures.

**Exemple :** Dans la figure, sur les cibles numéros 2 et 3, on peut voir un biais vers le haut et vers la droite. On peut le compenser en utilisant un facteur de correction vers le bas et la gauche.

### Précision

La précision est une mesure de la cohérence interne d'un groupe de mesures (la proximité mutuelle de chacune des mesures).

**Exemple :** Dans la figure, la cible numéro 3 montre des valeurs qui sont précises (en accord l'une avec l'autre), mais qui ne sont pas exactes (elles sont éloignées de la valeur vraie).



En fluorescence X, la précision dépend de facteurs aléatoires tels que :

1. la nature statistique du procédé d'émission de rayons X dans le tube,
2. la nature statistique du processus d'absorption et d'émission des rayons X par l'échantillon,
3. la nature statistique du processus de détection,
4. les variations imprévisibles provenant du substrat ou de la matrice.

Les effets d'un à trois décrits plus haut proviennent des aspects aléatoires de la fluorescence X : les atomes de l'échantillon sont excités au hasard. Le détecteur traite des milliers de comptes par seconde. Or, les mesures sont ordinairement prises pendant plusieurs secondes. Puisque l'on dispose de beaucoup de données, on peut utiliser les statistiques. Ainsi, la précision s'accroît proportionnellement à la racine carrée,  $\sqrt{N}$ , du nombre (N), de mesures.

- un nombre 4 fois supérieur de mesures donne grande  $\sqrt{4}$  = une précision 2 fois plus
- un nombre 100 fois plus élevé de mesures donne plus grande  $\sqrt{100}$  = une précision 10 fois grande
- un nombre 10 000 fois plus élevé de mesures donne plus grande  $\sqrt{10000}$  = une précision 100 grande

En fluorescence X, l'augmentation du nombre de comptes diminue l'incertitude du résultat. On peut donc augmenter la précision en allongeant le temps de mesure.

#### Application pratique

Dans l'acier inoxydable, il peut être difficile de détecter de faibles concentrations de manganèse (Mn) et l'on pourrait ne pas le déceler dans une observation trop courte. En revanche, le molybdène (Mo) donne de bons résultats, même pour une observation courte.

## Exactitude

L'exactitude est une mesure de la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie.

**L'erreur (E) = valeur mesurée (M) – valeur vraie (V)**

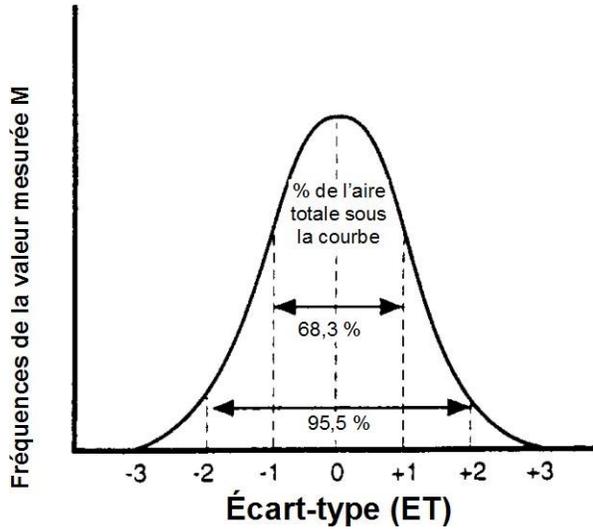
La valeur vraie (V) ne peut jamais être connue avec une certitude absolue. En situation réelle, la meilleure approximation de la valeur vraie est la moyenne arithmétique (**la précision**  $\propto \sqrt{N}$ ) d'un nombre de mesures, dont les erreurs systématiques (biais) ont été supprimées ou réduites à une valeur négligeable.

La précision des mesures en fluorescence X est influencée par des facteurs tels que :

- la qualité des étalons utilisés lors de l'étalonnage;
- la procédure d'étalonnage;
- la durée de la mesure.

**L'écart-type (ET ou  $\sigma$ ) (*Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 5.2*)**

On utilise souvent l'écart-type (ET) pour désigner l'erreur aléatoire de mesures répétées. On désigne la valeur d'un écart-type par la lettre sigma ( $\sigma$ ). Il est donc important que les opérateurs d'appareils à fluorescence X comprennent cette notion.



Quel que soit le processus, des mesures répétées d'une quantité  $x$  produiront une gamme de valeurs observées. Si nous traçons le nombre de fois qu'une valeur mesurée apparaît, à l'ordonnée, en fonction des valeurs mesurées (en abscisse), nous obtiendrons une courbe en forme de cloche (une gaussienne), centrée sur la valeur moyenne  $\bar{x}$ .

Pour indiquer l'erreur, nous utilisons l'amplitude de la déviation des valeurs mesurées autour de la valeur moyenne : l'écart-type.

### Référence

$$\text{Écart-type, } \sigma = \sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 / (N - 1)}$$

$\sqrt{\quad}$  = opérateur de racine carrée

$\Sigma$  = opérateur de la sommation

$\bar{x}$  = moyenne de «  $i$  » mesures =

$\Sigma x_i / N$   $x_i - \bar{x}$  = déviation de la  $i^{\text{e}}$  valeur de  $x$  autour de la moyenne  $\bar{x}$

$N$  = nombre de mesures

Écart-type relatif ETR (%)

$$\text{ETR (\%)} = (\sigma / \bar{x}) \times 100$$

#### La règle « 68,3 – 95,5 – 99,7 »

- 68,3 % sont en-deçà de  $\pm 1\sigma$  de  $\bar{x}$
- 95,5 % sont en-deçà de  $\pm 2\sigma$  de  $\bar{x}$
- 99,7 % sont en-deçà de  $\pm 3\sigma$  de  $\bar{x}$

Exemple :

Soit une concentration de nickel dans un échantillon de  $2,5 \pm 0,2$  :

$\sigma = 0,2$ , donc :

68,3 % des valeurs sont entre 2,3 et 2,7.

95,5 % des valeurs sont entre 2,1 et 2,9.

99,7 % des valeurs sont entre 1,9 et 3,1.

### Limite de détection (LD)

La limite de détection est la concentration minimale à laquelle on peut détecter, au-dessus du fond, la présence d'un élément dans un échantillon.

$LD = 3 \sigma$ , tel que mesuré sur un échantillon d'essai.

### Limite de quantification (LQ)

La limite de quantification est la concentration minimale à laquelle on peut quantifier la concentration d'un élément dans un échantillon.

$LQ = 10 \sigma$ , mesuré sur un étalon d'essai.



### Exemple de ETR, LD et LQ

Soit une concentration mesurée de plomb dans un échantillon de 104 ppm avec un écart-type de 10 ppm.

Nous trouvons :

La moyenne  $\bar{x} = 104$  ppm,  $\sigma = 10$  ppm,  $ETR (\%) = \sigma / \bar{x} \times 100 = 9,6 \%$

$LD = 3\sigma = 3 \times 10$  ppm = 30 ppm

(La concentration de plomb d'un échantillon doit être d'au moins 30 ppm, ou  $30/104 \times 100 = 29 \%$ , pour être détectée.)

$LQ = 10 \sigma = 10 \times 10$  ppm = 100 ppm (La concentration de plomb d'un échantillon doit être d'au moins 100 ppm, ou  $100/104 \times 100 = 96 \%$ , pour être quantifiée.)

## 6. Fonctionnement de l'analyseur à fluorescence X

### 6.1 Utilisation de l'analyseur à fluorescence X – Généralités

Les fabricants offrent généralement les analyseurs FRX complètement étalonnés. On peut donc les utiliser pour le travail de routine, sans préparation importante. Toutefois, la précision de l'étalonnage est d'une importance vitale. Il est donc sage de vérifier l'étalonnage sur des étalons ou sur des échantillons de contrôle avant de commencer l'analyse. Un opérateur peut améliorer l'exactitude des résultats en maintenant la sonde sur un échantillon représentatif propre tout au long de la mesure.

Une des principales sources d'erreurs de la plupart des analyses provient des statistiques de comptage. Allonger la mesure de l'échantillon pourrait permettre d'atteindre la précision nécessaire à l'identification de plus d'éléments dans l'échantillon.

Un analyseur FRX fonctionne grâce à un programme de commande qui permet à l'utilisateur de :

1. choisir le mode de fonctionnement;
2. prendre des mesures;
3. visionner le spectre;
4. conserver les résultats ou les spectres.

Pour prendre une mesure, placez le bec de l'analyseur sur l'échantillon et appuyez sur le déclencheur. Assurez-vous que le détecteur de proximité qui se trouve sur le bec de l'instrument est activé, sinon le mesurage ne commencera pas. Un voyant lumineux indique que le tube produit des rayons X.

**Assurez-vous que le bec de l'analyseur touche à l'échantillon pendant toute la durée de la mesure.**

**L'analyseur FRX doit être utilisé selon les instructions du fabricant. Assurez-vous de suivre des procédures de fonctionnement sécuritaires pendant les mesures.**



## 6.2 Avantages des analyseurs à fluorescence X portatifs

Voici quelques-uns des avantages de l'utilisation d'un analyseur FRX portatif dans une méthode d'END :

- C'est un essai tout à fait non destructif.
- On obtient des résultats rapidement.
- On peut transporter facilement l'appareil sur les lieux de travail.
- Très peu de réglage et d'étalonnage est nécessaire.
- On obtient une analyse qualitative et quantitative de plusieurs éléments. Les applications sont nombreuses :
  - Analyse chimique et détermination de la composition des alliages,
  - Analyse des sols,
  - Analyse des minéraux.

## 6.3 Limites typiques des analyseurs à fluorescence X portatifs

Cette méthode d'essai présente plusieurs limites. L'utilisateur devrait consulter le manuel de l'appareil ou communiquer avec le fabricant.

- Il est très difficile de détecter des éléments dont le numéro atomique est inférieur à 12 ( $Z = 12$ , le magnésium, Mg).  
P. ex. le lithium (Li), le béryllium (Be), le bore (B) et le carbone (C).
- La limite minimale de détection est de quelques parties par million (ppm).
- La fluorescence X est une technique d'analyse matérielle de la surface et des régions près de la surface.
- L'analyseur ne peut mesurer que la portion de l'échantillon placée directement devant sa fenêtre.
- L'analyseur mesure tous les matériaux placés devant sa fenêtre.
- Beaucoup d'aciers ordinaires peuvent être difficiles à identifier.

## 6.4 Éléments habituels des analyseurs

***(Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 6)***

### 1 – Bibliothèques (pour l'analyse des alliages)

On trouve en mémoire une ou plusieurs bibliothèques ou un ou plusieurs tableaux de référence, notamment :

- La bibliothèque fournie par le fabricant de l'appareil : tous les éléments ou les alliages communs de Fe, Ni, Co, Ti et Cu
  - p. ex. une bibliothèque peut contenir des informations sur plusieurs centaines de nuances d'alliage,
  - l'utilisateur peut ajouter, supprimer, renommer ou modifier la bibliothèque d'information sur les alliages de l'appareil du fabricant.
- Bibliothèque de l'utilisateur. L'opérateur peut produire une bibliothèque pour son propre usage (ou plusieurs bibliothèques)
  - p. ex. l'utilisateur pourra charger seulement l'information pertinente aux alliages utilisés dans le projet en cours.



## 2 – Paramètres instrumentaux et étalonnage

La mémoire contient, à l'insu de l'utilisateur, les facteurs propres à l'instrument, les références d'étalonnage et les algorithmes de correction pour :

- les sections efficaces d'excitation des éléments
- les corrections dues à la géométrie du tube et du détecteur
- les effets de matrice
- la variation de la tension du tube et l'utilisation de filtres à rayons X

## 3 - Affichages

Les analyseurs portatifs peuvent être munis d'un écran sur lequel peuvent apparaître :

- les résultats de l'analyse chimique (concentration de chaque élément) et l'identification de la nuance,
- un graphique du spectre d'énergie – les CPS de chaque raie de l'échantillon,
- des détails sur la bibliothèque utilisée, le mode d'utilisation, etc.

## 4 - Connexions externes

Les analyseurs portatifs peuvent être dotés de logiciels et de matériel permettant :

- la consignment des données – le stockage de milliers de mesures sur un support amovible,
- l'exportation de données de l'analyseur FRX à un ordinateur externe; p. ex. dans un chiffrier,
- l'importation de données d'un ordinateur externe à l'analyseur FRX; p. ex. des bibliothèques, des facteurs.

## 6.5 Modes d'essai

La plupart des appareils d'analyse à fluorescence X sont dotés de divers modes d'analyse. Leur nom varie d'un fabricant à l'autre. Ils peuvent désigner la fonction du mode (analyse du sol, d'alliages, etc.) ou la méthode d'étalonnage. Vous trouverez plus d'information sur les modes disponibles dans votre manuel d'utilisation.

Parmi les méthodes d'analyse courante, on trouve :

1. paramètres fondamentaux - échantillons de minerais et alliages
2. normalisation Compton - échantillon de sol
3. comparaison des spectres - analyse des alliages
4. empirique - comparaison précise de matrices

### Paramètres fondamentaux

L'étalonnage des paramètres fondamentaux s'effectue sans étalon. On utilise la physique connue de la réponse du spectromètre à des éléments purs pour établir l'étalonnage de façon théorique. On utilise les algorithmes mathématiques de l'appareil pour corriger les effets de matrice. Le fabricant effectue l'étalonnage des paramètres fondamentaux, mais l'opérateur peut être capable d'ajuster les courbes de calibration (pente et ordonnée à l'origine), à partir des résultats d'analyses d'échantillons de contrôle.

**Le mode paramètres fondamentaux est normalement utilisé pour l'analyse d'échantillons miniers et d'alliages.** Les logiciels d'analyse d'alliages comportent souvent une bibliothèque de nuances d'alliages, contenant une collection des concentrations minimales et maximales propres à chaque nuance. Après les calculs de concentration chimique, le logiciel fouille la bibliothèque pour découvrir la nuance la plus proche des concentrations chimiques calculées.



La méthode des paramètres fondamentaux est bien adaptée aux utilisations qui exigent l'analyse d'alliages brevetés ou inconnus, pour exercer une surveillance chimique d'éléments traces ou pour contrôler les compositions chimiques pendant un procédé. La méthode des paramètres fondamentaux est idéale pour obtenir la composition moyenne des tournures, notamment de tournures mélangées. (Tournures : (n.f.), fragments métalliques détachés par l'outil d'un tour.)

## Normalisation Compton

La matrice de l'échantillon affecte la diffusion du rayonnement. La diffusion de Compton (section 8.2) est proportionnelle à la teneur totale en éléments légers de l'échantillon et dépend directement de l'intensité du pic de Compton. L'étalonnage par normalisation Compton consiste à analyser un étalon unique, bien caractérisé, de façon à enregistrer l'intensité du pic de Compton. Lorsqu'on utilise l'analyseur, les pics de Compton dans les spectres des échantillons sont normalisés à un pic de Compton « étalon ». Cette méthode réduit les problèmes associés aux effets de matrice, lesquels varient d'un échantillon à l'autre.

La normalisation Compton est analogue à l'utilisation d'étalons internes pour l'analyse de substances organiques. **La normalisation Compton est surtout utilisée pour les échantillons de sol (à faible concentration).**

## Comparaison de spectres

Dans le mode de comparaison de spectres, l'analyseur compare le spectre observé d'un échantillon à ceux conservés dans sa mémoire. Le plus similaire est affiché, accompagné d'un nombre quantifiant la corrélation entre les deux spectres. P. ex : acier inoxydable, AI 316, 98 %

**On utilise la comparaison des spectres surtout pour l'analyse des alliages.** Cette méthode permet de comparer rapidement (en trois secondes) un échantillon aux spectres d'alliages connus conservés dans la mémoire de l'analyseur. Les analyseurs peuvent être dotés de bibliothèques de spectres installées en usine. En fonction de ses besoins, l'opérateur peut également créer sa bibliothèque, en testant des alliages connus et en conservant leur spectre.

La comparaison des spectres permet, également, d'obtenir des informations chimiques précises, si l'on a conservé des informations sur des échantillons dosés. On peut extrapoler la composition chimique, à partir d'une seule valeur mémorisée pour un alliage, ou en interpolant entre des échantillons de référence ne différant pas beaucoup en composition.

## Étalonnage empirique

La méthode d'étalonnage empirique repose sur une série d'étalons permettant de calculer les paramètres d'étalonnage. On mesure la réponse de l'instrument à des échantillons étalons et l'on crée, à partir de ceux-ci, des courbes d'étalonnage. Cette méthode est efficace, si l'on utilise des échantillons étalons dont la composition s'approche de celle de la matrice des échantillons analysés. Les étalons devraient contenir tous les éléments intéressants et interférents. Le fabricant pourra mettre en mémoire les échantillons d'étalonnage empirique, et certains analyseurs permettent à leur utilisateur de créer leurs propres courbes d'étalonnage. **L'étalonnage empirique peut être utilisé pour tous les types d'échantillons, à la condition de disposer de suffisamment d'étalons.**

Note : Les fabricants d'analyseurs FRX portatifs offrent un assortiment de méthodes analytiques qui peuvent combiner certaines des méthodes décrites plus haut. Vous trouverez plus d'information sur les modes disponibles dans votre manuel d'utilisation.



## 7. Applications de la fluorescence X

---

Les trois utilisations principales des analyseurs à fluorescence X portatifs sont :

- l'identification et l'analyse chimique des alliages,
- l'analyse des sols,
- l'analyse des minéraux.

### 7.1 Identification et analyse chimique des alliages

L'utilisation la plus courante des analyseurs FRX portatifs consiste à identifier des alliages et à effectuer l'analyse chimique des éléments constitutifs des échantillons.

**Pour savoir comment exécuter des tâches précises, consulter le manuel de l'appareil ou le fabricant, sinon les deux.**

#### Considérations sur les échantillons d'alliages

##### *Préparation d'échantillon - Généralités*

La surface de l'échantillon devrait être libre de poussière, de corrosion, d'huile etc. Puisque l'analyse est faite en surface, celle-ci doit être représentative de tout l'échantillon. Si la surface d'un échantillon est plane et propre (sans rouille, huile, poussière, etc.), il n'est pas nécessaire de le préparer. Si elle est sale, on doit la nettoyer. L'effet le plus important de la contamination de la surface est sur l'analyse des éléments légers (Ti, V, Cr). On débarrasse la surface de la poussière et de l'huile qui s'y trouvent en l'essuyant avec un linge. La rouille, la peinture et les revêtements doivent être enlevés en polissant la surface.

##### *Alliages – Réduction des erreurs*

Les erreurs de mesure déterminent la limite de détection des éléments présents dans l'échantillon.

- L'analyseur ne « voit » que la surface de l'échantillon placée directement devant sa fenêtre. Si, dans les particules en surface, la concentration d'un élément donné est supérieure ou inférieure, l'analyseur donnera le résultat correspondant.
  - Nettoyez ou enlevez de la surface toute poussière métallique, trace de corrosion, couche d'oxyde (rouille, oxyde d'aluminium, couche anodisée, par meulage), revêtement (peinture) ou pellicule (plastique, huile, etc.)
  - Le nettoyage par grenailage peut laisser des résidus des billes sur la surface ou dans celle-ci.
  - Tout plaquage métallique sur la surface masquera la composition du substrat.
- Les mesures peuvent être affectées par la présence d'autres éléments dans l'échantillon (matrice).
- Les lectures d'échantillons non-homogènes ne sont représentatives que de la portion analysée.
- Soyez conscient de la présence de vide entre les pièces d'échantillons ou d'un relief grossier.
- Si un échantillon est trop petit (s'il ne couvre pas la fenêtre), essayez d'obtenir un spécimen plus grand. P. ex. plutôt que de mesurer un seul fil, prenez la mesure sur la bobine.
- Conformez-vous à la procédure recommandée par le fabricant pour l'analyse des petites pièces.
- Puisque les rayons X traversent les échantillons minces, les résultats dépendent de la substance sur laquelle ils sont posés.
  - Tenez compte de la façon dont les tournures de tour ou de foret, ainsi que les poudres, sont supportées.
  - Ne placez pas un échantillon mince d'aluminium sur une table d'acier : le fer de l'acier faussera la mesure.



### **Échantillons problématiques – Solutions**

- Surface peinte ou revêtue – l'analyseur mesure la peinture ou le revêtement en plus de l'échantillon.
- Traitement des surfaces – les procédés de durcissement et le grenailage d'écrouissage changent la composition chimique des surfaces.
  - On doit meuler les surfaces peintes, revêtues, chromées ou traitées pour en enlever la couche supérieure.
- Échantillons non-homogènes – comment les mesurer?
- Les métaux soudés ou affectés par la chaleur ont une composition chimique différente de celle du métal non traité.
- Petits échantillons
  - Si vous avez plusieurs petites pièces de la même substance, (tournures, poudres, etc.), analysez plusieurs petites pièces en même temps.
- Surfaces chaudes
  - Le travail sur des surfaces chaudes peut exiger l'emploi d'un adaptateur à surface chaude construit par le fabricant.

## **7.2 Analyse des sols**

L'analyse de sols par fluorescence X permet de découvrir la contamination par les métaux.

- Concentrations élevées (plusieurs centaines de ppm); contrôle rapide en moins de 30 secondes
- Près des limites de détection; mesure de 60 secondes ou plus.

### **Échantillons de sol - Considérations**

On doit tenir compte du type de sol, de l'hétérogénéité de l'échantillon, de la taille des particules, de la distribution des concentrations élémentaires, de l'humidité, des profils de profondeur et des profils horizontaux. Ne testez pas sur place du sol recouvert d'eau.

**Travail en laboratoire :** L'envoi de peu d'échantillons à un laboratoire peut se traduire par des données analytiques presque parfaites, mais qui ne sont pas représentatives du site.

**Travail sur le terrain :** On peut mesurer plusieurs échantillons sur le terrain. Ainsi, les données seront plus représentatives du site. Pour obtenir de bons résultats, on doit toutefois adopter une stratégie correcte de caractérisation du site (p. ex. la méthode EPA 6200).

### **Types d'échantillonnage**

- Direct (sur place) : analyse préliminaire sur le terrain, sans préparation d'échantillon.
- Indirect : échantillons ensachés – analyse préliminaire sur le terrain, sans préparation des échantillons.
- Indirect (ex-situ) : précision analytique obtenue à partir d'échantillons préparés ayant été séchés, moulus, tamisés et mélangés.

### **Sols – Réduction des erreurs**

- Instabilité de l'étalonnage ou dérive lente : réduites au minimum par un étalonnage régulier.
- Effets de la composition chimique de la matrice : réduits au minimum par l'étalonnage par normalisation Compton.
- Effets physiques de la matrice tels que la granulométrie ou l'humidité : réduits au minimum par le séchage et le meulage.



- Erreurs dues à la présentation des échantillons, telles que la présence de substances non représentatives dans la zone analysée et les surfaces échançrées : réduites au minimum en nettoyant et en aplanissant la surface du sol mesuré, ou en procédant à un échantillonnage intrusif, suivi par une procédure de préparation de l'échantillon.

## 7.3 Analyse des minerais

On utilise la fluorescence X pour déterminer la concentration d'éléments des minerais.

- Prospection et exploration
- Extraction : détermination de la concentration des métaux dans les carottes de forage, les échantillons de minerais, ou directement sur la surface du roc.
- Procédés industriels : contrôle de la concentration des métaux dans le procédé de raffinage (Contrôle des alliages : vérification de la nuance des alliages dans la tuyauterie et les machineries du procédé)
- Détermination du contenu métallique des scories.

### Prospection et exploration

- Pour le tri ou la prospection, il suffit de trouver des régions de concentration accrue :
  - l'analyse sur place donne les données nécessaires au tri;
  - l'utilisation de facteurs de correction n'est pas nécessaire, mais peut améliorer la précision.
- Pour des analyses précises, la préparation d'échantillon sur place peut augmenter la qualité des données
- On ne peut utiliser la fluorescence X pour la prospection de l'or, de l'argent ou de métaux précieux à faible concentration; les limites de détection sont de l'ordre de ~75 à 150 ppm dans les matrices de sol ou de roc.

### Utilisations en extraction minière

- Carotte de forage
- Contrôle de la teneur du minerai – mines à ciel ouvert
- Déblai de trou de mine

### Considérations relatives aux échantillons de minerais

- Les échantillons doivent être représentatifs des substances analysées
  - les échantillons mesurés in situ doivent provenir de plusieurs endroits et peuvent être mesurés rapidement (10 à 20 s).
  - les mesures d'échantillons de roches intrusives placés dans des sacs de plastique doivent provenir de plusieurs endroits (mesures rapides)
  - on pourra mesurer pendant une longue période (quelques centaines de secondes) les échantillons homogènes représentatifs finement moulus (~20 µm si possible) dans des tasses à rayons X
- La précision et l'exactitude dépendent de la préparation de l'échantillon et de sa présentation à la fenêtre de l'analyseur.
- Il est possible d'obtenir des données comparables à celles des laboratoires, mais on devra souvent sécher l'échantillon et le réduire en poudre de moins de 150 µm.



### Minerai – Réduction des erreurs

- Échantillon non représentatif
- Erreurs de distribution spatiale (erreurs géostatistiques)
- Manque d'uniformité
- Particules de taille variable
- Variations grossières de masse volumique
- Porosité (notamment les roches)
- Variations importantes de l'humidité
- Erreurs d'analyse des échantillons de contrôle
- Quantité insuffisante de spécimens
  - Remplissez les coupes au maximum, si possible.
  - Assurez-vous que les échantillons mis dans des sacs de plastique ont une épaisseur d'environ 40mm.

Il est parfois nécessaire d'utiliser des facteurs de correction empiriques dans l'analyse des minerais.

- La matrice des échantillons géologiques peut varier beaucoup. Les échantillons peuvent contenir des oxydes, des carbonates, des sulfures, etc.
- Certains procédés industriels peuvent introduire de grandes quantités d'eau ou d'éléments légers.
- Les scories et les déchets peuvent contenir du carbone, du phosphore, du soufre, etc., et des éléments métalliques.
- La concentration des éléments légers peut modifier l'émission de rayons X par les éléments cibles (effets de matrice légère).

Exemple : Effets de matrice légère : sur la mesure du cuivre (Cu)

Concentration réelle	Matrice	24,96	Rapport
Lecture à l'analyseur FRX	Cellulose	26,38	1,06
	SiO <sub>2</sub>	23,36	0,94
	CaCO <sub>3</sub>	20,32	0,81

C'est le type de matrice, plutôt que les concentrations, qui affecte les facteurs d'étalonnage.

- Les facteurs d'étalonnage sont valides pour une vaste gamme de concentrations. Par exemple, dans des échantillons contenant du zinc et de l'oxygène, la concentration de zinc varie de 2 à 60 %, tandis que celle de l'oxygène varie de 40 à 98 %. Pourtant, on utilise le même facteur d'étalonnage. Toutefois, si les échantillons étaient composés de zinc et d'aluminium, on utiliserait probablement un facteur d'étalonnage différent.

### Facteurs d'étalonnage

- **Consultez la documentation du fabricant**
- On peut régler les facteurs d'étalonnage pour un seul élément ou pour une série d'éléments.
- Changer les facteurs d'étalonnage d'un élément n'affecte pas la mesure d'autres éléments.
- On peut mémoriser simultanément plusieurs facteurs d'étalonnage.
- Toute la procédure prend seulement 10 à 15 minutes. Sa durée dépend du nombre d'échantillons d'étalonnage utilisés.
- Si le type d'échantillon ne change pas, il ne sera nécessaire de suivre cette procédure qu'une seule fois. (Il faut répéter périodiquement les étalonnages empiriques.)



## 7.4 Comment obtenir des données de qualité

### *(Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 7.4)*

En adoptant une ou plusieurs des stratégies suivantes, l'opérateur devrait obtenir des données de qualité à l'aide de l'analyseur à fluorescence X.

#### **Systèmes de mesure basés sur la performance**

Il s'agit d'une méthode de planification systématique qui exige de l'opérateur qu'il fixe des objectifs et des normes de qualité des données en répondant aux questions suivantes :

1. Quel est le but de cette analyse? (Pourquoi faisons-nous ce travail?)
2. Quelle sera l'utilité des données? (Quelles décisions ces données permettront-elles de prendre?)
3. Quelle qualité ces données devront-elles avoir pour prendre la décision?

#### **Plan d'analyse de l'échantillonnage**

Le plan d'analyse d'échantillon devrait permettre de répondre aux questions élémentaires suivantes :

1. Pourquoi réalisons-nous ce projet?
2. Quels en sont les impératifs réglementaires?
3. Quel sera l'utilisation finale des données?
4. La décision finale sera-t-elle fondée sur le risque ou sur la technologie?

#### **Objectifs de qualité des données - Processus**

1. Énoncer le problème
2. Identifier la décision
3. Préciser les données nécessaires à la décision
4. Définir les limites de l'étude
5. Élaborer une règle de décision
6. Fixer des limites aux erreurs de décision
7. Optimiser le plan de collecte des données

## 8. Interaction du rayonnement avec la matière

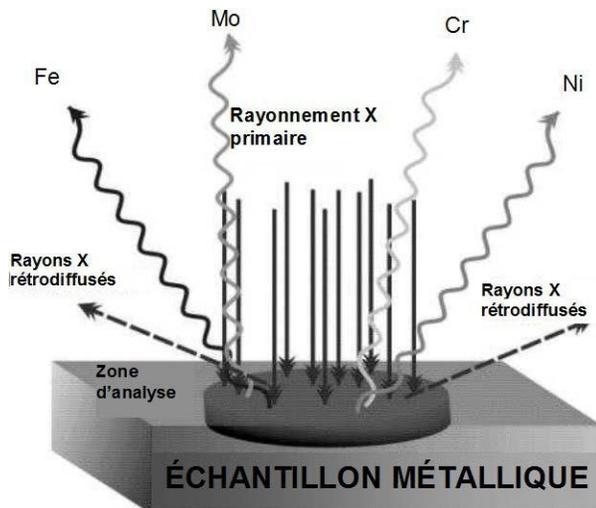
### 8.1 Ionisation

L'ionisation est la dissociation (ou désintégration) d'une molécule en une paire d'ions chargés positivement et négativement ou d'un atome en un ion positif et des électrons. Ce mot désigne également la perte d'un ou de plusieurs électrons d'un atome neutre. Les rayons X et gamma sont des rayonnements ionisants, puisqu'ils peuvent ioniser la matière.

Les rayonnements ionisants sont sources de préoccupations relatives à la sécurité, étant donné qu'ils peuvent modifier la structure chimique des cellules vivantes. Ces modifications peuvent transformer une cellule ou nuire à son fonctionnement normal.



## 8.2 Interaction du rayonnement avec la matière



### La fluorescence X

Un analyseur FRX bombarde les atomes d'un échantillon métallique avec des rayons X, ce qui crée une avalanche d'électrons libres, un rayonnement de bremsstrahlung et des rayons X caractéristiques. À noter que des rayons X rétrodiffusés à partir de l'échantillon et du matériau sous-jacent sont également produits et peuvent poser un risque pour la santé.

### Recommandé pour le niveau 2 : le reste de la section 8.2)

Les rayons X et gamma communiquent de l'énergie aux atomes via trois phénomènes principaux :

- l'absorption photoélectrique entre 50 eV et 0,1 MeV (basse énergie)
- la diffusion Compton entre 1 keV et 1 MeV (énergie moyenne),
- la production de paires au-delà de 1,2 MeV (à haute énergie) [sans objet pour la fluorescence X].

### Absorption photoélectrique

Il s'agit de l'absorption complète d'un photon X incident, à faible énergie. Une partie de l'énergie est consommée pour éjecter un électron de sa couche (entre 30 et 50 eV). Le reste est transformé en énergie cinétique de l'électron. En se déplaçant, l'électron disperse son énergie en causant d'autres ionisations.

### Diffusion de Compton

À énergie plus élevée, un photon X incident ne perd qu'une partie de son énergie en éjectant un électron de sa couche et en transférant de l'énergie cinétique à l'électron éjecté. Ce photon a maintenant moins d'énergie et est diffusé dans une direction qui diffère de sa trajectoire d'origine. On l'appelle un rayon X Compton diffusé.

Un seul rayon X de haute énergie peut déclencher une avalanche d'électrons libres et de rayons X. Par exemple, la direction ou la vitesse de l'électron éjecté peuvent changer alors qu'il passe près d'un atome, ce qui crée des rayons X de freinage (bremsstrahlung). Les électrons éjectés, les rayons X de la diffusion de Compton et les rayons X de bremsstrahlung peuvent éjecter d'autres électrons des couches internes d'atomes, ce qui provoque l'émission de rayons X caractéristiques, causée par la chute des électrons externes qui tentent de boucher les « trous » laissés par les électrons éjectés. Ces divers phénomènes se répètent à des niveaux d'énergie décroissants, jusqu'à ce que les électrons ou les rayons X émis n'aient plus suffisamment d'énergie pour causer d'autres ionisations.



### 8.3 Unités d'exposition au rayonnement : le coulomb/kg et le röntgen

La mesure de l'intensité du rayonnement X est basée sur sa capacité d'ioniser l'air. On la mesure comme la charge électrique (coulomb) déposée par kilogramme d'air.

**Le röntgen** : Unité de mesure des rayons X ou gamma dont l'énergie est inférieure à 3 MeV.  
Un röntgen =  $2,58 \times 10^{-4}$  coulomb par kilogramme d'air.

### 8.4 Atténuation du rayonnement électromagnétique

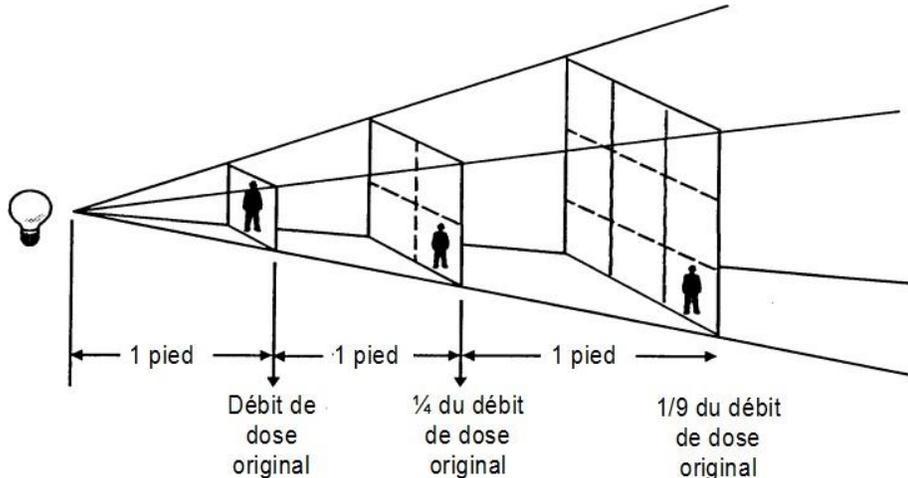
En traversant la matière, le rayonnement perd de son intensité. Plus l'énergie (mesurée en keV) d'un rayon X ou gamma est élevée, plus il pénétrera profondément dans une substance. Plus élevée est la densité, plus courte sera la pénétration.

- Lorsqu'il utilisera l'analyseur FRX, l'opérateur devra se souvenir que le rayonnement X de faible énergie (< 50 keV) peut néanmoins pénétrer et traverser les échantillons minces.

#### Loi de l'inverse du carré de la distance

L'intensité du rayonnement diminue en fonction de la distance par rapport à sa source. Dans le cas d'une source ponctuelle de rayons X ou gamma, l'intensité est inversement proportionnelle au carré de la distance.

- Doubler la distance réduit l'intensité à un quart (1/4) de la valeur originale.
- Tripler la distance réduit l'intensité à un neuvième (1/9) de sa valeur originale.



#### Calcul type :

Soit un analyseur FRX dont l'intensité à une distance de 1 mètre est de 24 mR/h. Quelle sera donc l'intensité à 2 mètres? Rép.: 6 mR/h

La loi de l'inverse des carrés ne s'applique pas bien, à faible distance, aux sources étendues ou à plusieurs sources, ou à des sources de faible énergie enfermées dans une pièce dans laquelle le rayonnement de faible énergie peut se diffuser sur les murs. Dans ces cas, l'intensité ne diminue pas aussi rapidement avec la distance de la source, comme pourrait le faire penser la loi de l'inverse du carré de distance.



## 9. Effets biologiques du rayonnement

### 9.1 Unités de la dose absorbée : le gray et le rad (toute substance)

**Dose** : Quantité d'énergie provenant de l'exposition à un rayonnement ionisant absorbée par unité de masse.

**Rad** : Unité de la dose d'un rayonnement absorbé (pour toute substance)

1 rad = 100 ergs d'énergie absorbée par gramme de substance.

**Gray** : Unité du Système international (SI) mesurant la dose absorbée d'un rayonnement.

1 gray = 10 000 ergs d'énergie absorbée par gramme de substance.

1 gray (Gy) = 100 rads ou 1 rad = 10 milligrays

**Débit de dose** : Vitesse à laquelle l'énergie est absorbée par masse unitaire de substance exposée à un rayonnement ionisant (p. ex. gray/h ou rad/h).

### 9.2 Unités de dose équivalente : le sievert et le rem (effets biologiques)

La dose équivalente permet de rattacher la dose de rayonnement (en rads) aux dommages biologiques subis par les humains. Les lésions subies dépendent du type du rayonnement auquel on a été exposé.

**Dose équivalente** : Produit de la multiplication de la dose par le facteur de pondération du rayonnement. En 1990, la CIPR a proposé l'utilisation du terme « dose équivalente » au lieu d'équivalent de dose et de facteur de pondération plutôt que de facteur de qualité.

On appelle facteur de pondération la capacité d'un rayonnement à causer un dommage de nature biologique.

Rayonnement	Facteur de pondération
Rayons X, gamma et bêta	1
Neutrons (rapides)	10
Rayons alpha	20

L'unité de mesure de l'équivalent de dose est le rem (pour **R**oentgen **E**quivalent **M**an).

Cette unité de dose équivalente est égale à la dose en rads multipliée par le facteur de pondération du rayonnement : **rem** = rad x facteur de pondération du rayonnement.

Pour les rayons X, 1 rem ~ 1 rad, pour les tissus mous.

En 1990, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a proposé le terme « dose équivalente ».

Dose équivalente : Le produit de la dose multipliée par un facteur de pondération du rayonnement exprimé en **sieverts**. 1 sievert (Sv) = 100 rems

**Résumé** : On appelle « dose » l'absorption par toute substance d'un rayonnement, tandis que les expressions « équivalent de dose » ou « dose équivalente » ne s'appliquent qu'aux tissus humains. Toutefois, dans le travail avec des rayons X et gamma, dont le facteur de pondération est égal à 1, on utilise couramment en milieu de travail l'expression « dose » pour désigner la quantité de rayonnement absorbé par une personne en millisieverts ou en millirems.  
p.ex. – Quelle dose as-tu reçue? – J'ai absorbé 3 millirems.



**Conversion :**

Dose : 1 gray (Gy) = 100 rads ou 1 rad = 10 milligrays  
 Équivalent de dose : 1 sievert (Sv) = 100 rems ou 1 rem = 10 millisieverts

**Facteurs de dommages biologiques**

Les facteurs de dommages biologiques déterminent la quantité de dommages reçus par des tissus vivants lors de l'exposition au rayonnement. Ils incluent :

- La dose totale : plus élevée est la dose, plus graves seront les effets biologiques.
- Le débit de dose : si une dose est absorbée dans un court intervalle, la cellule disposera de moins de temps pour se réparer.
- Le type de rayonnement : plus grande est la quantité d'énergie déposée, plus importants seront les effets.
- La zone exposée : plus étendue est la surface corporelle exposée, plus graves seront les effets biologiques.
- La sensibilité des cellules : les cellules les plus vulnérables sont celles qui se divisent rapidement.
- La sensibilité individuelle au rayonnement ionisant :
  - a) les embryons et les fœtus sont les plus sensibles,
  - b) les enfants constituent le deuxième groupe le plus vulnérable,
  - c) les personnes âgées sont plus sensibles que les adultes d'âge moyen,
  - d) la tranche des adultes allant des jeunes aux adultes d'âge moyen sont les moins sensibles.

**9.3 Norme de 2007 de la CIPR relative aux limites de dose**

**CIPR : Commission internationale de protection radiologique Limites**

**de dose pour le grand public, en un an :**

Dose efficace au corps entier : .....100 mrem, 1 mSv  
 Dose équivalente pour la peau ou les extrémités.....5 rem, 50 mSv  
 Dose équivalente pour le cristallin..... 1,5 rem, 15 mSv

**Limites de dose pour un travailleur sous rayonnements, en un an :**

Dose efficace au corps entier : ..... 2 rem, 20 mSv  
 Dose équivalente pour la peau ou les extrémités.....50 rem, 500 mSv  
 Dose équivalente pour le cristallin..... 2 rem, 20 mSv  
 Dose efficace pour une travailleuse enceinte  
 (au cours de la gestation).....100 mrem, 1 mSv

Ces limites de dose ne comprennent pas les expositions aux rayonnements ionisants médicaux et naturels.

En général, pour une même dose, plus le corps est exposé, plus les effets biologiques seront importants.



## 9.4 Rayonnement naturel

Les humains habitent depuis toujours un monde radioactif. Leur milieu les expose continuellement à des sources de rayonnement, naturelles ou artificielles. En moyenne, un Nord-Américain reçoit 365 millirems (mrems) de rayonnement par année.

La source la plus importante est le **rayonnement naturel** (environ 300 mrems/an). Les quatre sources principales de rayonnement naturel sont :

- |   |              |
|---|--------------|
| • le rayonnement cosmique (émis par le Soleil et l'Univers)                         | 30 mrems/an  |
| • le rayonnement tellurique (émis par le sol, les pierres, l'uranium et le thorium) | 30 mrems/an  |
| • les sources internes (l'eau, les aliments; p. ex. le 40K dans les bananes)        | 40 mrems/an  |
| • le radon gazeux dans les maisons  | 200 mrems/an |

Le reste de l'exposition au rayonnement (65 mrems/an) provient du rayonnement provenant de **sources artificielles**, constitué surtout de rayons X ou gamma.

Les quatre principales sources artificielles de rayonnement sont :

- |  |             |
|--|-------------|
| • l'irradiation médicale (diagnostics dentaires et médicaux, tomographie et radiothérapie) | 53 mrems/an |
| • les essais nucléaires dans l'atmosphère (retombées radioactives)                         | 1 mrem/an   |
| • les produits grand public (combustibles, détecteurs de fumée)                            | 10 mrems/an |
| • les utilisations industrielles (rayons X)  | 1 mrem/an   |

## 9.5 Radiosensibilité des organes – radiolésions et rétablissement

### Sensibilité des cellules

Le corps humain comporte plus de 50 milliards de cellules vivantes. Des groupes de ces cellules forment des tissus qui, à leur tour, constituent les organes du corps.

Certaines des cellules résistent plus que d'autres aux radiolésions. Les plus sensibles sont celles qui se divisent rapidement. C'est pourquoi il convient de contrôler avec soin l'exposition des fœtus. La gravité des radiolésions et leur réparation dépendent de la résistance des cellules affectées et du degré d'exposition.

## 9.6 Symptômes du mal des rayons

- réduction du compte de cellules blanches sanguines
- perte des cheveux
- nausées
- accroissement de la température corporelle
- fatigue
- vomissements
- perte de la partie du corps irradiée



## 9.7 Irradiation aiguë et dommages corporels

### Doses aiguës et chroniques de rayonnement

#### Dose aiguë

Une dose de rayonnement est aiguë s'il s'agit d'une dose importante reçue pendant une courte période de temps et provoquant des réactions physiques résultant de dommages importants aux cellules (effets aigus). Puisque le corps ne peut remplacer ou réparer les cellules assez rapidement pour remédier rapidement aux dommages, la personne affectée pourrait être malade très longtemps. **Les doses aiguës de rayonnement peuvent provoquer une baisse du compte des cellules sanguines et la perte des cheveux.** Des doses enregistrées sur tout le corps de 10 à 25 rems n'ont provoqué que de légers changements dans les cellules sanguines et aucun autre effet apparent.

#### Mal des rayons

**Le mal des rayons apparaît à la suite de doses aiguës supérieures à 100 rems.** Il est souvent un effet secondaire ressenti par les patients en radiothérapie, dont une partie du corps est soumise à des expositions élevées. Le mal des rayons peut provoquer des nausées, causées par l'endommagement des cellules de la paroi interne des intestins, et d'autres symptômes comme la fatigue, les vomissements, l'augmentation de la température du corps et la réduction du compte de cellules blanches du sang.

#### Dose aiguë à l'ensemble du corps

Plusieurs mois peuvent être nécessaires pour se remettre d'une dose aiguë sur l'ensemble du corps. Les dommages résultant d'une exposition de 500 rems ou plus à l'ensemble du corps pourraient être trop graves pour que la personne récupère.

**Dose létale moyenne (DLM) = 500 rems**

#### Dose aiguë à une partie du corps

C'est le type de dose aiguë le plus courant dans les applications industrielles (utilisation de machines à rayons X), souvent aux extrémités (la main, les doigts, etc.).

L'absorption de plusieurs doses de rayonnement pourrait se traduire par la perte du membre exposé. La prévention des doses aiguës à une partie du corps est l'une des motivations les plus importantes pour bien former le personnel.

#### Dose chronique

On appelle dose chronique, l'absorption continue de petites quantités de rayonnement pendant une longue période de temps, par exemple la dose de rayonnement que nous recevons quotidiennement des sources naturelles.

#### Dose chronique et dose aiguë

- Dose chronique : rayonnement peu intense reçu pendant une longue période
- Dose aiguë : dose intense de rayonnement reçue dans une courte période.

Le corps tolère les doses chroniques mieux que les doses aiguës, pour les raisons suivantes :

- Un nombre limité de cellules doivent être réparées pendant une période donnée.
- Le corps dispose de plus de temps pour remplacer les cellules mortes ou non fonctionnelles par de nouvelles.
- Les doses chroniques ne provoquent pas les changements physiques radicaux observés avec les doses aiguës.



## Effets génétiques

Les effets génétiques proviennent des changements dans les chromosomes ou de l'exposition directe du fœtus au rayonnement. Les effets peuvent être **somatiques** (cancer, tumeurs, etc.) ou **héréditaires** (transmis aux descendants).

### ▪ Effets somatiques

La personne exposée directement souffre des effets somatiques. Les changements génétiques provoqués par l'endommagement des cellules peuvent, à la longue, transformer celles-ci en cellules cancéreuses. On devrait noter que cette éventualité est très faible pour des doses professionnelles.

### ▪ Effets génétiques

Les descendants de la personne exposée souffrent de ces effets. L'endommagement du matériel génétique n'affecte pas la personne ayant subi l'irradiation, mais il est transmis aux descendants. À ce jour, seuls les plantes et les animaux ont manifesté des signes d'effets génétiques produits par le rayonnement.

## 9.8 Contrôle de l'exposition du personnel au rayonnement

Puisque l'on ne peut détecter le rayonnement au moyen de nos sens, il faut utiliser des dispositifs spéciaux pour détecter et enregistrer l'exposition. La loi impose aux travailleurs sous rayonnement, ainsi qu'au personnel utilisant des appareils à rayons X, le port de ces dispositifs de contrôle et d'enregistrement. On appelle habituellement ces appareils dosimètres et leur utilisation pour le contrôle est la **dosimétrie**.

## 9.9 Le concept d'ALARA (As Low As Reasonably Achievable)

D'une part, les limites de dose et les niveaux de contrôle administratifs tentent de garantir une très faible exposition au rayonnement. D'autre part, le but du programme ALARA est de réduire les doses reçues de rayonnement ionisant au niveau **le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre, (as low as reasonably achievable : ALARA)**.

Le programme ALARA est conçu pour éviter les expositions inutiles des employés et du public au rayonnement, ainsi que pour protéger l'environnement. Tous les travailleurs, les gestionnaires et les membres du personnel de sûreté doivent s'assurer que les doses de rayonnement sont les plus basses que l'on puisse raisonnablement atteindre.

**Trois pratiques fondamentales permettent de maintenir l'exposition au rayonnement externe au plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre (ALARA) :**

- Le temps
- La distance
- Le blindage



## Le temps

En réduisant le temps d'exposition au rayonnement ionisant, on diminue la dose absorbée. Réduisez la dose en limitant le temps passé dans une zone radioactive.

On peut écrire l'effet du temps sur le rayonnement reçu comme : **dose = débit de dose x temps.**

Exemple : Si une exposition d'une heure se traduit par une dose de 20 mrems, une exposition d'une demi-heure se traduira par une dose de 10 mrems.

## Distance

Plus grande sera la distance depuis une source de rayonnement, moins intense sera la dose que l'on recevra. Réduisez la dose en vous éloignant le plus possible de la source de rayonnement.

Pour les rayons X et gamma, la **loi de l'inverse du carré de la distance** permet de comprendre l'effet de la distance. **Dans les cas les plus simples, on peut effectuer un calcul approximatif rapide si l'on se souvient que :**

- a) **doubler la distance depuis la source réduit la dose et le débit de dose à 1/4**
- b) **tripler la distance depuis la source réduit la dose et le débit de dose à 1/9**

Exemple de calcul :

Si le débit de dose d'une source placée à 3 mètres est de 2 mrems/h, quel serait le débit de dose à 1 mètre?

Réponse :  $9 \times 2 \text{ mrems} = 18 \text{ mrems/h}$

## Le blindage

On peut réduire la dose absorbée en plaçant des matériaux entre la personne exposée et la source du rayonnement ionisant. Vous pourrez réduire la dose en disposant des matériaux de blindage denses autour d'une source de rayonnement. On considère que le blindage est la méthode la plus efficace de réduction de l'exposition au rayonnement.

La capacité de blindage d'un matériau est proportionnelle à sa masse volumique. Elle dépend également de l'énergie du rayonnement ionisant.

Quel est le meilleur matériau de blindage : le plomb? l'acier? l'aluminium?

Réponse : le plomb, parce que sa masse volumique est la plus élevée.



## 10. Détection du rayonnement

---

### 10.1 Les instruments de détection et de mesure du rayonnement

On utilise plusieurs instruments pour détecter et mesurer les doses et les débits de dose. On se rappellera que la dose est une mesure de l'énergie déposée par unité de masse par le rayonnement ionisant. **Le principe fondamental du fonctionnement de ces appareils est l'ionisation.**

Il existe plusieurs instruments :

- les chambres d'ionisation (radiamètres)
- les tubes de Geiger-Mueller
- les dosimètres de poche
- les dosifilms (pellicule photographique)
- les détecteurs thermoluminescents (DTL)
- les dosimètres à luminescence stimulée optiquement (DLSO)

#### Chambres d'ionisation

Les chambres d'ionisation sont les détecteurs de rayonnement les plus simples. Elles sont formées d'une enceinte cylindrique scellée contenant de l'air et d'un fil isolé la traversant au centre, d'un bout à l'autre. On applique une tension électrique entre le fil et la paroi externe de l'enceinte. En traversant cette chambre, le rayonnement crée des paires d'ions et les électrons sont recueillis sur le fil. La charge qui en résulte est à la base de la mesure de l'exposition au rayonnement. L'efficacité de cet appareil n'est que de 30 à 40 %, puisqu'un rayon peut le traverser sans créer suffisamment de paires d'ions pour produire une mesure correcte. La plupart des radiamètres utilisent des chambres d'ionisation.

#### Tubes de Geiger-Mueller

Les tubes de Geiger-Mueller ressemblent beaucoup aux chambres d'ionisation, mais sont beaucoup plus sensibles. La tension appliquée entre le fil et le cylindre extérieur est si élevée que même un tout petit nombre de paires d'ions produira un grand nombre d'électrons qui seront détectés. Ainsi, un tube de Geiger-Mueller peut détecter et mesurer de très faibles quantités de rayonnement bêta ou gamma. Toutefois, ces tubes ont tendance à se saturer dans des champs de rayonnement très intenses.

#### Dosimètres de poche

Les dosimètres de poche sont des versions miniatures et spécialisées des chambres d'ionisation. Ce sont essentiellement de petits électroscopes à fibre de quartz. La chambre reçoit une charge d'électricité statique qu'elle accumule comme un condensateur. Au fur et à mesure que le rayonnement traverse la chambre, des paires d'ions réduisent la charge proportionnellement à la quantité de rayonnement reçu et l'indicateur en fibre de quartz se déplace au long d'une échelle de mesure. L'opérateur doit charger son dosimètre de poche et le remettre à zéro à l'aide d'un poste de charge.

#### Dosifilms [Rarement utilisés de nos jours]

Les dosimètres photographiques sont constitués d'un boîtier étanche à la lumière contenant un dosifilm. Celui-ci se noircit proportionnellement à la quantité de rayonnement reçu, la dose. Un service de dosimétrie détermine le noircissement de la pellicule photographique.



## Détecteur thermoluminescent et détecteur à luminescence stimulée optiquement

Ces deux types de détecteur sont de petits appareils ressemblant aux boîtiers de dosifilm et qui contiennent des matériaux cristallins qui peuvent conserver les électrons libérés par le passage d'un rayonnement ionisant. Ces électrons sont emprisonnés dans les cristaux jusqu'au moment de leur détection par un lecteur ou processeur spécial; les cristaux qui utilisent la chaleur sont appelés détecteurs thermoluminescents (DTL) et ceux qui utilisent la lumière sont appelés détecteurs à luminescence stimulée optiquement (DLSO). À la suite de ce traitement, les électrons sont libérés et les cristaux produisent une lumière qui peut être mesurée et qui est directement proportionnelle à la quantité de rayonnement reçu (la dose).

## 10.2 Contrôle des rayonnements reçus par le personnel

Des dispositifs de surveillance des rayonnements reçus par le personnel sont utilisés pour enregistrer et contrôler les expositions afin que les limites de dose professionnelle ne soient pas dépassées.

### Contrôle du rayonnement reçu par tout le corps

Aux fins de la surveillance de la dose au corps entier externe, un dosimètre du corps entier (DTL ou DLSO) est en général utilisé pour mesurer les doses de rayonnement à pénétration superficielle ou profonde. Ils sont portés sur les vêtements, le plus près possible du corps, au niveau de la taille ou de la poitrine et donnent les doses efficaces de rayonnement pénétrant reçues par tout le corps. La dose mesurée par cet appareil est utilisée pour déterminer la dose d'exposition professionnelle légale reçue par une personne.

### Contrôle du rayonnement reçu par les extrémités (bague dosimètre)

Les dispositifs de surveillance des rayonnements reçus par le personnel portés sur les extrémités ou près de la peau donnent les doses équivalentes des rayonnements peu pénétrants. Une bague dosimètre contient un dosimètre DTL ou DLSO. La dose mesurée par ces appareils constitue la mesure de l'exposition des extrémités à la dose légale professionnelle des travailleurs.

Dans les cas où la surveillance des rayonnements reçus par le personnel qui utilise un analyseur à fluorescence X portatifs à tube à rayons X et à faisceau ouvert est nécessaire, un dosimètre d'extrémité doit être porté sur le doigt qui est susceptible d'être exposé au risque le plus élevé (associé aux photons diffusés des activités de mesure analytique).

## 10.3 Radiamètres

On utilise habituellement les radiamètres pour surveiller une zone où l'on trouve un rayonnement ionisant.

**Le radiamètre utilisé avec un analyseur FRX doit être capable de détecter des photons dont l'énergie est supérieure à 5 keV.**

Les opérateurs d'analyseurs FRX utiliseront les radiamètres pour :

- Détecter la présence d'un rayonnement diffusé à proximité des mains de l'opérateur.
- Détecter la présence de rayons X s'échappant autour de petits échantillons ou passant à travers des échantillons petits ou minces.



- Établir si le rayonnement traverse le dessus d'une table et, ainsi, irradie les jambes de l'opérateur, ou traverse des cloisons ou des murs pour pénétrer dans des zones occupées.
- Confirmer aux membres du public proches de la zone d'analyse par fluorescence X que le niveau de rayonnement n'est pas anormal.
- Déterminer la présence d'une fuite de rayonnements lorsqu'un analyseur FRX a été endommagé.

**Par conséquent, un opérateur d'analyseur à fluorescence X doit se procurer un radiamètre et s'en servir sur les lieux de son travail lorsqu'il est nécessaire pour n'importe laquelle des applications précédentes.**

**L'étalonnage d'un radiamètre devrait être effectué une fois par année ou à l'occasion de son entretien ou d'une réparation.**

## 10.4 Rapport d'observation avec le radiamètre

**Des profils ou rapports relatifs à la diffusion des rayonnements devraient accompagner l'appareil au moment de l'achat. Le propriétaire de l'équipement devraient garder cela au dossier.**

À titre d'exemple, certaines valeurs du rayonnement sont indiquées ci-dessous.

Analyseur	Échantillon présent	En contact avec les côtés	En contact avec le sommet	En contact avec le déclencheur	En contact avec le faisceau	À 1 mètre du faisceau
1	Oui	10	10	-	5	
	Non	5	5	-	450	20
2	Oui	0,1	0,1	0,1		
	Non	0,1	0,1	0,1	28 000	24
3	Non	0,1	0,3	0,12	2 000	3

## 11. Pratiques sécuritaires du travail en FRX

### 11.1 Caractéristiques de l'analyseur FRX

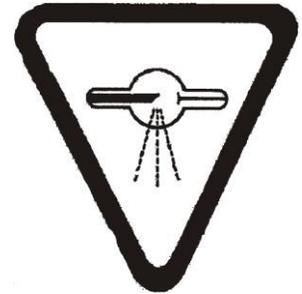
Les débits de dose les plus élevés sont observés au port du faisceau de l'analyseur FRX. On doit éviter d'exposer les mains ou d'autres parties du corps à la trajectoire du faisceau. L'opérateur doit connaître les caractéristiques de sûreté et les procédures de fonctionnement recommandées par le fabricant de l'analyseur FRX qu'il utilisera.



## 11.2 Étiquettes FRX

Des étiquettes de mise en garde doivent être appliquées sur l'analyseur FRX, notamment :

- a) une étiquette portant le symbole de mise en garde contre les rayons X.
- b) des étiquettes portant la mention suivante :



**ATTENTION – RAYONNEMENTS X** Cet appareil produit des rayonnements X à haute intensité lorsqu'il est sous tension.

Son utilisation est réservée au personnel compétent

- c) une étiquette indiquant les renseignements suivants :
  - (i) les nom et adresse du fabricant,
  - (ii) la désignation du modèle,
  - (iii) le numéro de série,
  - (iv) la date de fabrication,
  - (v) le pays de fabrication.

## 11.3 Responsabilités de l'opérateur d'analyseur FRX

L'opérateur d'analyseur FRX doit consulter la section 12.0 du présent document.

Les analyseurs à fluorescence X portatifs à tube à rayons X présentent un faisceau ouvert, de sorte que n'importe quelle partie du corps humain peut se trouver dans le rayonnement primaire et que la possibilité d'utiliser des contrôles de sécurité techniques est quelque peu limitée. Néanmoins, ces dispositifs paraissent commodes pour réaliser des analyses élémentaires ou chimiques des matériaux, des composants ou des systèmes sur place dans l'industrie. La procédure des analyses du travail par FRX consiste à apporter le dispositif au site du matériau à mettre à l'essai où il est tenu à la main par l'opérateur et activé pour fournir un faisceau primaire de forte intensité qui bombarde le matériau à l'essai de très près. Des mesures d'atténuation des risques sont donc nécessaires. Ainsi, le travail d'END par FRX doit non seulement être conçu en fonction de considérations de radioprotection (comme les END par radiographie industrielle) mais être effectué en respectant rigoureusement des mesures administratives conçues pour réduire la probabilité des accidents et des expositions accidentelles au rayonnement. Le propriétaire d'un analyseur à fluorescence X portatif à tube à rayons X et à faisceau ouvert est en fin de compte directement responsable de sa gestion, de son contrôle et de ses applications et une délégation des fonctions à une autre personne ne dégage pas le propriétaire de l'analyseur FRX de ces responsabilités.

Sur tout lieu d'END par FRX et dans toute installation où l'analyseur FRX est tenu à la main aux fins de l'application souhaitée, l'opérateur d'analyseur FRX certifié a la responsabilité de :

1. porter sur lui une pièce d'identité appropriée et une preuve de certification d'opérateur d'analyseurs FRX quand des travaux d'END par FRX sont réalisés;
2. fournir au propriétaire de l'analyseur FRX des documents appropriés qui confirment son identité et sa certification;
3. effectuer, avant d'utiliser l'analyseur FRX et le radiamètre, des vérifications de sécurité et fonctionnelles, s'assurer qu'ils peuvent être utilisés en toute sécurité et, s'ils sont défectueux, ne pas les utiliser;



4. tenir le personnel non autorisé à distance du voisinage immédiat de l'aire de travail des END par FRX pendant les mesures (une distance minimale de 1,0 mètre est recommandée);
5. porter, si un organisme de réglementation ou des procédures opérationnelles l'exigent, des dosimètres d'extrémité aux mains et aux doigts qui sont susceptibles d'être exposés au risque le plus élevé et s'assurer que les limites d'exposition autorisées des travailleurs pour ces tissus ou organes indiquées à la section 9.3 du présent livret ne sont pas dépassées (ces dosimètres doivent être fournis par un fournisseur de services de dosimétrie approuvé par la Commission canadienne de sûreté nucléaire, conformément à son règlement);
6. si nécessaire, utiliser un radiamètre convenablement étalonné et fonctionnel pour vérifier, établir ou confirmer que l'intensité du rayonnement ne dépasse pas de plus de 20 % celle qui est indiquée par le fabricant de l'analyseur FRX (comme ce pourrait être le cas si (i) le dispositif de protection contre le rayonnement ou la performance de l'analyseur FRX suscite des doutes pour des raisons liées à la conception, à des dommages ou à des défaillances, ou (ii) au cours de mesures par FRX, s'il y a des doutes sur l'intensité du rayonnement dans l'aire de travail immédiate) et s'assurer de conserver les documents pertinents sur ces actions (le seuil de détection des photons du radiamètre doit être de 5 keV; le radiamètre doit être étalonné par un laboratoire national d'étalonnage du rayonnement ionisant ou un laboratoire qui est agréé par un laboratoire national d'étalonnage aux fins de la réalisation d'un tel étalonnage; des étalonnages doivent être effectués à plusieurs énergies des photons pour couvrir la totalité du spectre des énergies des photons produits par l'analyseur FRX; les étalonnages doivent être effectués une fois par année ou après un entretien ou une réparation du radiamètre; les documents sur les étalonnages du radiamètre doivent être conservés à l'installation; de plus amples informations sur les radiamètres sont fournies à l'Annexe II du Code de sécurité 32);
7. faire en sorte que son exposition au rayonnement et celle des autres membres du personnel soit aussi faible que possible;
8. aviser le propriétaire de l'analyseur FRX de toute exposition anormale d'une personne au rayonnement, connue ou soupçonnée, fournir les détails nécessaires et tenir un registre de ces avis;
9. superviser le travail de toute personne qui suit une formation en vue d'obtenir la certification des opérateurs d'analyseurs FRX (à titre de fonction déléguée par le propriétaire de l'analyseur FRX);
10. si nécessaire, superviser (à titre de fonction déléguée par le propriétaire de l'analyseur FRX), dans un établissement d'enseignement ou de formation professionnelle, le travail des étudiants qui sont tenus d'utiliser l'appareil dans le cadre d'un programme de cours, après qu'ils aient reçu une formation sur la sécurité propre à l'appareil qu'ils devront utiliser;
11. respecter toutes les règles de protection et de sécurité établies par le propriétaire de l'analyseur FRX pour le travail d'END par FRX et pour l'analyseur lui-même;
12. mettre l'analyseur FRX en lieu sûr lorsqu'il en a la garde et ne permettre à aucune personne non autorisée de l'utiliser;
13. le cas échéant, lorsque le travail d'END par FRX doit être effectué dans les locaux d'un client, renseigner convenablement le client sur les questions de sécurité relatives à ces travaux et s'assurer que le travail est effectué en toute sécurité.



Les étudiants affectés à des travaux d'END par FRX dans une installation ou sur un lieu de travail (c'est-à-dire à un travail sur le terrain) pour lequel :

- (a) l'analyseur FRX doit être tenu à main pour l'application; et
- (b) la supervision directe par un opérateur possédant une certification FRX n'est ni commode ni justifiée et doivent posséder une certification d'opérateur d'analyseurs FRX appropriée avant d'utiliser l'analyseur FRX pour ce travail.

### Travaux d'END par FRX réalisés au moyen d'un système à faisceau fermé

**Il y a des situations dans lesquelles un analyseur à fluorescence X portatif à tube à rayons X et à faisceau ouvert est fabriqué, assemblé ou intégré par le fabricant dans un système à faisceau fermé pour des travaux d'END par FRX. Un système à faisceau fermé qui comprend un tel dispositif FRX comme source de rayonnements ionisants doit satisfaire aux exigences énoncées dans le Règlement sur les dispositifs émettant des radiations (Annexe II, Partie XIV, Appareil d'analyse à rayonnement X).**

**Si un tel dispositif FRX est configuré et utilisé dans un système à faisceau fermé, l'utilisateur n'a pas besoin d'une certification d'opérateur d'analyseurs FRX de RNCAN parce qu'il n'est alors pas nécessaire de tenir l'analyseur FRX à la main pour l'application utilisée dans les travaux d'END par FRX.**

## 11.4 Temps, distance et blindage permettant de réduire l'exposition au rayonnement

Lorsque cela est possible, le faisceau de rayonnement primaire ne doit pas être dirigé vers des espaces occupés. L'opérateur FRX doit accomplir ses tâches dans le respect du principe ALARA (temps, distance et blindage) :

- réduire au minimum le temps d'exposition des personnes;
- porter au maximum la distance entre les personnes et la source de rayonnement;
- tenir les personnes à l'abri du rayonnement (à l'aide d'un blindage).

### Comment assurer la radioprotection lors de l'utilisation des analyseurs FRX

- **Ne permettre à quiconque d'autre qu'un opérateur certifié de faire fonctionner l'analyseur.**
- Bien surveiller l'orientation du faisceau primaire (de rayons X).
- Éviter de se placer ou de placer une partie du corps (particulièrement les yeux ou les mains) près du port du faisceau de rayons X en réglant l'instrument durant le fonctionnement.
- Ne permettre à personne de s'approcher à moins d'un mètre de l'appareil durant le fonctionnement de l'analyseur.
- Ne jamais neutraliser les dispositifs de sûreté intégrés aux analyseurs, comme les capteurs, les commutateurs, les indicateurs, etc. Porter les appareils de dosimétrie appropriés tel qu'exigé, le cas échéant, par les autorités réglementaires ou par les procédures d'exploitation.
- **L'opérateur FRX a la responsabilité de la sécurité de l'analyseur.**
  - Ne jamais laisser l'analyseur sans surveillance lorsqu'il fonctionne.
  - Lorsque l'appareil fonctionne, il doit être en possession de l'opérateur en tout temps (on doit le garder à vue ou le laisser dans une zone protégée).
  - Toujours ranger l'instrument en lieu sûr lorsqu'il n'est pas utilisé.



## Petits échantillons

Les échantillons de petite taille qui ne couvrent pas entièrement la fenêtre présentent des risques potentiels parce que le rayonnement primaire peut ne pas être atténué par l'échantillon. Pour éliminer ce risque, certains analyseurs FRX sont dotés d'un couvercle de protection ou d'un socle conçu pour contenir entièrement les échantillons de petite taille. Utilisez-le.

## Échantillons minces

Le rayonnement provenant du tube à rayons X peut traverser des échantillons minces, tout dépendant de leur épaisseur et du numéro atomique des éléments dont ils sont constitués. Le tableau suivant donne une indication des intensités relatives après qu'un rayonnement de 40 keV ait traversé des feuilles d'aluminium et de fer de différentes épaisseurs.

Feuille d'aluminium		Feuille de fer	
Épaisseur (mm)	Intensité relative (%)	Épaisseur (mm)	Intensité relative (%)
0	100	0,0	100
1	46	0,1	23
2	26	0,2	9
4	11	0,4	2,1
10	1,5	1,0	0,08

D'après les données qui précèdent, pour absorber 90 % du rayonnement, l'épaisseur des échantillons d'aluminium doit être de 4 mm alors que l'épaisseur des échantillons de fer (parce que leur numéro atomique est plus élevé que celui de l'aluminium) doit être de 0,2 mm. Chose plus importante, comme un rayonnement est transmis au travers des échantillons et engendre des rayonnements diffusés, dans la pratique, il n'est pas prudent de mesurer des échantillons :

- en les tenant dans sa main;
- en demeurant assis à un bureau – le rayonnement peut traverser le bureau et atteindre les jambes ou d'autres parties du corps.

## 11.5 Contrôle exercé par le propriétaire sur les analyseurs FRX lorsqu'ils ne sont pas utilisés

Le propriétaire de l'analyseur FRX doit s'assurer de garder en lieu sûr (sous verrou et sous clé) les analyseurs FRX dont il a la responsabilité.

- Lorsque l'analyseur n'est pas utilisé, il faut le garder et l'entreposer en lieu sûr.
- Ne pas ranger la clé avec l'analyseur.
- Tenir à jour des registres afin d'assurer le suivi de tous les analyseurs FRX et inscrire le nom des opérateurs qui les utilisent et leur lieu d'utilisation.

## Situations d'urgence

- **Perte ou vol** : Informez-en l'autorité réglementaire compétente (Programme du travail de RHDC ou l'administration provinciale ou territoriale compétente) dès que possible. En outre, communiquez avec le service de police et le fabricant.



- **Accident**

**La première mesure à prendre consiste à éteindre l'analyseur et :**

- **à enlever les piles;**
- **à fermer les autres sources d'alimentation (p. ex. débrancher**

Dommmages mineurs : Si des pièces semblent avoir été endommagées, même si l'analyseur demeure fonctionnel, communiquer immédiatement avec le propriétaire de l'équipement pour lui demander conseil. Le propriétaire de l'équipement doit communiquer avec le fabricant pour obtenir de l'aide le plus tôt possible.

Dommmages importants : Si l'analyseur a été gravement endommagé, communiquer immédiatement avec le fabricant et avec l'autorité réglementaire (Programme du travail de RHDCC ou l'administration provinciale ou territoriale compétente).

## **12. Normes canadiennes applicables aux analyseurs FRX**

### **12.1 Loi sur les dispositifs émettant des radiations (LDER)**

Santé Canada est un organisme de réglementation des dispositifs émettant des radiations et est chargé d'administrer la *Loi sur les dispositifs émettant des radiations* et son Règlement.

La *Loi sur les dispositifs émettant des radiations* régit la vente, la location ou l'importation des dispositifs émettant des radiations au Canada. Les fabricants, les distributeurs et les importateurs de dispositifs émettant des radiations ont la responsabilité de s'assurer que leurs produits sont conformes à la *Loi sur les dispositifs émettant des radiations* et à son Règlement avant qu'ils ne soient vendus, loués ou importés au Canada. Le Règlement sur les dispositifs émettant des radiations prescrit des normes de sécurité particulières qui régissent la conception, la construction et la fonction des dispositifs émettant des radiations.

Les analyseurs FRX sont des dispositifs émettant des radiations. Ils permettent de déterminer les éléments qui composent les matériaux et d'examiner leur microstructure et sont classés parmi les appareils d'analyse à rayonnement X. Ils sont régis par le Règlement sur les dispositifs émettant des radiations ainsi que par l'Annexe II, Partie XIV, Appareil d'analyse à rayonnement X. Ces documents peuvent être consultés sur les sites Web suivants :

<http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/R-1/index.html>

[http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/C.R.C.%2C\\_ch.\\_1370/index.html](http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/C.R.C.%2C_ch._1370/index.html)

### **12.2 Code canadien du travail**

Le Programme du travail de Ressources humaines et développement des compétences Canada (RHDCC) est l'organisme de réglementation chargé d'administrer et de diriger la conformité au Code canadien du travail (CCT) et à son Règlement dans la fonction publique canadienne, comme dans le reste de sa sphère de compétence, c'est-à-dire dans un rôle de responsable de la réglementation de la santé et de la sécurité au travail.

Les codes de sécurité sont incorporés par renvoi dans le CCT qui s'applique aux secteurs sous réglementation fédérale à l'échelle nationale. Les codes de sécurité préparés par Santé Canada établissent les exigences relatives à l'utilisation sécuritaire des appareils de radiographie. Ils sont destinés principalement à servir de guide aux employés des ministères et des organismes de la Fonction publique du Canada ainsi qu'aux employés qui relèvent du Code canadien du travail.



Un addenda qui s'applique aux analyseurs à fluorescence X portatifs à tube à rayons X et à faisceau ouvert relève du champ d'application du Code de sécurité 32. Le Code de sécurité 32 s'applique aux appareils d'analyse à rayonnement X. Les propriétaires d'équipement émettant des radiations ont la responsabilité ultime en matière de radioprotection associée à leur équipement.

Le Code canadien du travail et les codes de sécurité peuvent être consultés sur les sites Web suivants, respectivement :

<http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-86-304/TexteComple.html>. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/index-fra.php>

Les installations de compétence provinciale ou territoriale peuvent être soumises aux exigences de leur province ou de leur territoire. Les utilisateurs devraient communiquer avec les autorités compétentes de leur province ou de leur territoire pour connaître les détails de leurs exigences réglementaires. Voici le site Web des coordonnées des organismes de réglementation de la radioprotection provinciaux et territoriaux :

<http://http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/radiation/fpt-radprotect/members-membres-fra.php>

---

## FIN DU LIVRET

**NOTE** : Les dernières versions des formulaires et des exigences relatives à la demande sont disponibles sur le site Web de l'OCNEND de RNCAN à l'adresse <http://end.rncan.gc.ca>

**REMARQUE IMPORTANTE** : Nous conseillons aux utilisateurs d'appareils à fluorescence à rayons X auquel il est fait référence dans le présent livret de contacter l'organisme fédéral, provincial ou territorial responsable de la radioprotection pour prendre connaissance des règles d'exploitation en vigueur.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. Toute utilisation, reproduction ou distribution non autorisée serait illégale et, donc, entraînerait les sanctions prévues par la loi.

**Pour présenter une demande de certification, veuillez communiquer avec : Organisme national de certification en essais non destructifs CanmetMATÉRIAUX, Ressources naturelles Canada, gouvernement du Canada [end.rncan.gc.ca](http://end.rncan.gc.ca)  
Téléphone : 1-866-858-0473  
Courriel : [ndt-end@nrcan-rncan.gc.ca](mailto:ndt-end@nrcan-rncan.gc.ca)**