

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



Vérification des dosimètres opérationnels et radiamètres

Patrice ROMANE (1), Laurent VAN-RYCKEGHEM (2)

(1) EDF CNPE Saint Alban; (2) IRSN Fontenay aux Roses

**Grandeurs
de
Protection**

**Grandeurs
Opérationnelles**

**Appareils de
Radioprotection**



 **Légifrance – Arrêté du 23 octobre 2020 – Article 17 + article R. 4451-48:**

I.- L'employeur s'assure du bon fonctionnement des instruments ou dispositifs de mesurage, des dispositifs de détection de la contamination et des dosimètres opérationnels.

II.- L'employeur procède périodiquement à la vérification de l'étalonnage de ces instruments, dispositifs et dosimètres.

La vérification de l'étalonnage est réalisée ou supervisée par **le conseiller en radioprotection**. Si nécessaire, un ajustage ou un étalonnage en fonction de l'écart constaté est réalisé selon les modalités décrites par le fabricant.



Légifrance – Arrêté du 23 octobre 2020 – Article 17 + article R. 4451-48:

Article 17 (Version en vigueur depuis le 13 décembre 2021)

L'étalonnage, sa vérification et la vérification de bon fonctionnement de l'instrumentation de radioprotection prévus à [l'article R. 4451-48 du code du travail](#) sont réalisés dans les conditions définies dans le présent article.

I. - La vérification de bon fonctionnement prévue au I. de l'article R. 4451-48 du code du travail porte sur les caractéristiques de l'appareil de mesure. Elle comprend :

1° Une vérification par l'employeur, lors de la réception du matériel, visant à s'assurer de l'adéquation de l'instrument de mesure avec la ou les gammes de mesure pour lesquelles il est utilisé et, le cas échéant, à vérifier la cohérence du mouvement propre de l'appareil ;

2° Une vérification, avant chaque utilisation, de l'alimentation électrique ainsi que de la cohérence du mouvement propre de l'appareil de mesure.

II. - La vérification périodique de l'étalonnage prévue au II de l'article R. 4451-48 du code du travail est réalisé par le conseiller en radioprotection s'il dispose des compétences et des moyens nécessaires, ou à défaut par un organisme extérieur dont le système qualité est conforme à la norme relative au management de la qualité et qui respecte les normes en vigueur relatives à l'étalonnage des appareils de détection des rayonnements ionisants.

Les instruments sont étalonnés dans la ou les gammes de grandeurs pour lesquelles ils sont utilisés.

La méthode et la périodicité de la vérification de l'étalonnage sont conformes aux prescriptions définies par l'employeur en adéquation avec l'usage qu'il fait de l'instrumentation et les recommandations de la notice d'instructions du fabricant.

Le délai entre deux vérifications ne peut excéder un an. En fonction de l'écart constaté lors d'une vérification, un ajustage ou un étalonnage est réalisé selon les modalités décrites par le fabricant.

1° → Lors de la mise en service:

Vérification de l'adéquation de l'appareil avec le poste de travail

- Connaissance des caractéristiques du poste de travail (Etude de poste)
- Courbe d'étalonnage ou coefficient d'étalonnage approprié et comportement de l'appareil selon une liste de critères à définir (Tests types)
 - Disponible dans la notice constructeur
 - Retour d'expérience, historique d'étalonnage
 - Réaliser les mesures dans le domaine approprié.

2° → Lors de chaque utilisation:

Vérification de l'alimentation électrique

Vérification du mouvement propre

II- Vérification périodique de l'étalonnage de l'instrumentation de radioprotection

Organisme extérieur (ou pas) dont le système qualité est conforme à la norme relative au management de la qualité et qui respecte les normes en vigueur relatives à l'étalonnage des appareils de détection des rayonnements ionisants

Organisme extérieur (ISO9001 ou ISO 17025) = besoin de traçabilité

Méthode de vérification en adéquation avec les normes techniques d'étalonnage (ISO 4037, 6980, 8529, 12789,...)

*Les instruments sont étalonnés **dans la ou les gammes de grandeurs** pour lesquelles ils sont utilisés.*

Etude du poste de travail est un des éléments d'entrée pour l'étalonnage de l'appareil.

La méthode et la périodicité de la vérification de l'étalonnage sont conformes aux prescriptions définies par l'employeur en adéquation avec l'usage qu'il fait de l'instrumentation et les recommandations de la notice du fabricant.

En fonction de l'usage de l'appareil → Choix de la méthode de vérification et de sa périodicité (inférieure à 1 an)

Périodicité annuelle ou moins pour la vérification d'étalonnage.

II- Vérification périodique de l'étalonnage de l'instrumentation de radioprotection

Qu'est ce qu'une vérification périodique de l'étalonnage ? (extrait du Q/R DGT de Arrêté du 23 octobre 2020 mesurages et vérifications RI mis à jour en mars 2022)

L'article R. 4451-48 dispose que la « vérification de l'étalonnage » est réalisée ou supervisée par le conseiller en radioprotection. ***Cette vérification réglementaire est une vérification de la performance de mesure de l'instrument pour identifier d'éventuelles dérives de la mesure par rapport à des limites d'acceptation prédéfinies (erreurs maximales tolérées).*** Si un écart par rapport aux limites d'acceptation prédéfinies est mis en évidence lors de cette vérification, un ajustage ou un étalonnage en fonction de l'écart constaté est à réaliser selon les modalités décrites par le fabricant. Cette vérification réglementaire est réalisée sous la responsabilité technique du CRP qui doit prendre en considération l'utilisation de l'instrument de mesure dans son établissement, la gamme de mesure par rapport aux sources de RI présentes, ainsi que les enjeux de radioprotection associés afin de pouvoir définir la périodicité de cette vérification, ainsi que les bons moyens techniques à utiliser (source de référence, appareils en doublon...). L'employeur peut faire le choix de confier cette vérification à un intervenant spécialisé qualifié disposant des moyens techniques nécessaires (pas d'obligation de faire appel à un organisme accrédité, au fabricant ou autres). Dans ce cas, le CRP désigné par l'employeur supervisera cette vérification **en donnant toutes les consignes liées à l'utilisation de l'instrument de mesure dans son établissement (type de rayonnements ou radionucléides recherchés...)** nécessaires pour comparer le résultat de mesure à une source de référence adaptée à sa situation.

Quelques définitions

- **Vérification (norme NF ISO/CEI GUIDE 99 aout 2011)** : Fourniture de preuve tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées
- **EMT** : Erreur Maximale Tolérée qui est définie par l'utilisateur comme étant la plus grande erreur qu'il est prêt à accepter (ex : 20% usuellement en radioprotection)
- **Etalon de référence (norme NF ISO/CEI GUIDE 99 aout 2011)** : Etalon conçu pour l'étalonnage d'autres étalons de grandeurs de même nature dans une organisation donnée ou en un lieu donné
- **Etalon de travail (norme NF ISO/CEI GUIDE 99 aout 2011)** : Etalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des instruments de mesure ou des systèmes de mesure

Installations de référence traçable: Organisation d'une chaîne métrologique

Etalon primaire
Dosimètre de référence
Dosimètre absolu

Etalon secondaire
Dosimètre de transfert
Dosimètre relatif

Etalon de travail
Dosimètre de transfert
Appareil de terrain



Laboratoire National de Métrologie
(détient les conditions d'étalonnage traçables)
Grandeurs opérationnelles connus à l'incertitudes près
= meilleurs estimateurs nationaux
de l'écart avec **les grandeurs de protection**

Laboratoire d'étalonnage
(détient les conditions d'étalonnage traçables)
Grandeurs opérationnelles connus à l'incertitudes près
= estimateurs de l'écart avec **les grandeurs de protection**

Laboratoire utilisateur ou Laboratoire de terrain
(détient l'appareil étalonné)
Indicateur de la **grandeur opérationnelle** traçable

Objectif de l'opération d'étalonnage = obtenir la traçabilité des indications de l'appareil en termes d'équivalent de dose de la référence nationale à la mesure sur le terrain

Installations de référence traçable: Chaine métrologique Française

Etalon primaire

Laboratoire National de Métrologie (LNM - domaine: RI)
Exemple: Photon, bêta: CEA-LNHB
Neutron: LNE-IRSN

Etalon secondaire



Transfert de grandeur
de référence
→ Raccordement

Laboratoire d'étalonnage accrédité
ISO 17025: liste sur www.cofrac.fr

Etalon de travail



Transfert de grandeur
de référence
→ Raccordement

Laboratoire utilisateur (Labo)
Poste de travail

**Objectif du laboratoire utilisateur =
maintenir la traçabilité de son parc d'appareil en termes d'équivalent de dose
de la référence nationale (LNM) à la mesure sur le terrain (Labo)**



SFRP
Société Française de Radioprotection

II- Vérification périodique de l'étalonnage (VPE) de l'instrumentation de radioprotection

Modalités de réalisation de la vérification périodique de l'étalonnage :

- Réalisée par le CRP ou sa supervision s'il fait appel à un autre organisme
- Guidées par des éléments essentiels :
 - la configuration du poste de travail: spectre en énergie, domaine d'émission (i.e : étendue débit d'équivalent de dose produit) du champ de rayonnement ionisant;
 - Les caractéristiques de l'appareil: Etendue de mesure, réponse en énergie à vérifier;
 - Adapter la fréquence de VP aux enjeux RP (annuel au maximum) ;
 - Cette VP doit être tracée: accès à des preuves tangibles;



Permettre au CRP d'établir un programme de vérification pertinent pour son parc d'instruments vis-à-vis des différents postes de travail identifiés

En fonction des enjeux de radioprotection de l'installation, et la bonne connaissance de l'instrument, le CRP réalise ou fait réaliser une série de mesure par gamme de débit, d'angle, d'énergie.

- Il ne s'agit pas forcément d'un étalonnage complet
Le CRP peut décider de restreindre son étendu de mesure pour la vérification en fonction de sa connaissance du couple installation/instrument, à condition d'apporter les preuves documentées. La détermination de la fonction de réponse de l'appareil est alors un prérequis au VPE.

Etablir le programme de VPE

➔ **Optimiser l'opération de vérification périodique = connaissances**

- des caractéristiques de l'appareil: **Notice constructeur + Etudes et tests préliminaires pour élargir le domaine de validité de l'étalonnage de l'appareil.**

- des configurations d'irradiation: **Etude de poste**



Eléments de décisions pour définir la ou les configuration(s) de vérification de l'appareil associée à sa périodicité.

- Les **appareils** doivent donner une indication en temps réel, de la **grandeur opérationnelle**, perceptible directement par l'opérateur pour vérifier le respect des **limites d'exposition**.
- Ces équipements doivent être conçus pour la surveillance et l'évaluation des doses de rayonnements externes reçues par les travailleurs ou la population.
 - Indication de la dose (**grandeur opérationnelle** : équivalent de dose),
 - Présence d'un signal d'alarme sonore et/ou visuel
Obligatoire pour le dosimètre opérationnel
 - Report éventuel des indications de mesures



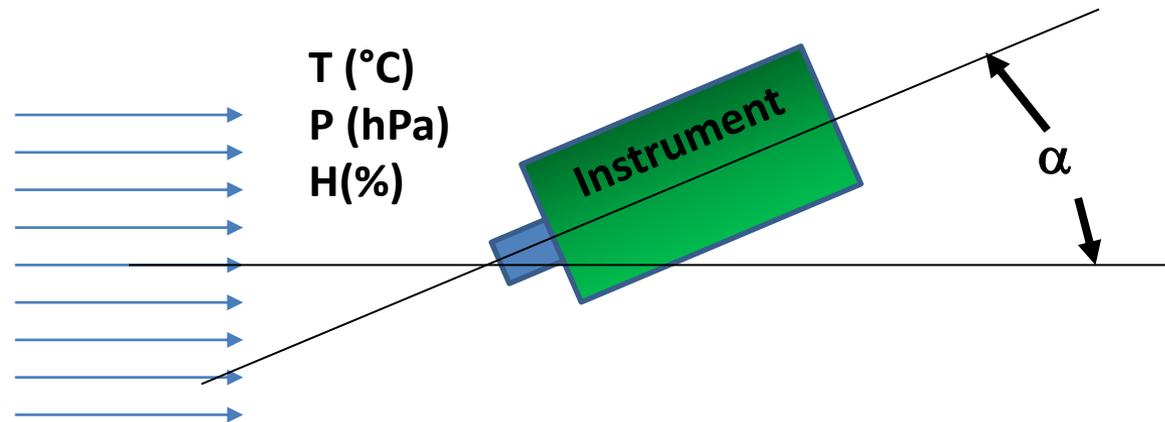
Indication fiable de la dose = Indication traçable*

* Traçabilité établit en termes de grandeur de référence par l'intermédiaire du coefficient « *N* »

Définition: l'étalonnage d'un instrument

Coefficient d'étalonnage « N »

- Ensemble des opérations établissant, dans des **conditions spécifiques***, la relation N entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure et les valeurs connues correspondantes d'une valeur mesurée et fournies par un étalon.



* Energie du rayonnement, angle d'incidence du rayonnement (α), linéarité, conditions externes (CEM, hygrométrie, température, pression, choc,...)

Validité de la traçabilité de l'étalonnage (Etablissement, suivi)

Le coefficient d'étalonnage, N , est valide **uniquement** pour une « qualité » de rayonnement (critères: énergie, angle, gamme de débit, autres grandeurs d'influence) donnée.

Elargir le domaine de validité du coefficient d'étalonnage **nécessite** de réaliser les **tests préliminaires**:

Reproductibilité, répétabilité,

Linéarité (débit de dose)

Fonction de réponse en énergie, en angle

Test d'alarme,

Test CEM

Choc



Etablir l'indépendance de « N » vis-à-vis des tests types



Suivi pertinent de cette validité de « N »

- Exemple de base de travail = norme CEI , exemple CEI 61526 :
«Instrumentation pour la radioprotection - Mesure des équivalents de dose individuels $H_p(10)$ et $H_p(0,07)$ pour les rayonnements X, γ et β - Dosimètre personnel à lecture directe d'équivalent de dose et/ou de débit d'équivalent de dose»  paragraphe 6.

Tests de performance en laboratoire répondant aux exigences - normes CEI
Description détaillée des tests à réaliser.

La production des rayonnements photoniques X et γ et leur caractérisation sont décrites dans la norme ISO 4037 partie 1, 2, 3, 4.

Extrait d'un test de performance à réaliser en laboratoire pour un dosimètres à lecture directe:

extrait de CEI 61526: 2010

Table 4 – Radiation characteristics of $H_p(0,07)$ dosimeters for X, gamma and beta radiation

Line	Characteristic under test or influence quantity	Minimum rated range of influence quantity	Limit of variation of instrument parameter or relative response for whole rated range	Sub-clause
1	Variation of the relative response due to dose and dose rate	1 mSv to 10 Sv and $5 \mu\text{Sv h}^{-1}$ to 1 Sv h^{-1} ^{a)} for personal dose equivalent	-17 % to +25 % ^{b)} dose equivalent meter	9.3
2	Statistical fluctuation, v : dose equivalent $H_p(0,07)$ for X, gamma and beta radiation	$H_0 \leq H < 11 H_0$ $H \geq 11 H_0$	$(16 - H / (H_0)) \%$ 5 %	9.3
3	Statistical fluctuation, v : dose equivalent rate $\dot{H}_p(0,07)$ for X, gamma and beta radiation	$\dot{H} < 100 \mu\text{Sv h}^{-1}$ $100 \mu\text{Sv h}^{-1} \leq \dot{H} < 600 \mu\text{Sv h}^{-1}$ $\dot{H} \geq 600 \mu\text{Sv h}^{-1}$	20 % $(21 - \dot{H} / (100 \mu\text{Sv h}^{-1})) \%$ 15 %	9.3
4	X and gamma radiation energy and angle of incidence	20 keV to 150 keV and 0° to 60° from reference direction	-29 % to +67 % ^{c)} E < 50 keV: -33 % to +100 % ^{c)}	9.4.1

Extrait d'un test de performance à réaliser en laboratoire pour un appareil de dosimétrie d'ambiance:

L'appareil est placé dans les champs de rayonnement pour un même débit d'équivalent de dose, $H^*(10)$.

Production des énergies suivantes issues de la série ISO 4037, faible débit de kerma dans l'air:

- 48 keV(N-60) ou 48 keV(L-55);
- 65 keV(N-80) ou 60 keV(L-70) ou 59,5 keV(Am-241).
- 83 keV(N-100) ou 87 keV(L-100);
- 100 keV(N-120) ou 109 keV(L-125);
- 118 keV(N-150);
- 164 keV(N-200) ou 149 keV(L-170);
- 208 keV(N-250) ou 211 keV(L-240);
- 662 keV(Cs-137);
- 1 250 keV(Co-60).

Le coefficient d'étalonnage, N , est indépendant et valide pour des domaines définis en:

- débit de dose (linéarité, reproductibilité);
- énergie (fonction de réponse « plate »);
- angle (isotropie);
- autres grandeurs d'influences ;
(CEM, T, P, H, vibrations,...)

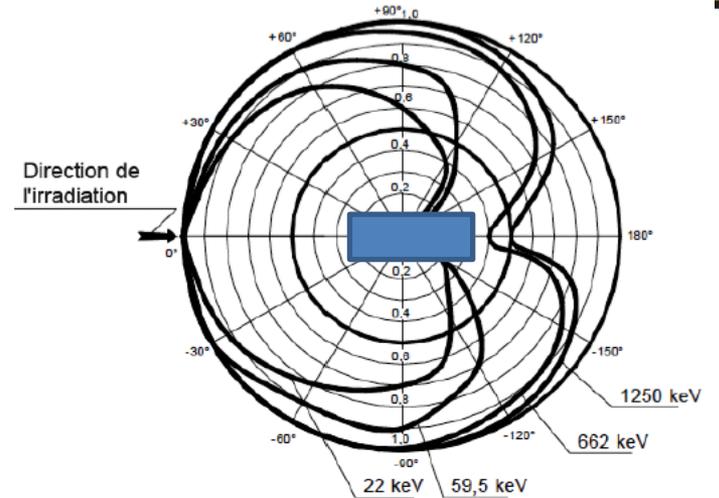
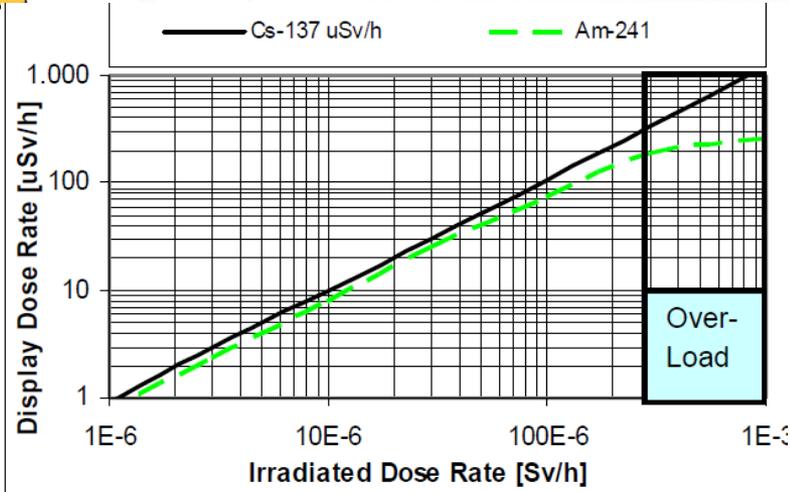


Indicateurs pour l'optimisation d'un programme de VPE.

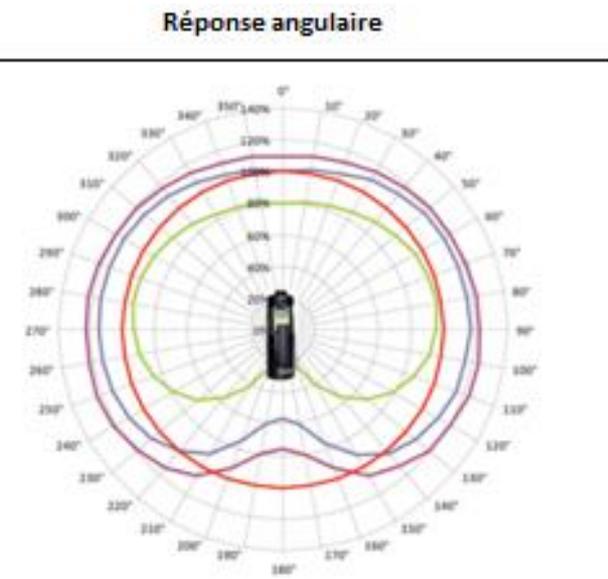
Notices constructeurs (exemples)

Réelle [mSv/h] Nominal [mSv/h]	Lue [mSv/h] Actual [mSv/h]	Ecart [%] Deviation [%]	Temps de mesure [s] Measuring time	Limite de tolérance [%] Tolerance Limit [%]
0,80	0,78	-2,2	25	20
8,00	7,86	-1,7	5	20
50,00	48,99	-2,0	5	20
80,00	79,50	-0,6	5	20

Notices constructeurs et étalonnages (exemples)



Gamme d'énergie	Gamme de débit d'équivalent de dose
15 KeV - 1,5 MeV	10 nSv/h - 100 $\mu\text{Sv/h}$



➔ Optimiser l'opération de vérification périodique = connaissances

- des caractéristiques de l'appareil: **Etudes et tests préliminaires** pour élargir le domaine de validité de l'étalonnage de l'appareil.
- des configurations d'irradiation: **Etude de poste**



Eléments de décisions pour définir la ou les configuration(s) de vérification de l'appareil associée à sa périodicité.

Pistes pour les études de poste:

- Etablir les différentes familles de configuration d'irradiation
- Elaborer un parc d'instruments compatibles avec les usages des travailleurs au poste.
- Le parc d'instrument doit être capable d'évaluer correctement toutes les situations d'exposition du travailleur (Energie, angle, débit grandeur,...).



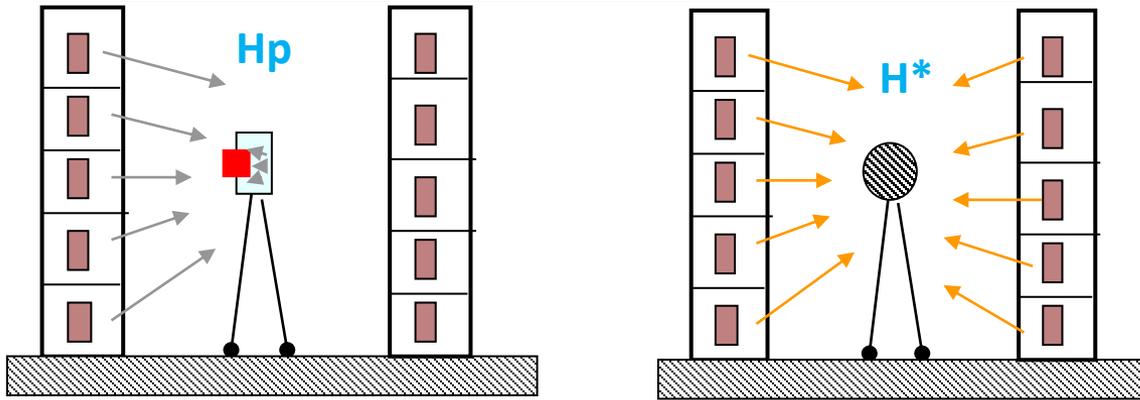
Bonne caractérisation du poste de travail = bonne radioprotection au poste

Idées

- Caractéristiques du champ de rayonnement: spectrométrie (X, γ ou n), débit
- Géométrie du champ de rayonnement: distance, angle solide
- Conditions atmosphériques du poste
- Choisir le fantôme approprié pour simuler expérimentalement la grandeur ciblée ($H^*(10)$; $H_p(10)$; $H_p(3)$; $H_p(0,07)$)

Connaissances des postes de travail (EXEMPLES)

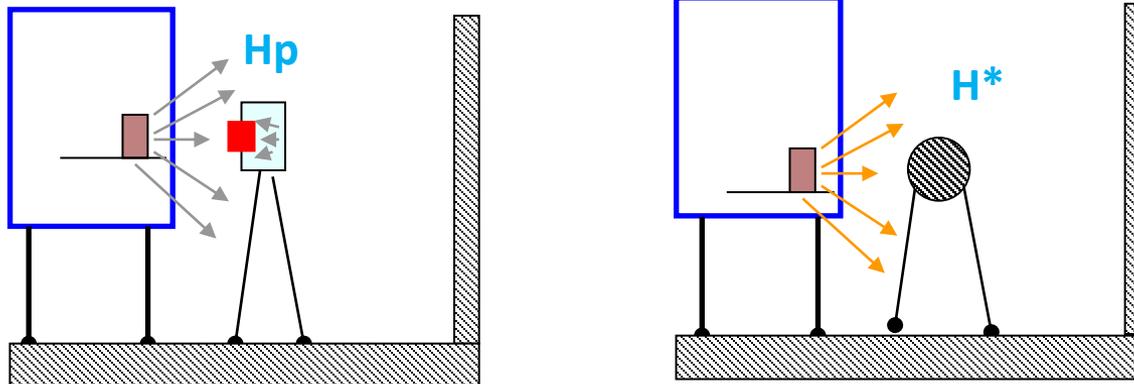
Stockage: champ de rayonnement multidirectionnel 4π



Caractérisation spectrométrique et dosimétrique des postes de travail



Boîtes à gants champ de rayonnement 2π



Adapter l'instrumentation aux caractéristiques du rayonnement rencontré (spectre, étalonnage, direction,...) et de la grandeur souhaitée.

➔ **Optimiser l'opération de vérification périodique = connaissances**

- des caractéristiques de l'appareil: **Etudes et tests préliminaires** pour élargir le domaine de validité de l'étalonnage de l'appareil.
- des configurations d'irradiation: **Etude de poste**



Eléments de décisions pour définir la ou les configuration(s) de vérification de l'appareil associée à sa périodicité.

Choix des appareils en fonction de la situation

Connaissance du Poste de travail

Connaissance des appareils du parc



- Appareil adapté
- Programme des VPE et périodicités

LINAC



Neutron



H^* (10)

Photon



Irradiateur Cobalt



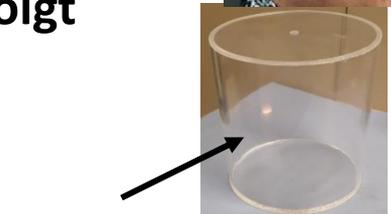
$H_p(10)$
 $H_p(0,07)$
 $H_p(3)$



Fantômes



Poignet **Doigt**



Tronc

Cristallin

Éléments de décision du programme de vérifications périodiques (VP) d'étalonnage

Exemple: suivi de l'étalonnage d'un appareil sur +10 ans

Date	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Gamme	Coefficient d'étalonnage												
	N												
Rayons X, L-70, E=60 keV													
[μSv/h]	[μSv.h ⁻¹ /"μSv/h"]												
100		1,07	1,01	1,02	1,07	1,06		1,05		1,10			1,12
1000		0,98	0,99	0,94	1,03	1,01		1,02		0,98			1,08
Rayons X, N-80, E=65 keV													
[mSv/h]	[mSv.h ⁻¹ /"mSv/h"]												
10		1,04	0,99	1,06	1,03	1,04		1,02		1,00			1,04
Rayons X, L-170, E=149 keV													
[μSv/h]	[μSv.h ⁻¹ /"μSv/h"]												
100	1,06	1,11	1,08	1,08	1,12	1,11		1,11		1,12			1,16
1000		1,04	1,04	1,04	1,04	1,05		1,09		1,07			1,13

Pour une même énergie: Ecart identifiés sur les débits les plus faibles;

-> sur cette exemple: Favoriser les VPE sur les gammes faibles débits

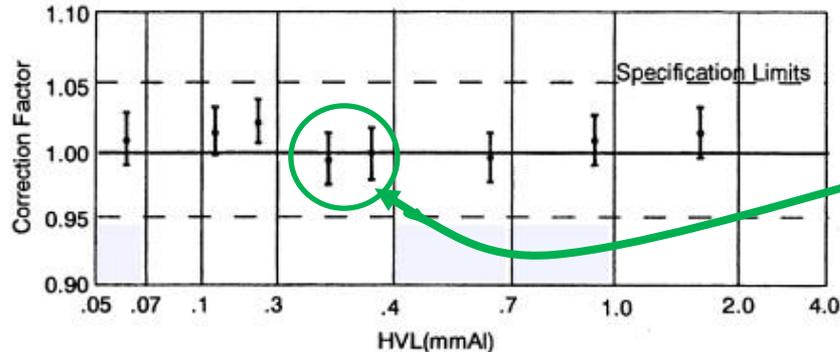
Éléments de décision du programme des vérifications périodiques (VP) d'étalonnage

Autre exemple



Notice constructeur

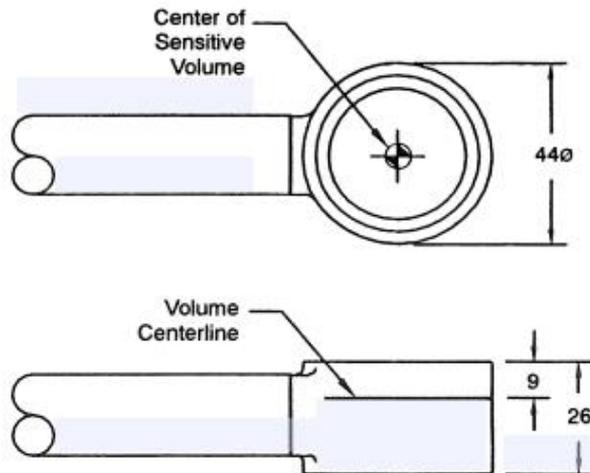
Chamber Energy Dependence



Utilisation

- Générateur X 16 keV => CDA 0,38Al
 - Mesures en Kerma (débit et intégration)
- Configuration de VP à donner au labo d'étalonnage: 0,38Al K_{air} et K_{air}
- Carte de contrôle: EMT : Ref +/- 5%

Extrait du Rapport



Calibration date :	2022-11-02					
This chamber has been adjusted before its calibration :				no		
Coefficients d'étalonnage en débit de kerma dans l'air et en kerma dans l'air						
Fonctions: RATE ET EXPOSURE	sans					
Calibration factors in air kerma rate and air kerma						
Fonctions: RATE and EXPOSURE	none					
	Lc	G		N, (incertitude) N, (uncertainty)		
	219,3	'μGy/s'	211,9	μGy/s	0,966	(μGy/s)/('μGy/s')
						(2,4 %)
	26,3	'mGy'	25,43	mGy	0,968	mGy/'mGy'
						(2,4 %)

Eléments du rapport de VPE RX de 16 keV/ CDA à 0,38AI

Configuration d'irradiation

- Détail sur la géométrie
- Conditions T, P, H
- Caractéristiques champs RI:

Haute tension / High voltage (kV)	30
Intensité du faisceau / Beam intensity (mA)	20,0
Filtration inhérente / Inherent filtration (mm)	1 Be
Filtration additionnelle / Additional filtration (mm)	0,06 Mo
Distance foyer-point d'étalonnage / Distance from focus to calibration point (mm)	1500
Diamètre du champ / Field diameter (cm)	48
Couche de demi-atténuation / Half value layer (mm)	0,38 Al
Energie efficace / effective energy (keV)	16
Débit de kerma dans l'air / Air kerma rate (Gy/s)	2,119E-04
Incertitude globale sur la valeur relative du débit de kerma dans l'air / Relative uncertainty of the air kerma rate (%)	2,1

Résultats numériques

- Date
- Liste des étalons et méthodes utilisés: traçabilité-incertitude
- N° de série de l'appareil,
- Paramètres utilisés et fixes

	N, (incertitude)
	N, (uncertainty)
0,966	($\mu\text{Gy/s}$) / ($'\mu\text{Gy/s}'$)
	(2,4 %)
0,968	mGy / 'mGy'
	(2,4 %)

Résultats conformité

- Date
- Désignation client
- Liaison avec les résultats
- Carte de contrôle (EMT)
- Critères
- Jugement conformité:
 - Conforme
 - Non conforme
 - Conforme après intervention

Laboratoire d'étalonnage 'photon et beta'



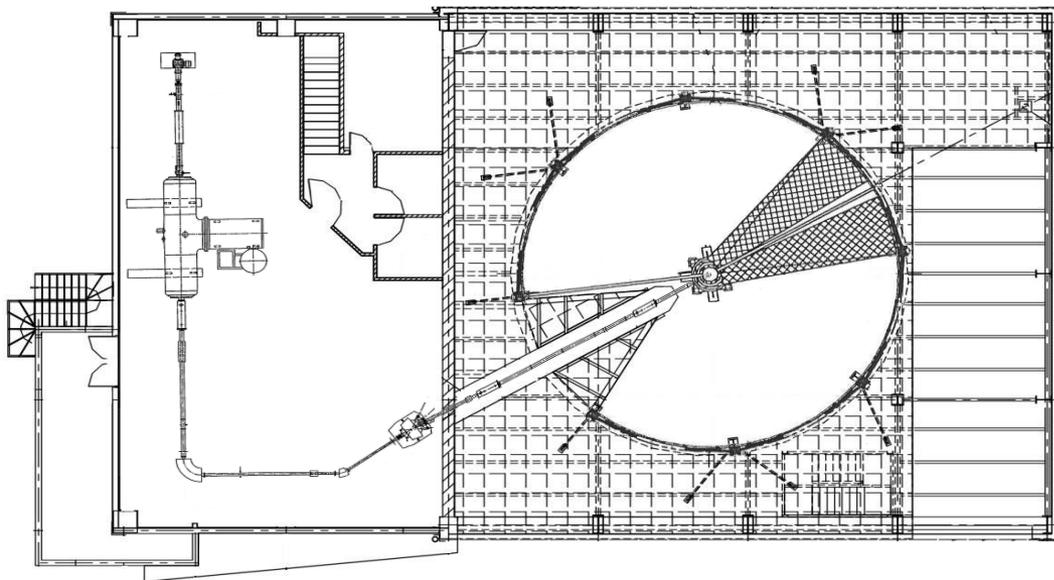
Laboratoire d'étalonnage
(Raccordé au LNM exemple pour les
champs photons : LNHB - CEA)

- Générateur X: 160 kV : $8 \text{ keV} < E < 48 \text{ keV}$
- Générateur X : 320 kV : $48 \text{ keV} < E < 250 \text{ keV}$
- Gamma multi-source irradiateur (^{60}Co et ^{137}Cs)
- β multi-source irradiateur (^{85}Kr , ^{90}Sr et ^{147}Pm)

Laboratoire Accredité

Moyens: Plateforme d'irradiation

Laboratoire d'étalonnage 'neutron'



Accélérateur tandem de 2MV (p,d) + cibles
neutrons monoénergétiques 2 keV–20 MeV

Faibles doses

- Référence primaire neutron (*labo associé au LNE*)
- Caractérisation et étalonnage d'instruments pour la radioprotection



LINAC

- Photons : 4 - 10 - 18 MV
- Electrons : 4 - 6 - 8 - 10 - 12 MeV

Conclusion: Les contrôles, les moyens, les périodicités

1- Contrôle de bon fonctionnement

Mise sous tension de l'appareil, mouvement propre

Lors de chaque utilisation

2- Bonne pratique: Contrôle périodique du taux de comptage

Source radioactive (configuration reproductible)

Annuel et obligatoire avant utilisation si l'appareil n'a pas été utilisé depuis plus de 1 mois !

3- Vérification périodique de l'étalonnage

Source étalon (traçable) de rayonnement ionisant

(Système International, ISO 9001, ISO 17025)

Annuelle