

Établir l'efficacité de détection pour les  
mesures de la contamination de surface

**Diego Estan, agent en radioprotection**

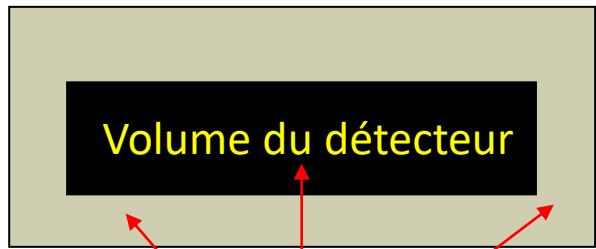
**[diego.estan@cnscccsn.gc.ca](mailto:diego.estan@cnscccsn.gc.ca)**

# Aperçu

- Pourquoi devons-nous connaître l'efficacité de détection?
- Activité minimale décelable (AMD)
- Incertitude
- L'outil de déclassement pour convertir CPM a  $\text{Bq}/\text{cm}^2$ , AMD et incertitude
- Méthodes pour mesurer/établir l'efficacité de détection

# Efficacité de détection de l'instrument

dps = désintégration par seconde = Bq  
cps = coups par seconde dans le détecteur



Toutes les émissions n'atteignent pas nécessairement le détecteur - # de Bq sur la surface ne sera pas égal au cps mesurés



# Pourquoi devons-nous connaître l'efficacité de détection?

Pour convertir les cpm en Bq ou en Bq/cm<sup>2</sup> et les comparer aux limites réglementaires :

- Limites de contamination typiques pour un permis de substances nucléaires;
  - 0,3 Bq/cm<sup>2</sup> pour tous les radionucléides de catégorie A
  - 3 Bq/cm<sup>2</sup> pour tous les radionucléides de catégorie B
  - 30 Bq/cm<sup>2</sup> pour tous les radionucléides de catégorie C; en moyenne répartie sur  $\leq 100$  cm<sup>2</sup>
- Critères de transport :
  - 4 Bq/cm<sup>2</sup> (bêta/gamma) et 0,4 Bq/cm<sup>2</sup> (alpha), en moyenne répartie sur  $\leq 300$  cm<sup>2</sup>

# Les facteurs qui affectent l'efficacité de détection?

- Distance de la source (atténuation des particules alpha/bêta dans l'air)
- Géométrie source-fenêtre du détecteur
- Épaisseur de la fenêtre/limite d'énergie (les énergies bêta sont un spectre)
- Énergie gamma (probabilité d'interaction avec le détecteur)

# Détecteurs typiques et instruments



GM fenêtre mince "pancake" -  $\alpha\beta\gamma$



scintillateur ZnS épais "Berthold LB124" -  $\alpha/\beta\gamma$



NaI mince -  $\uparrow$  énergie  $\beta$ ,  $\downarrow$  énergie  $\gamma$



ZnS mince collée a un scintillateur plastique -  $\alpha/\beta\gamma$



NaI épais -  $\uparrow$  énergie  $\gamma$

# Comment établir l'efficacité de détection?

Nous examinerons quatre méthodes différentes, en ordre de préférence sur le plan de la réglementation :

1. Source planaire traçable selon les étalons du NIST (ou équivalent à l'extérieur des É-U) où le nucléide est le même que le nucléide cible
2. Source planaire traçable où le ou les nucléides sont de bons substituts pour le nucléide cible
3. Source « artisanale » d'une activité connue (100 Bq à 1 kBq), où le nucléide est le même que le nucléide cible
4. Valeur d'efficacité publiée ou suggérée (fabriquant ou CCSN) pour le nucléide cible

REMARQUE : L'efficacité doit être vérifiée et documentée au moins une fois par année

# Efficacité de détection de l'instrument

$$Eff(\%) = \frac{(cps_{source} - cps_{bruit\ de\ fond})}{activité\ de\ la\ source(Bq)} \times 100\%$$

- Convertir coups par minute (cpm) en coups par secondes (cps); c.-à-d. divise par 60
- Utiliser l'activité totale de la source d'étalonnage (donne l'efficacité absolue de la détection 4 Pi)
- Ne pas blinder la source d'étalonnage d'aucune manière (pas de sac en plastique) (sauf si le but est d'isoler des comptes pour un type d'émission)
- Utiliser une distance uniforme et reproductible entre la source et le détecteur :  $\sim 1$  cm
- Mesurer le bruit de fond dans une zone où il n'y a aucune substance nucléaire
- Le même temps de comptage devrait être le même pour la source et le bruit de fond
- Pour les nucléides dont les produits de filiation sont de courte demi-vie ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ), tenir compte uniquement de l'activité du nucléide parent



# Convertir les cpm en activité

CPM en Bq/cm<sup>2</sup> :

$$\text{Activité non-fixée sur la surface} = \frac{N - NB}{E \times 60 \times A \times F}$$

- N = taux de comptage total en coups par minute (cpm) mesuré directement ou par frottis
- NB = taux de comptage du bruit de fond en cpm
- E = facteur d'efficacité de l'instrument
- 60 = seconde/minute
- A = surface essuyée (frottis) ou surface du détecteur en cm<sup>2</sup> (pour mesure directe)
- F = facteur de rétention du frottis - utiliser 0,1 si F n'est pas déterminé de façon expérimentale

# Activité minimale décelable (AMD)

Quantité minimale d'activité dans un échantillon qui peut être détectée avec une probabilité de 5 % de détection erronée de la radioactivité lorsqu'il n'y en a pas, et une probabilité de 5 % de ne pas détecter la radioactivité lorsqu'elle est présente.

# Calculer l'AMD

Peut être exprimée en Bq, Bq/cm<sup>2</sup>, Bq/m<sup>3</sup> ou autre unité d'intérêt

$$\text{AMD (Bq/cm}^2\text{)} = \frac{2.71 + 4.66 \sqrt{NB \times [T]_{60}}}{E \times T \times A \times F}$$

NB = bruit de fond en CPM et E/A/F = efficacité/surface/facteur de rétention

T = temps de comptage pour l'échantillon et le bruit de fond en secondes

- pour les instruments numériques avec fonction du temps intégré: temps réglé par l'opérateur
- pour débitmètre: temps typiquement 2-7 secondes (vérifier le manuel)
- pour débitmètre : temps peut être variable basé sur le taux de comptage (nouveaux détecteurs numériques)
- pour débitmètre : quelques modèles ont des fonctions « rapide » et « lent » (Ludlum Model 14C: 4/22 secondes)



# Calculer l'incertitude

$$\sigma(\text{cps}) = \sqrt{\bar{x}} = DS = \sqrt{\frac{\text{coups}_{\text{échantillon}}}{(\text{temps de comptage échantillon}(s))^2} + \frac{\text{coups}_{\text{bruit de fond}}}{(\text{temps de comptage bruit de fond}(s))^2}}$$

- Déviation standard (DS) exprimée en coups mais peut être convertie en cps si on divise par le temps, ou Bq/cm<sup>2</sup> si E et A sont considérés
- Si le résultat + 2xDS (niveau de confiance de 95 %) est supérieur aux critères, la surface mesurée devrait être considéré contaminée
- Formule pour l'incertitude en Bq/cm<sup>2</sup> si le temps de comptage (T) est le même pour l'échantillon et le bruit de fond:

$$2\sigma \text{ incertitude (Bq/cm}^2\text{)} = \pm 2 \times \frac{\sqrt{N \times [T/60] + NB \times [T/60]}}{E \times T \times A \times F}$$

# Est-ce que l'AMD est assez bas?

1. L'AMD est réglée à 0,5 fois la limite de contamination :

$$\frac{2.71 + 4.66 \sqrt{NB \times [T/60]}}{E \times T \times A \times F} \leq 0.5 \times \text{limite de contamination}$$

2. Supposons qu'une mesure type près du critère applicable est le double de la mesure du bruit de fond (c.-à-d.  $N = 2NB$ ) et que le temps de comptage  $T$  est identique pour les deux

$$\frac{2.71 + 4.66 \sqrt{NB \times [T/60]}}{E \times T \times A \times F} + 2 \times \frac{\sqrt{N \times [T/60] + NB \times [T/60]}}{E \times T \times A \times F} \leq \text{limite de contamination}$$

$$\frac{2.71 + 8.12 \sqrt{NB \times [T/60]}}{E \times T \times A \times F} \leq \text{limite de contamination}$$

# Établissement de l'AMD et conversion des CPM en Bq/cm<sup>2</sup> avec l'incertitude

Pourquoi se compliquer la vie – utiliser l'outil de déclassement!

FROTTIS - Méthode de détection		Thermo RadEye B20			Nuclide avec l'efficacité de détection la plus basse			Tc-99m			
		Bruit de fond CPM	28.6	T de comptage (sec)	120	Surface frottée (cm <sup>2</sup> )	100	Efficacité de détection (%)	0.62%	Eff du frottis (%)	10.00%
DIRECTE - Méthode of détection		Thermo RadEye B20			Nuclide avec l'efficacité de détection la plus basse			Tc-99m			
		Bruit de fond CPM	28.6	T de comptage (sec)	120	Surface du détecteur (cm <sup>2</sup> )	15.5	Efficacité de détection (%)	0.62%		
<b>RÉSULTATS DE CONTAMINATION DE SURFACE</b>											
<b>ENTRER LES VALEURS DANS LES CELLULES JAUNES - CELLULE ROUGE INDIQUE QUE LA CONTAMINATION SUR L'ÉCHANTILLON + INCERTITUDE &gt;= CRITÈRE RÉGLEMENTAIRE</b>											
FROTTIS		AMD (Bq/cm <sup>2</sup> ) = 5.101			Critère (Bq/cm <sup>2</sup> )	DIRECTE		AMD (Bq/cm <sup>2</sup> ) = 3.291			
Échantillon #	Description	Brut CPM	Bq/cm <sup>2</sup>	2σ (+/-) Bq/cm <sup>2</sup>		Échantillon #	Description	Brut CPM	Bq/cm <sup>2</sup>	2σ (+/-) Bq/cm <sup>2</sup>	
1	Echantillon 1	100	19.194	4.311	30	1	Echantillon 1	65	6.313	2.373	
2	Echantillon 2	100	19.194	4.311		2	Echantillon 2	125	16.719	3.040	
3	Echantillon 3	200	46.075	5.748		3	Echantillon 3	200	29.726	3.708	
4						4					
5						5					
6						6					
7						7					
8						8					
9						9					
10						10					
11						11					
12						12					
13						13					
14						14					
15						15					
16						16					

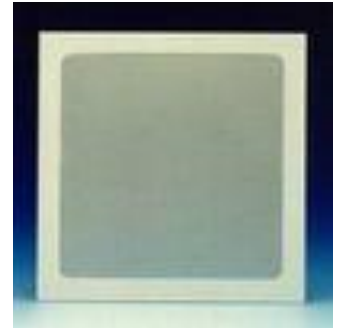
La feuille "Data – Critère ouvert" peut être copiée/collée et utilisée pour les mesures de contamination quotidienne et pour le calcul de l'AMD 14

# Établir l'efficacité de détection

Examinons les méthodes pour établir l'efficacité de détection.

# Méthode 1 – Source planaire traçable

- Si la zone couverte par la source > la zone couverte par le détecteur, établir l'activité sous le détecteur
  - Source = 100 cm<sup>2</sup>, détecteur = 15,5 cm<sup>2</sup>
  - Activité de référence = activité de la source x (15,5/100)
- Distance reproductible entre la source et le détecteur (~1 cm, utiliser un gabarit)
- L'efficacité est calculée :
$$Eff(\%) = \frac{(cps_{source} - cps_{bruit\ de\ fond})}{activité\ de\ la\ source(Bq)} \times 100\%$$
- Répéter chaque année pour tous les contaminamètres servant à quantifier la contamination de surface par rapport aux critères réglementaires



**REMARQUE : Cette méthode ne peut pas être appliquée aux isotopes médicaux de courte demi-vie en raison de l'indisponibilité de sources traçables**



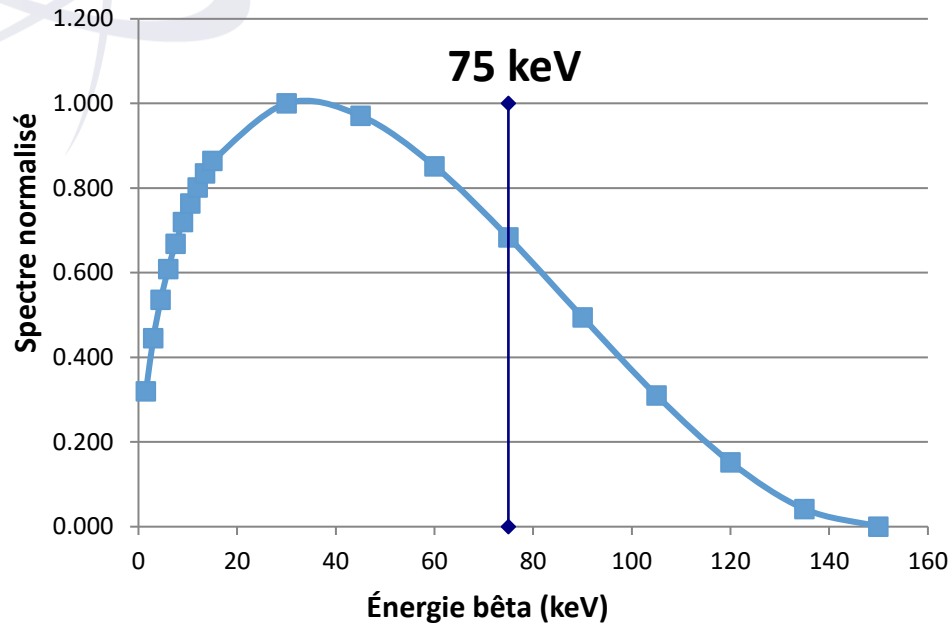
# Méthode 2 - Source planaire de substitution traçable

Les énergies doivent être le plus près possible, p. ex. :

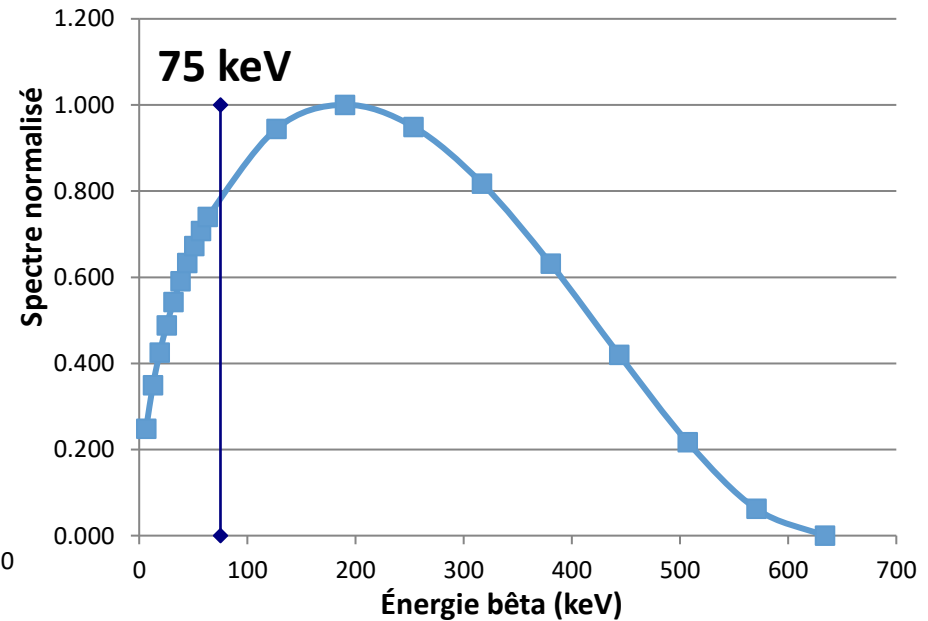
Isotope à mesurer	Énergie bêta/électron maximale	Énergie gamma (rapport de branchement)
$^{131}\text{I}$	606 keV (89 %)	364 keV (81 %)
$^{36}\text{Cl}/^{133}\text{Ba}$ -- Substitués	708 keV (100 %) -- $^{36}\text{Cl}$	356 keV (62 %) -- $^{133}\text{Ba}$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	120/138 keV (11 %)	141 keV (89 %)
$^{57}\text{Co}$ -- Substitut	115/129 keV (3,2 %)	122 keV (85 %)

# Efficacité du comptage bêta en fonction de l'énergie

Spectre simulé du  $^{14}\text{C}$   $\beta(-)$  156 keV



Spectre simulé du  $^{18}\text{F}$   $\beta(+)$  634 keV

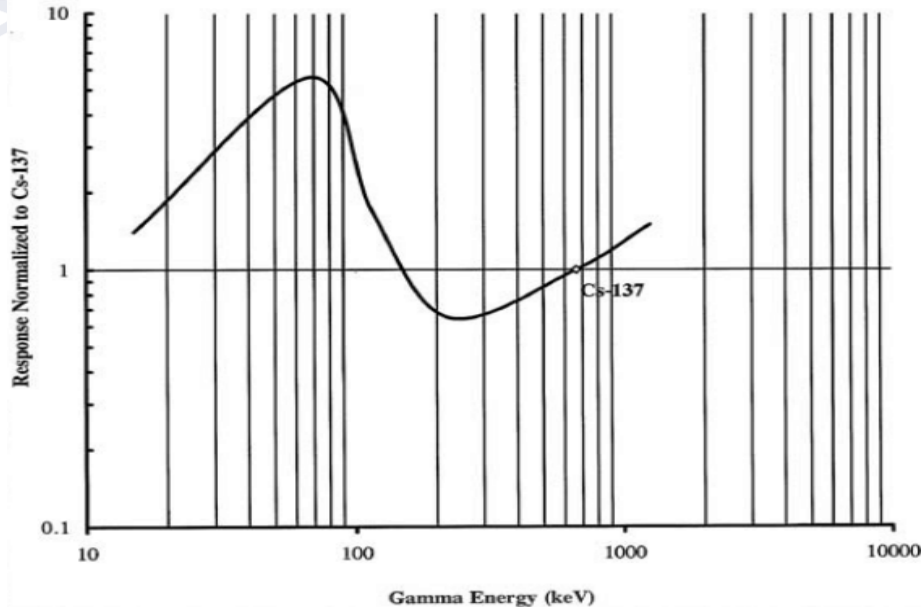


Limite d'énergie typique pour une fenêtre de Mylar sur un détecteur pancake =  $\sim 75$  keV

En général, plus l'énergie bêta augmente, plus l'efficacité augmente (pour les détecteurs sensibles au rayonnement bêta)

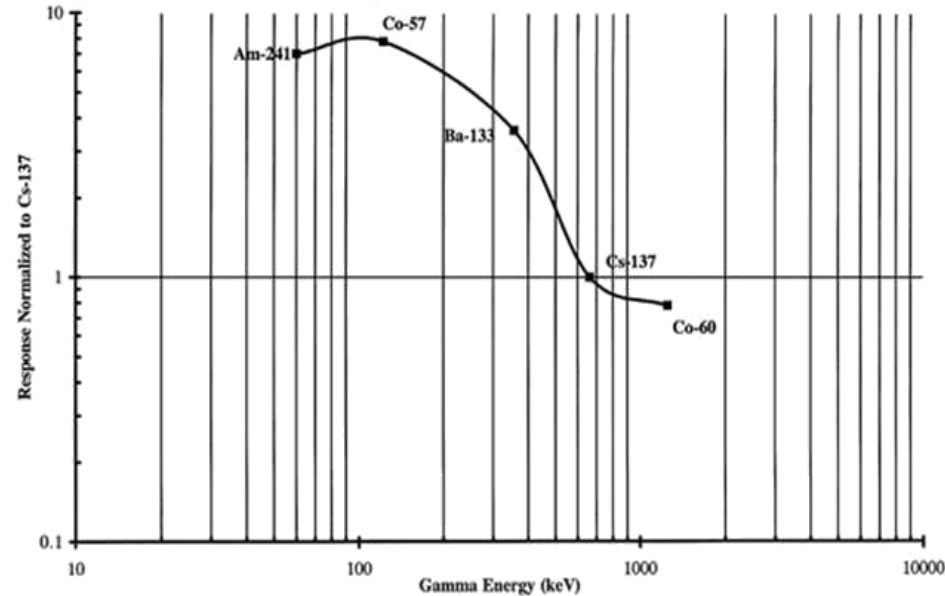
# Efficacité du comptage gamma en fonction de l'énergie

Energy Response for Ludlum Model 44-9



Détecteur GM pancake

Energy Response for Ludlum Model 19



Détecteur au NaI 1 po x 1 po

En général, plus l'énergie gamma augmente, plus l'efficacité diminue

# Méthode 2 - Source de substitution traçable – Rapport de branchement

- Corrections pour rapport de branchement entre nucléides de substitution et cible doit être appliqué lorsque les émissions  $\alpha/\beta/\gamma$  peuvent être isolée; atteint avec :
  - Le détecteur : p. ex., NaI épais sensible seulement aux  $\gamma$ , ou Ludlum 43-93 peut discriminer l' $\alpha$  du  $\beta\gamma$  (remarque : pancake GM ne peut pas discriminer  $\alpha/\beta/\gamma$ )
  - Les sources : sources de substitution différentes pour un nuclide cible (p. ex., source  $^{57}\text{Co}(\gamma)$  et source  $^{14}\text{C}(\beta)$  pour le  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , exemple à suivre)
  - Blinder la source: vérifier comptage  $\alpha/\beta/\gamma$  séparément avec le blindage (p. ex., source planaire de  $^{60}\text{Co}(\gamma\beta)$  avec/sans blindage de plastique pour isoler comptage  $\gamma/\beta$  pour le  $^{65}\text{Zn}$ , exemple à suivre)

# Méthode 2 – Exemple au moyen d'un pancake Geiger-Müller et du $^{99m}\text{Tc}$

Suivre les mêmes étapes qu'à la méthode 1, mais choisir un nucléide de substitution

Isotope à mesurer	Énergie bêta/électron maximale	Énergie gamma
$^{99m}\text{Tc}$	120/138 keV (11 %)	141 keV (89 %)
$^{57}\text{Co}$ -- Substitut (gamma)	Source conçue pour bloquer les émissions d'électrons	122 keV (85 %)
$^{14}\text{C}$ -- Substitut (bêta)	156 keV (100 %)	Aucun
Résultats		
Isotope	Efficacité mesurée	Facteur de correction appliqué
$^{57}\text{Co}$ (gamma)	0,21 %	0,21 % x (89/85) = 0,22 %
$^{14}\text{C}$ (bêta)	5,3 %	5,3 % x (11/100) = 0,58 %

Efficacité extrapolée pour le  $^{99m}\text{Tc}$  : 0,22 % + 0,58 % = 0,8 %

# Méthode 2 – Exemple au moyen d'un pancake Geiger-Müller et du $^{65}\text{Zn}$

Suivre les mêmes étapes qu'à la méthode 1, mais choisir un nucléide de substitution

Isotope à mesurer	Énergie bêta/électron maximale	Énergie gamma
$^{65}\text{Zn}$	330 keV (1,4 %)	1116 keV (51 %)
$^{60}\text{Co}$ -- Substitut (gamma)	L'utilisateur bloque les émissions bêta à l'aide de plastique (résultat = cpm gamma)	1173/1332 keV (200 %)
$^{60}\text{Co}$ -- Substitut (bêta)	318 keV (100 %)	cpm gamma soustrait par utilisateur (cpm non-blindé – cpm gamma = cpm bêta)
Résultats		
Isotope	Efficacité mesurée	Facteur de correction appliqué
$^{60}\text{Co}$ (gamma)	0,39 %	0,39 % x (51/200) = 0,1 %
$^{60}\text{Co}$ (bêta)	16,5 %	16,5 % x (1,4/100) = 0,23 %

Efficacité extrapolée pour le  $^{65}\text{Zn}$  : 0,1 % + 0,23 % = 0,33 %

# Méthode 3 – Exemple à l'aide du $^{99m}\text{Tc}$

- Suivre les mêmes étapes qu'à la méthode 1, mais une source personnalisée est produite
- 1 ml de  $^{99m}\text{Tc}$  mesuré à 1 MBq dans un calibrateur de dose (seulement un exemple)
- Option A : attendre 48 h
  - Activité désintégrée =  $1\text{E}6 \text{ Bq} \times e^{(-\ln(2)/6,02 \text{ h}) \times 48 \text{ h}} = 3,94 \text{ kBq}$
  - Prélever un échantillon dont la fraction est connue, répartir uniformément sur un frottis de  $15 \text{ cm}^2$
  - Mesurer le taux de comptage et établir l'efficacité
- Option B : diluer dans des volumes connus
  - Ajouter un volume connu d'eau pour obtenir une activité précise  $\sim \text{Bq}/\mu\text{l}$  (peut exiger de multiples étapes de dilution)
  - Prélever un échantillon dont l'activité est connue (0,1 à 1 kBq), répartir uniformément sur un frottis de  $15 \text{ cm}^2$
  - Mesurer le taux de comptage et établir l'efficacité

# Méthode 3 – Exemple à l'aide du $^{99m}\text{Tc}$

- La procédure doit être répétée annuellement, et l'efficacité doit être établie en fonction du détecteur, ou
- L'information sur l'efficacité peut être transposée immédiatement à une source-étalon de longue demi-vie (p. ex.,  $^{137}\text{Cs}$ ) pour chaque détecteur; par exemple:
  - Efficacité de 0,67 % établie au moyen d'une source décruée ou diluée de  $^{99m}\text{Tc}$  pour le détecteur 1
  - Le taux de comptage de la source-étalon de  $^{137}\text{Cs}$  est mesuré (utiliser la même distance de référence), et une efficacité de 0,16 % est établie pour le détecteur 1
  - Le rapport d'efficacité de  $0,67/0,16 = 4,2$  est utilisé pour **transposer** l'information sur le  $^{99m}\text{Tc}$  à la source de  $^{137}\text{Cs}$
  - L'information du détecteur 1 est vérifiée et consignée chaque année en fonction de la source de  $^{137}\text{Cs}$ , en multipliant le résultat d'efficacité par 4,2



# Méthode 4 – Exemple à l'aide du $^{99m}\text{Tc}$ pour un « pancake » Geiger-Müller

- Contacter votre spécialiste des permis (ou m'envoyer directement un courriel) pour obtenir une valeur d'efficacité raisonnable et prudente à utiliser pour le nucléide cible, ou
- Vérifier l'efficacité suggérée par le fabricant pour le nucléide cible
  - Par exemple, pour le  $^{99m}\text{Tc}$  : 0.5% (Ludlum publie < 1%, la CCSN suggère 0.5%)
  - Suivre le même processus qu'à la méthode 3 pour transposer l'efficacité à une source-étalon de longue demi-vie pour chaque détecteur, et vérifier/consigner chaque année (l'efficacité devrait être mise à jour si la valeur dépasse +/- 20% de la valeur initiale)

# Méthode 4 – REMARQUES

- Méthode #4 est la moins précise – SVP adopter méthode 1, 2 ou 3 si possible
- La source-étalon transposée devrait idéalement avoir les mêmes types d'émissions ( $\alpha/\beta/\gamma$ ) que le(s) nucléide(s) cible(s)
- Si l'instrument a deux détecteurs ( $\alpha$  et  $\beta/\gamma$ , p. ex. Ludlum 43-93 ou Thermo AB100), les sources-étalon transposées doivent avoir les émissions  $\alpha/\beta/\gamma$  pour vérifier et transposer l'efficacité pour les deux détecteurs
- **ATTENTION**: le fabricant peut exagérer leurs efficacités
  - Berthold LB124 publie une efficacité pour le Tc-99m de 7.9%, vérifiée expérimentalement entre 1 et 2%



Questions?

**Merci!**