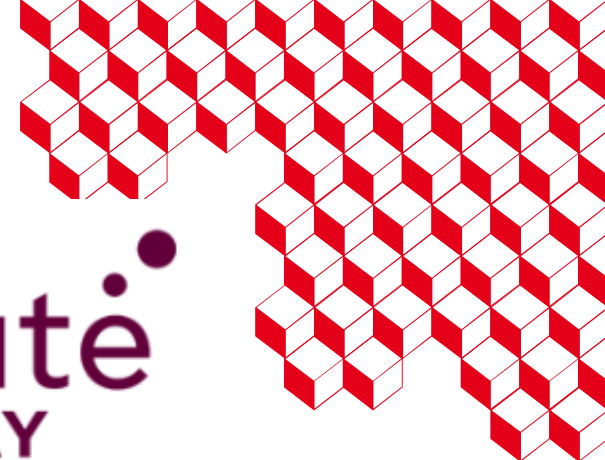


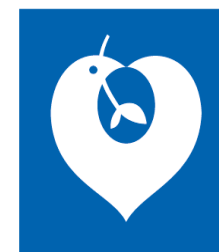


Traçabilité de la dosimétrie en mammographie

Journées des LARD

1-2 Juillet 2025

[M. DJAROUM](#), J. LEFEVRE, J. PLAGNARD, J.M. BORDY, I. FITTON et C. VAN NGOC TY



**Hôpital européen
Georges-Pompidou
AP-HP**



1. ■ CONTEXTE

Définitions

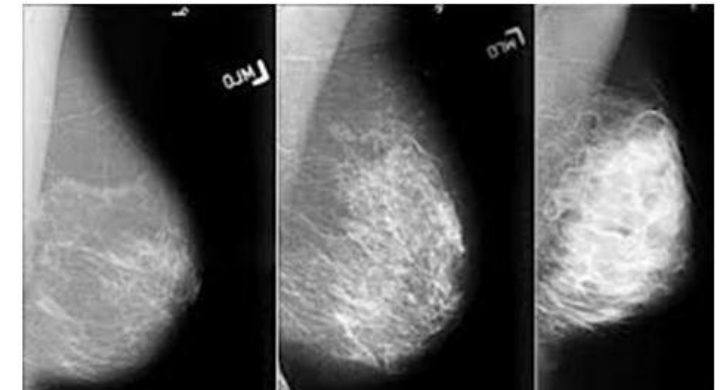
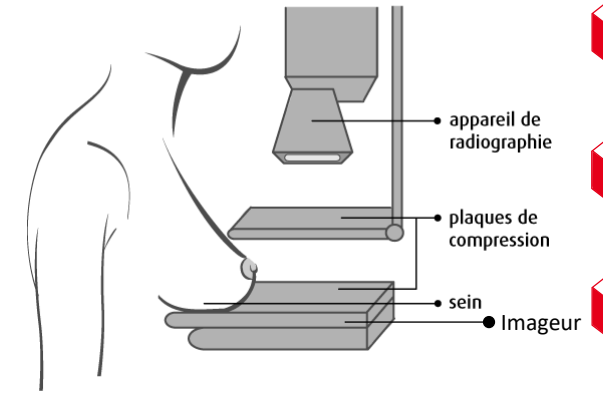
Mammographie: examen clé du sein

- Technique d'imagerie par rayons X à faible énergie [20-50] kV pour la détection du cancer chez les femmes.

Déroulement de la mammographie

- Positionnement**
Le sein est positionné sur l'imageur.
- Compression**
Le sein est comprimé à l'aide d'une pelle de compression pour une meilleure visibilité du tissu mammaire.

Mammographie



Clichés de mammographie

Dosimétrie en mammographie

Recommandation de la CIPR , 1987. Utilisation de la Dose Glandulaire Moyenne (D_G)
Moyenne (D_G) [mGy] pour la dosimétrie du sein.

$$D_G = K_a \cdot \prod_i k_i \quad [\text{mGy}]$$

K_a : kerma dans l'air mesuré périodiquement dans le cadre du contrôle qualité des mammographes

$\prod k_i$: Facteurs de conversion estimés par simulation Monte Carlo

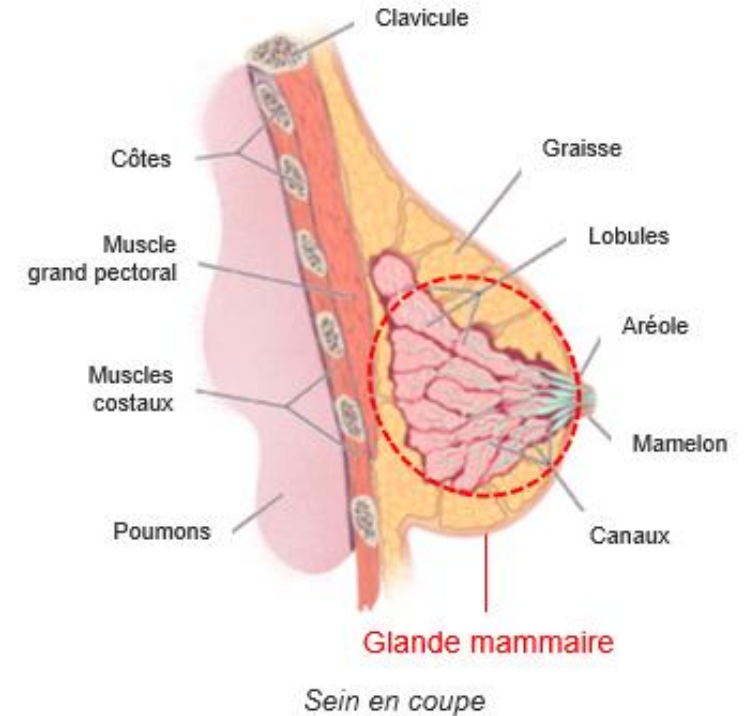
Principe ALARA

Minimiser la dose de rayonnement sans compromettre la qualité du diagnostic.

Paramètre influençant la mesure de dose en mammographie

Géométrie du sein : épaisseur et composition

Faisceaux de rayons X utilisés (THT, anode, filtration)

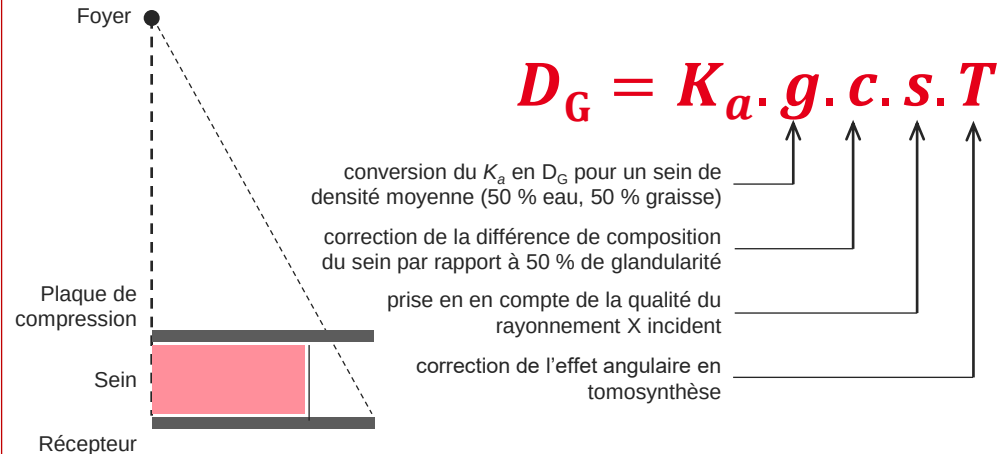




2. OBJECTIF

Problématique & Objectif

Mesure indirecte de la D_G

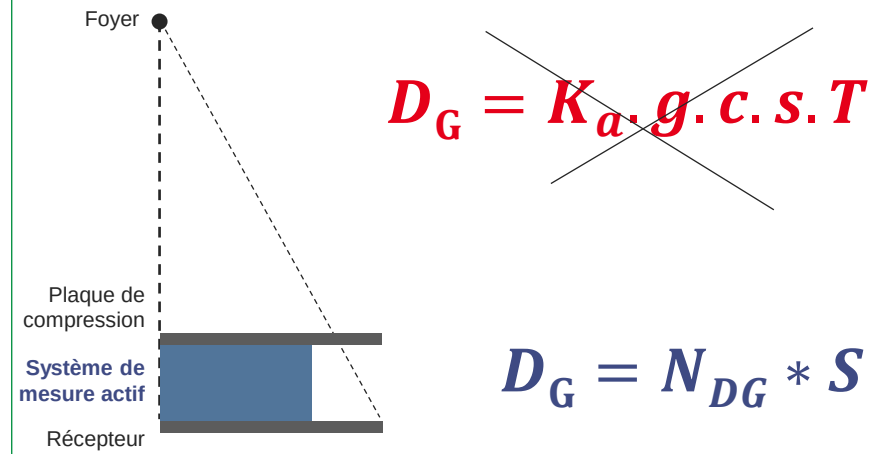


Modèle de Dance et al. pour calculer la D_G

- Modèles théoriques de D_G (Dance, Boone, etc.) basés sur des **hypothèses anatomiques moyennes**
- **Affichage de la D_G sur le mammographe basée sur une évaluation analytique du K_a**

Erreur systématique dans l'évaluation de la D_G

Mesure directe de la D_G



Développer un système de mesure directe, traçable et fiable pour améliorer la justesse et la précision de la mesure de D_G



3. METHODOLOGIE

1. Mesures physiques

1.1 Sélection des faisceaux cliniques de référence

- ▶ 15 faisceaux du mammographe Hologic Selenia® Dimensions® de l'HEGP

1.2 Caractérisation des faisceaux de référence à l'HEGP

- ▶ Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.3 Reproduction des faisceaux de référence au LNHB

- ▶ Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.4 Etalonnage d'une chambre de transfert (Radcal 10X6-6M) sur les faisceaux du LNHB

- ▶ Mesures des coefficients d'étalonnage (N_k) de la chambre de transfert en termes de K_a avec la chambre à paroi d'air WK07 du LNHB (étalon de référence primaire pour la dosimétrie des RX de basses énergies)

1.5 Mesures du K_a dans les conditions du contrôle qualité et conversion en D_G via les facteurs c, g et s du modèle de Dance

1.6 Mesures des profils de dose avec des films GAFCHROMICS



Modèle de mammographe numérique utilisé à l'HEGP

W/Ag	W/Al	W/Rh
22 kV	25 kV	22 kV
28 kV	30 kV	25 kV
32 kV	35 kV	28 kV
36 kV	40 kV	33 kV
39 kV	49 kV	39 kV

Qualités de rayonnement (anode/filtration) retenues pour cette étude

01/07/2025

1. Mesures physiques

1.1 Sélection des faisceaux cliniques de référence

- 15 faisceaux du mammographe Hologic Selenia® Dimensions® de l'HEGP

1.2 Caractérisation des faisceaux de référence à l'HEGP

- Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.3 Reproduction des faisceaux de référence au LNHB

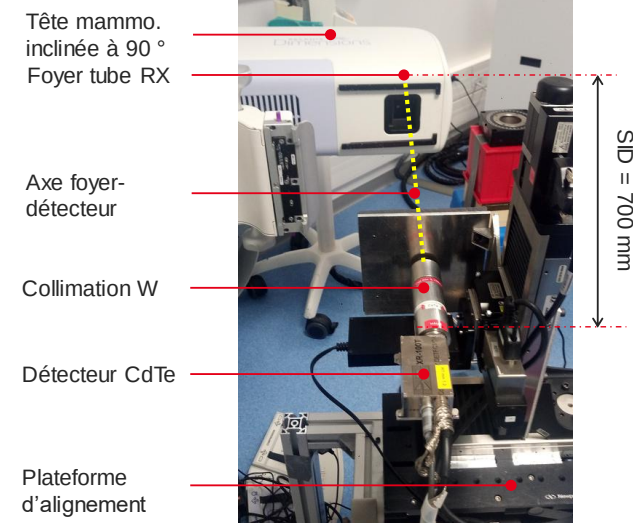
- Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.4 Etalonnage d'une chambre de transfert (Radcal 10X6-6M) sur les faisceaux du LNHB

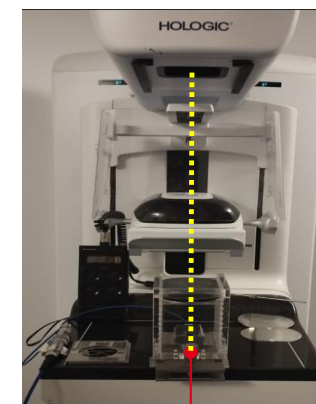
- Mesures des coefficients d'étalonnage (N_k) de la chambre de transfert en termes de K_a avec la chambre à paroi d'air WK07 du LNHB (étalon de référence primaire pour la dosimétrie des RX de basses énergies)

1.5 Mesures du K_a dans les conditions du contrôle qualité et conversion en D_G via les facteurs c, g et s du modèle de Dance

1.6 Mesures des profils de dose avec des films GAFCHROMICS



Dispositifs utilisés à l'HEGP pour les mesures de spectrométrie d'émission RX (haut) et de CDA (bas).



Plateforme inclinable support pour écrans AI et détecteur PTW 23342



1. Mesures physiques

1.1 Sélection des faisceaux cliniques de référence

► 15 faisceaux du mammographe Hologic Selenia® Dimensions® de l'HEGP

1.2 Caractérisation des faisceaux de référence à l'HEGP

► Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.3 Reproduction des faisceaux de référence au LNHB

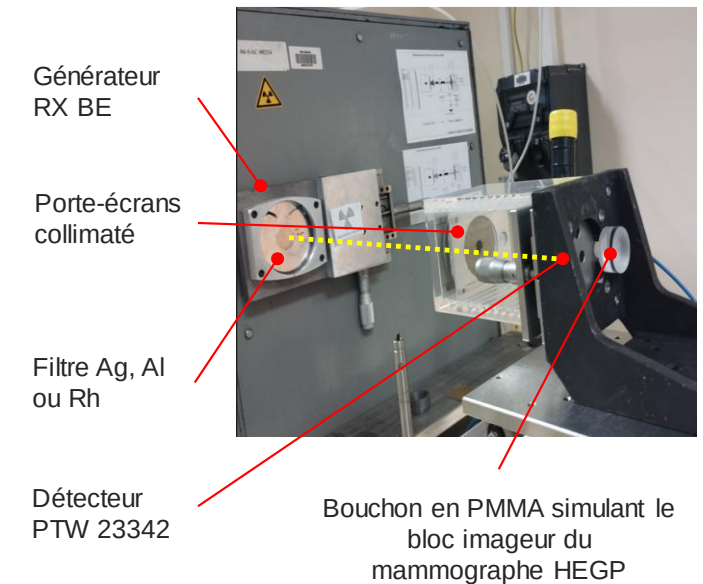
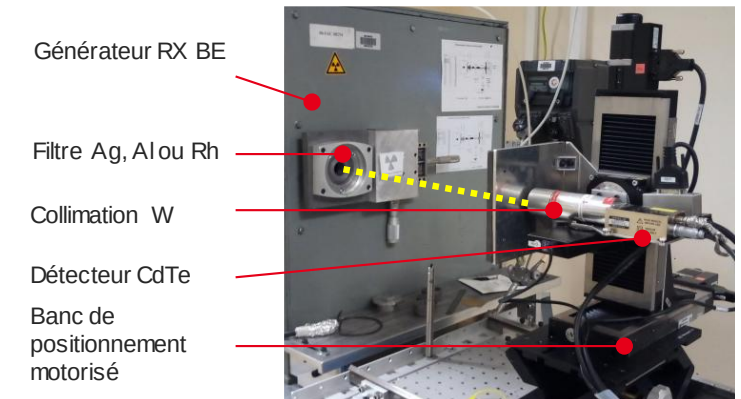
► Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.4 Etalonnage d'une chambre de transfert (Radcal 10X6-6M) sur les faisceaux du LNHB

► Mesures des coefficients d'étalonnage (N_k) de la chambre de transfert en termes de K_a avec la chambre à paroi d'air WK07 du LNHB (étalon de référence primaire pour la dosimétrie des RX de basses énergies)

1.5 Mesures du K_a dans les conditions du contrôle qualité et conversion en D_G via les facteurs c, g et s du modèle de Dance

1.6 Mesures des profils de dose avec des films GAFCHROMICS



Dispositifs utilisés au LNHB pour les mesures de spectrométrie d'émission RX (haut) et de CDA (bas).

1. Mesures physiques

1.1 Sélection des faisceaux cliniques de référence

► 15 faisceaux du mammographe Hologic Selenia® Dimensions® de l'HEGP

1.2 Caractérisation des faisceaux de référence à l'HEGP

► Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.3 Reproduction des faisceaux de référence au LNHB

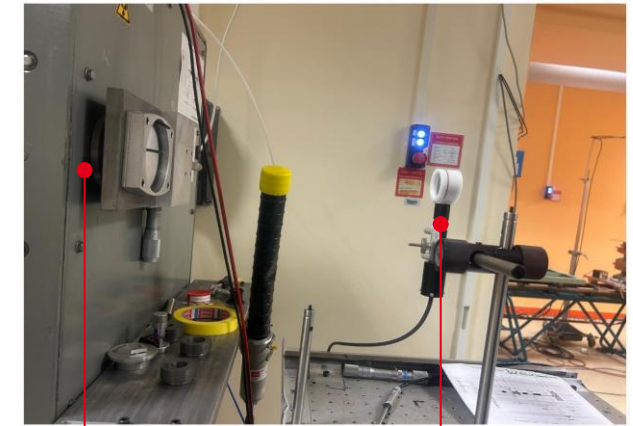
► Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.4 Etalonnage d'une chambre de transfert (Radcal 10X6-6M) sur les faisceaux du LNHB

► Mesures des coefficients d'étalonnage (N_k) de la chambre de transfert en termes de K_a avec la chambre à paroi d'air WK07 du LNHB (étalon de référence primaire pour la dosimétrie des RX de basses énergies)

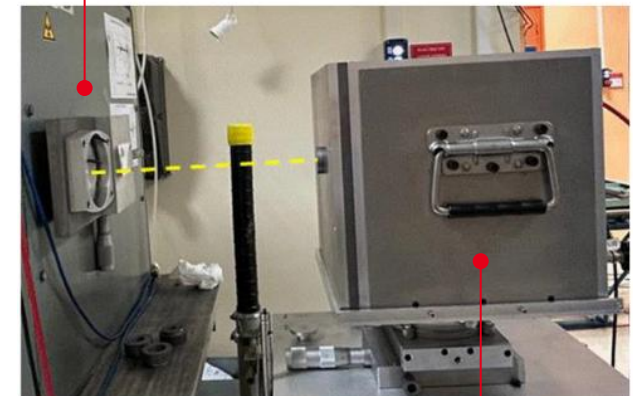
1.5 Mesures du K_a dans les conditions du contrôle qualité et conversion en D_G via les facteurs c, g et s du modèle de Dance

1.6 Mesures des profils de dose avec des films GAFCHROMICS



Générateur RX BE

Détecteur Radcal
10X6-6M (chambre
de transfert)



Chambre à paroi
d'air de référence
(WK07)

$$N_k = \frac{\dot{K}_{air}}{(L_{RadCal} - L_{RadCal,MP})} \cdot \frac{1}{k_T} \cdot \frac{1}{k_P}$$

1. Mesures physiques

1.1 Sélection des faisceaux cliniques de référence

► 15 faisceaux du mammographe Hologic Selenia® Dimensions® de l'HEGP

1.2 Caractérisation des faisceaux de référence à l'HEGP

► Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.3 Reproduction des faisceaux de référence au LNHB

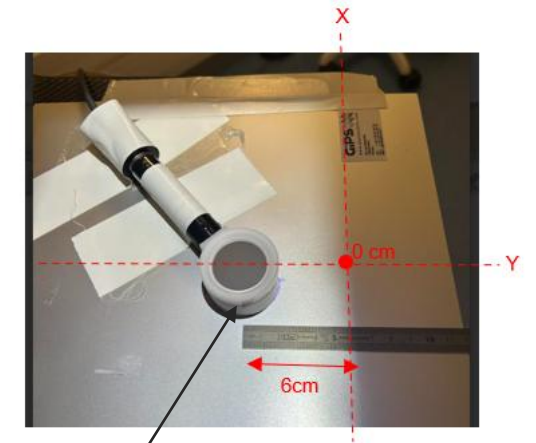
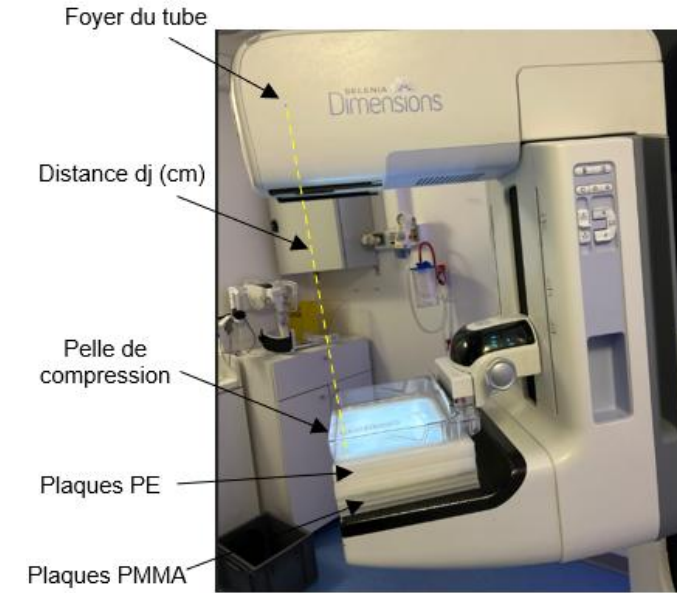
► Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.4 Etalonnage d'une chambre de transfert (Radcal 10X6-6M) sur les faisceaux du LNHB

► Mesures des coefficients d'étalonnage (N_k) de la chambre de transfert en termes de K_a avec la chambre à paroi d'air WK07 du LNHB (étalon de référence primaire pour la dosimétrie des RX de basses énergies)

1.5 Mesures du K_a dans les conditions du contrôle qualité et conversion en D_G via les facteurs c, g et s du modèle de Dance

1.6 Mesures des profils de dose avec des films GAFCHROMICS



La chambre RadCal 10X6-6M
Placée à y= 6cm du bord proximal
et centrée latéralement à x=0cm

1. Mesures Physiques

1.1 Sélection des faisceaux cliniques de référence

► 15 faisceaux du mammographe Hologic Selenia® Dimensions® de l'HEGP

1.2 Caractérisation des faisceaux de référence à l'HEGP

► Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.3 Reproduction des faisceaux de référence au LNHB

► Mesures spectrométriques + mesures de CDA

1.4 Etalonnage d'une chambre de transfert (Radcal 10X6-6M) sur les faisceaux du LNHB

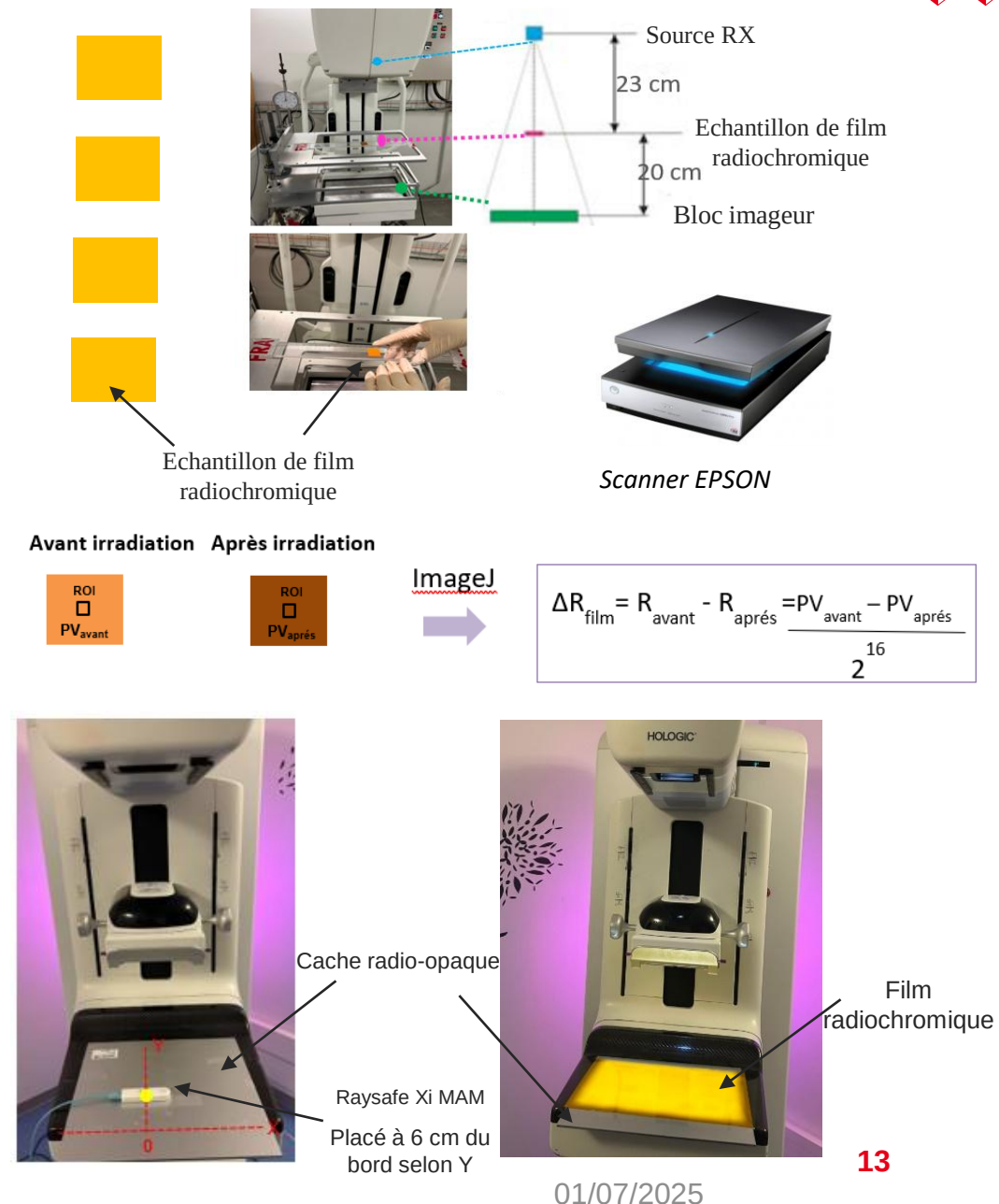
► Mesures des coefficients d'étalonnage (N_i) de la chambre de transfert en termes de K_a avec la chambre à paroi d'air WK07 du LNHB (étalon de référence primaire pour la dosimétrie des RX de basses énergies)

1.5 Mesures du K_a dans les conditions du contrôle qualité et conversion en

D_G via les facteurs c, g et s du modèle de Dance

1.6 Mesures des profils de dose avec des films GAFCHROMICS type LD-V1

Faisceau	Nombre de mAs	Nombre de tirs	Dose pour un tir (mGy)	Dose pour l'ensemble des tirs (mGy)
Ag-36 kV	300	4	30.47	120
Al-40 kV	120	4	25.28	100
Rh-33 kV	300	12	18.61	223.32

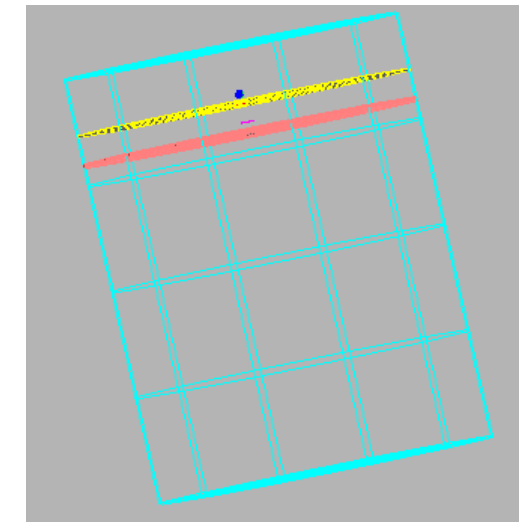
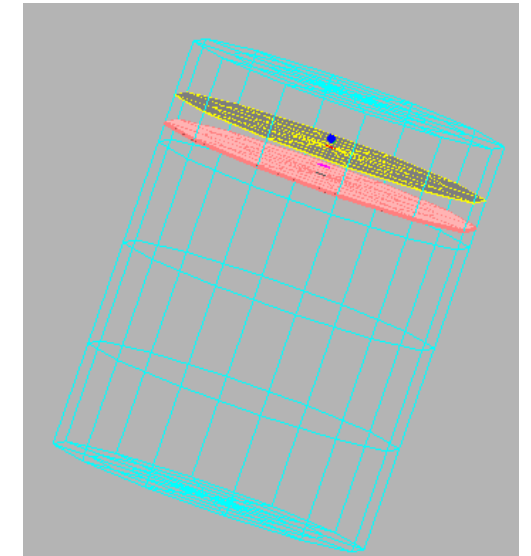
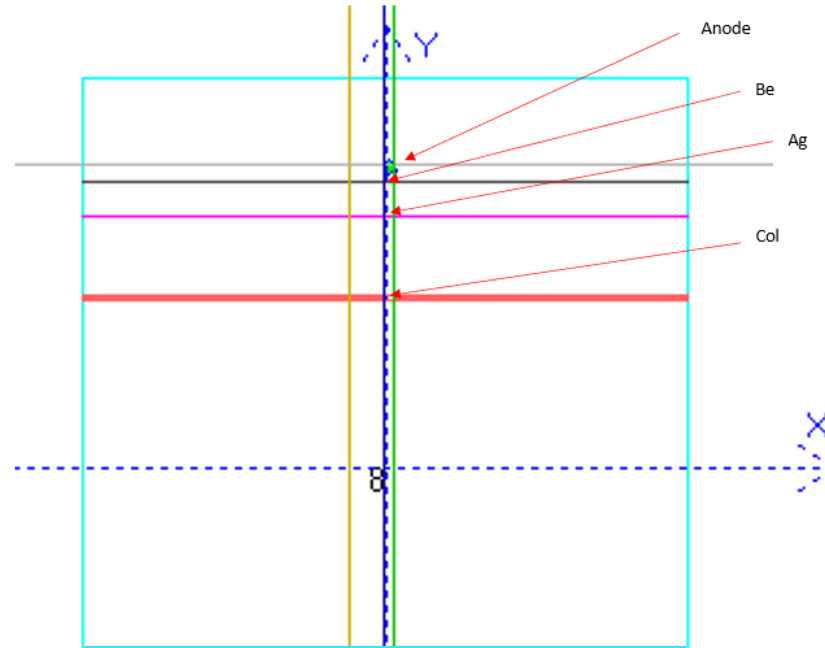
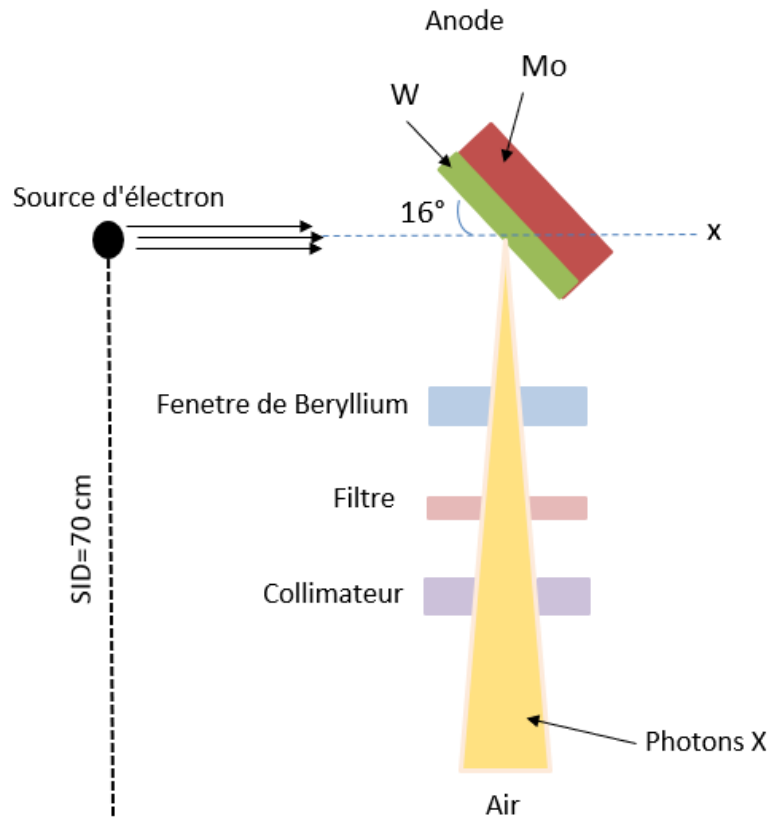


2. Modélisations & Simulations

2.1 Modélisation numérique MCNP du tube RX du mammographe de l'HEGP

► *Comparaison des spectres simulés aux spectres mesurés pour validation du modèle numérique*

► *Analyse de la distribution spatiale du champ de rayonnement*

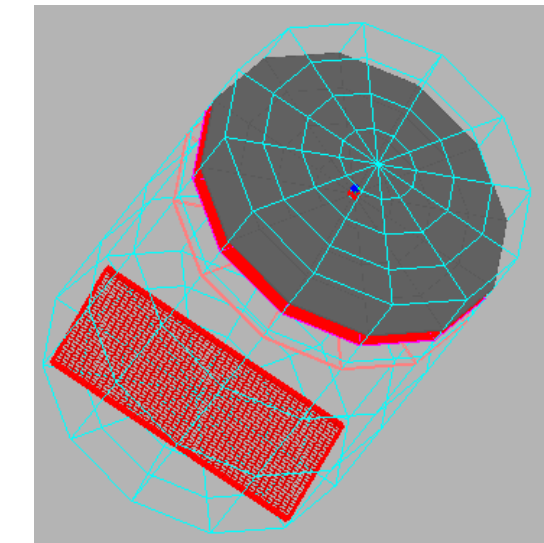
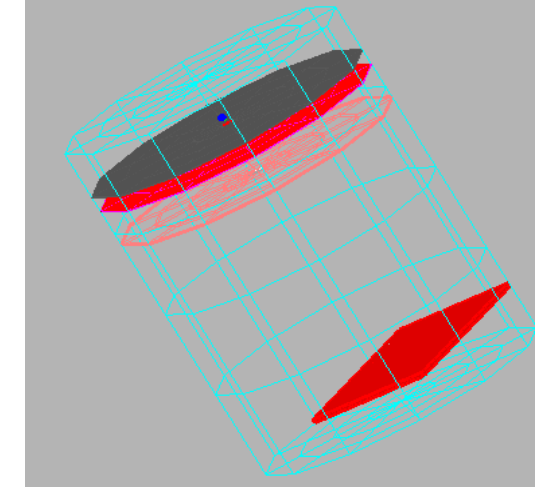
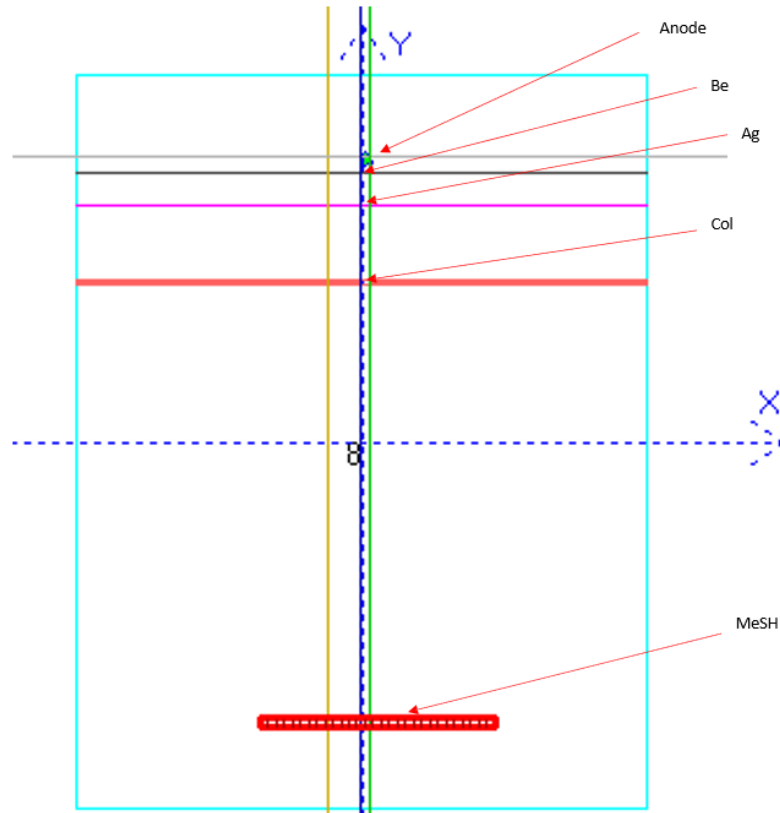
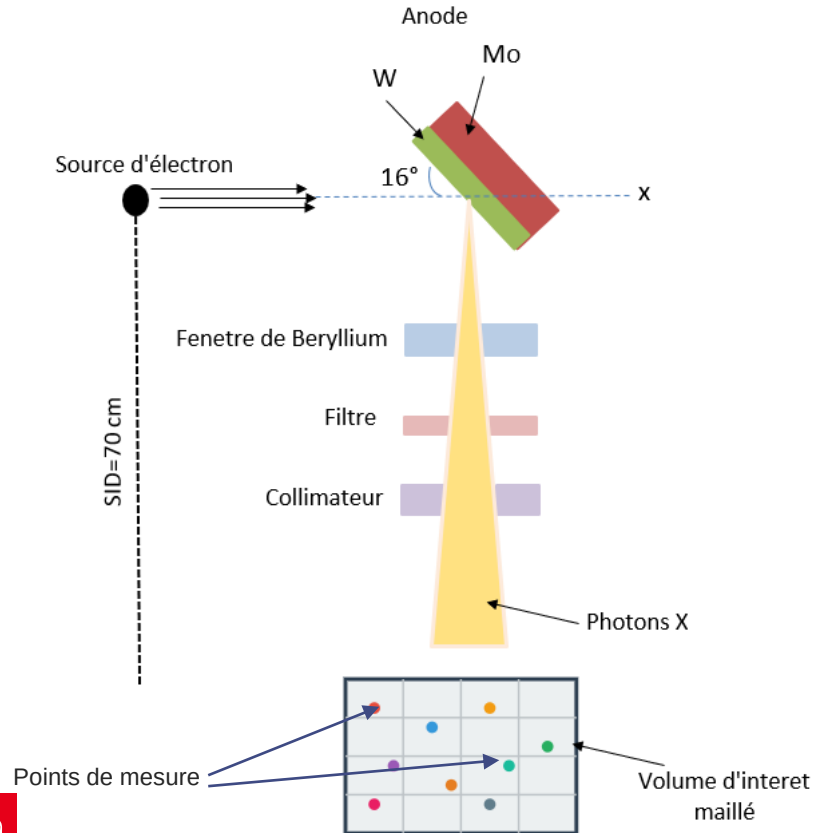


2. Modélisations & Simulations MC

2.1 Modélisation numérique MCNP du tube RX du mammographe de l'HEGP

► *Comparaison des spectres simulés aux spectres mesurés pour validation du modèle numérique*

► *Analyse de la distribution spatiale du champ de rayonnement*





4. ■ RESULTATS

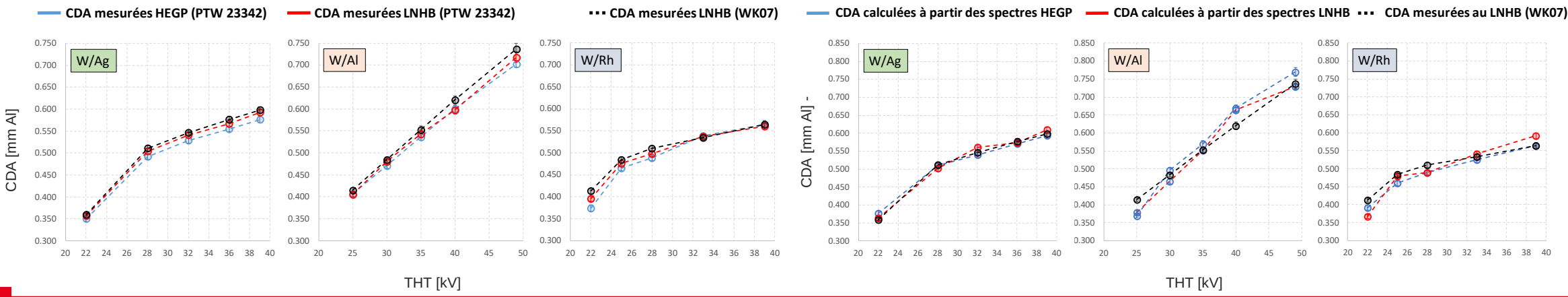
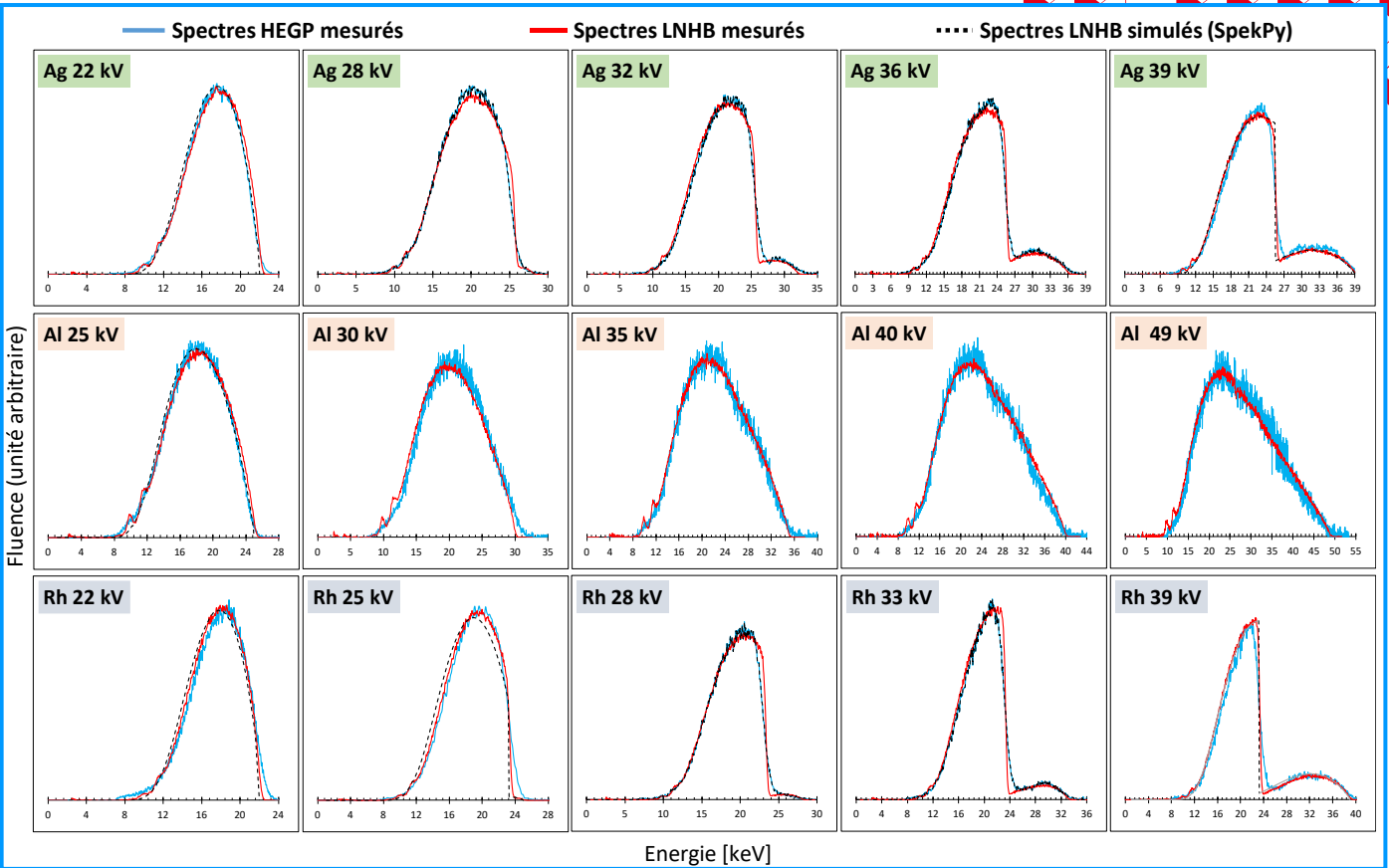
(1.2-1.3) Caractérisation et reproduction des faisceaux RX de l'HEGP

Résultats présentés en 2024 aux journées LARD à CADARACHE. le LNHB dispose des qualités de faisceaux du mammographe de l'HEGP :

Similarités des spectres RX HEGP reproduits au LNHB

$\Delta CDA_{LNHB/HEGP \text{ mesurées}} < 3 \% \mid \Delta CDA_{LNHB/HEGP \text{ calculées}} \leq 5 \%$

Mesures réalisées avec une chambre d'ionisation PTW 23342 et avec la chambre à paroi d'air WK07 du LNHB (référence nationale pour la mesure du Ka dans la gamme 10-100 keV)



(2.1) Analyse comparative des spectres mesurés et simulés par MCNP

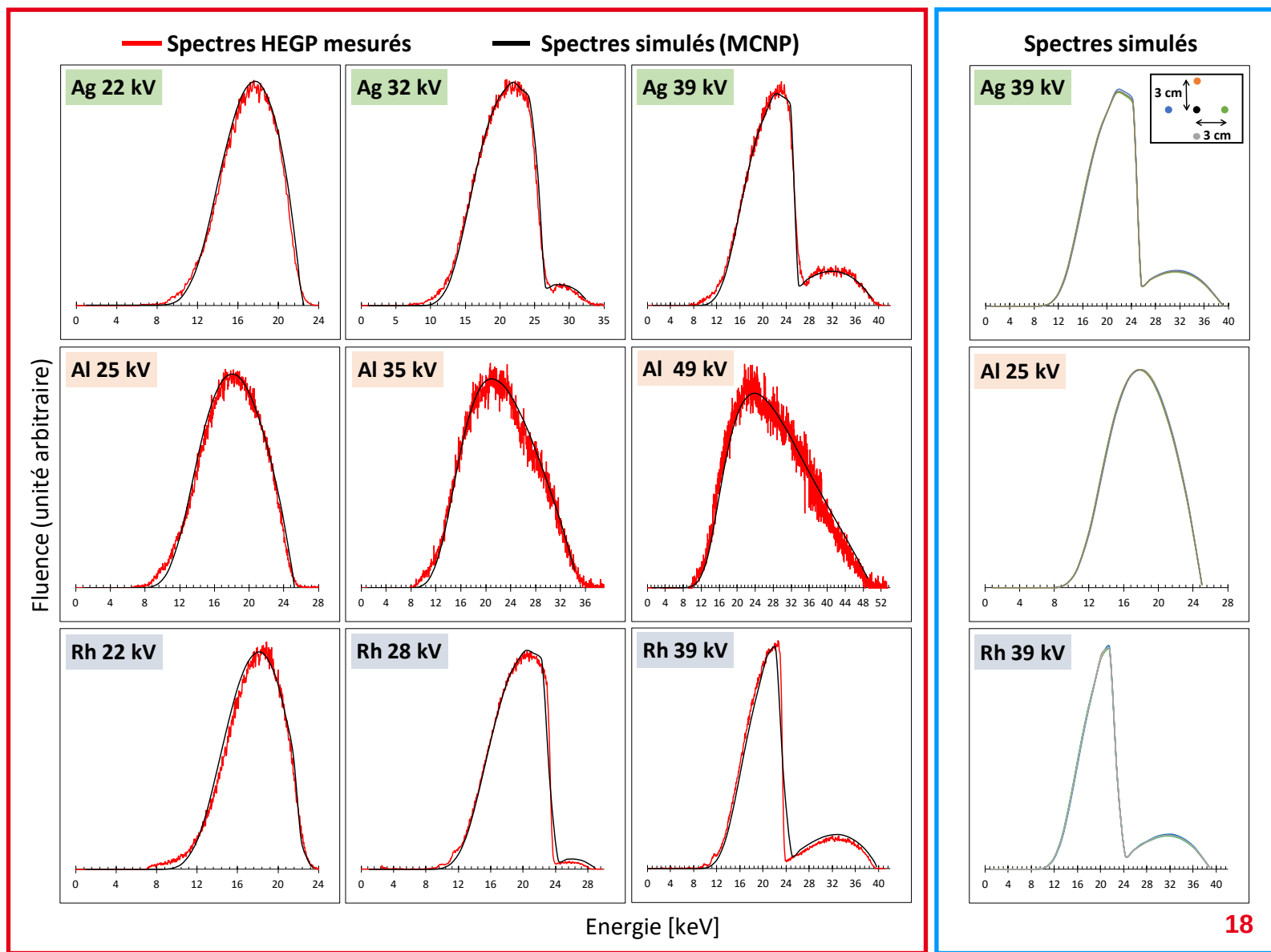
- Excellente concordance entre les spectres mesurés et simulés pour toutes les filtrations et tensions

→ *Pertinence du modèle MCNP développé*

- Peu de variabilité entre les spectres simulés pour différentes positions autour de l'axe central du faisceau RX incident

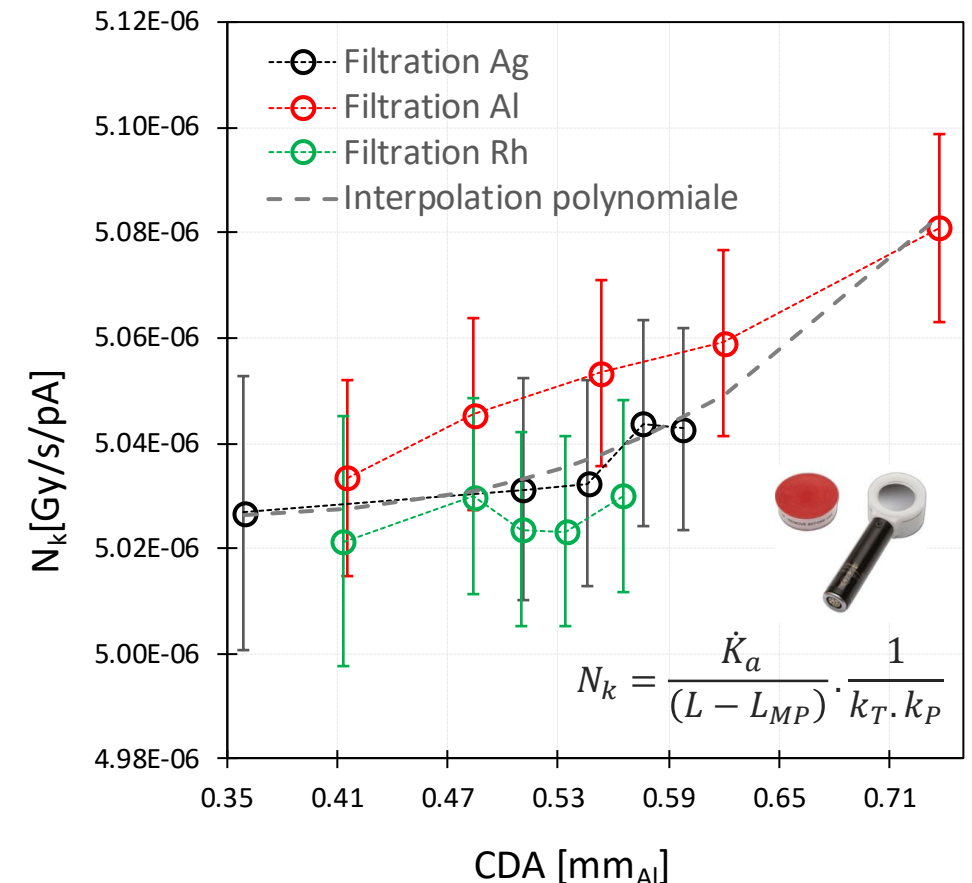
(cadre rouge) Spectres mesurés en rouge et spectres simulés en noir à l'aplomb du tube RX et à 700 mm du foyer.

(cadre bleu) Spectres simulés à l'aplomb du tube RX et dans différentes positions à 3 cm de l'axe central du faisceau incident.



(1.4) Etalonnage de la chambre de transfert Radcal 10X6-6M au LNHB

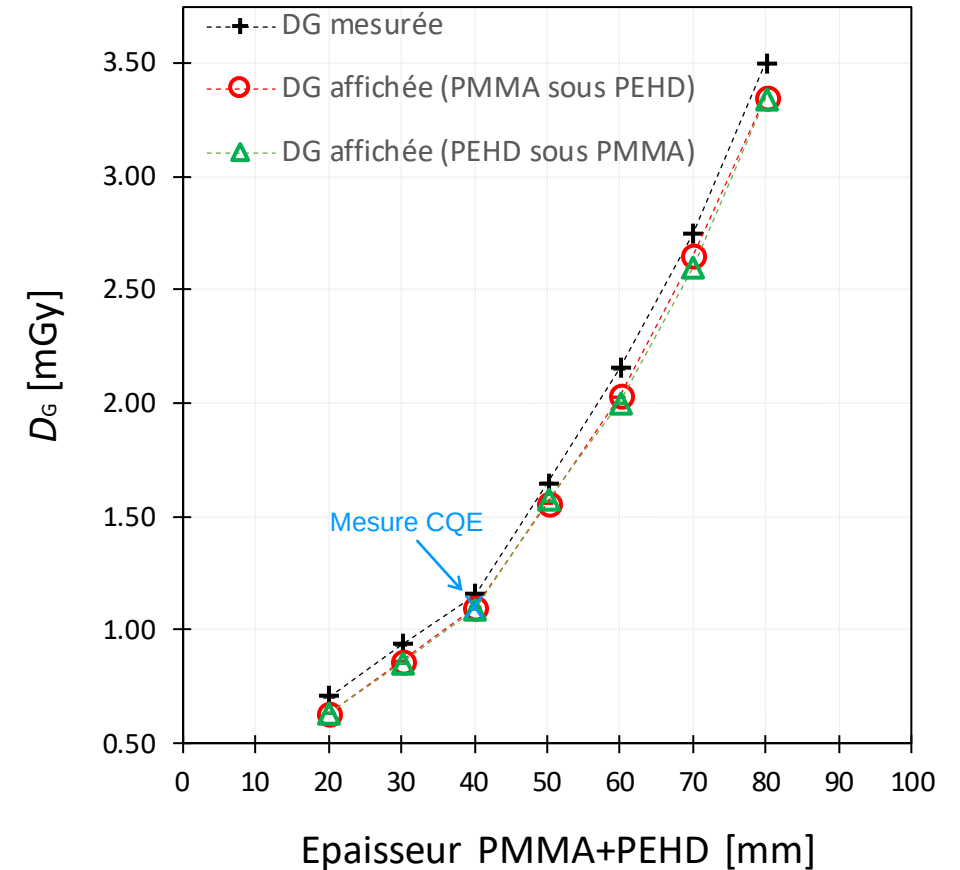
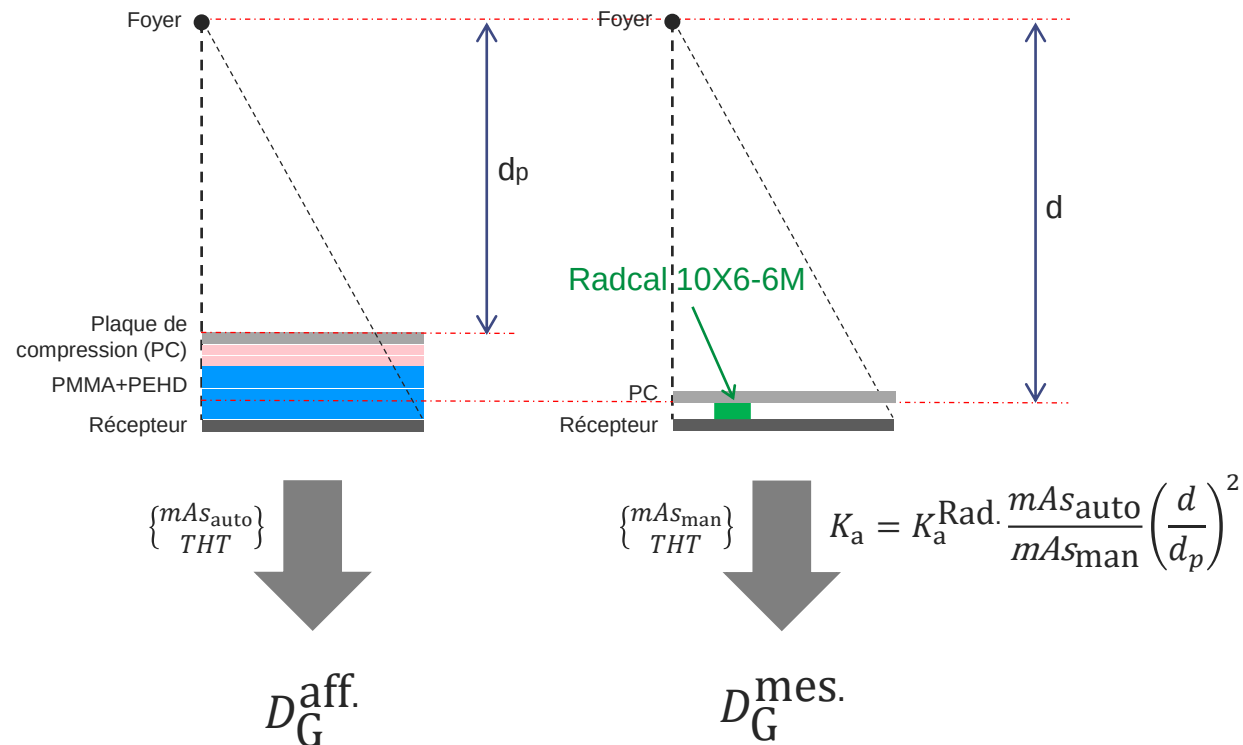
- Le coefficient d'étalonnage (N_k) présente une **légère augmentation progressive**, avec une variation d'environ 2 % sur l'ensemble de la plage de CDA.
- **Faible dépendance du N_k au type de filtration :** écarts relatifs $\leq 0,5$ % pour des tensions équivalentes
- **Bonne précision des mesures :** incertitudes types comprises entre 0,3 % et 0,5 %
- **Stabilité du N_k vis-à-vis de la CDA :** biais de 5 % sur la CDA se traduisant par une variation de 0,4 % sur le N_k



$N_k = f(\text{CDA})$ mesuré pour les différents faisceaux étudiés avec la chambre Radcal 10X6-6M étalonnée au LNHB

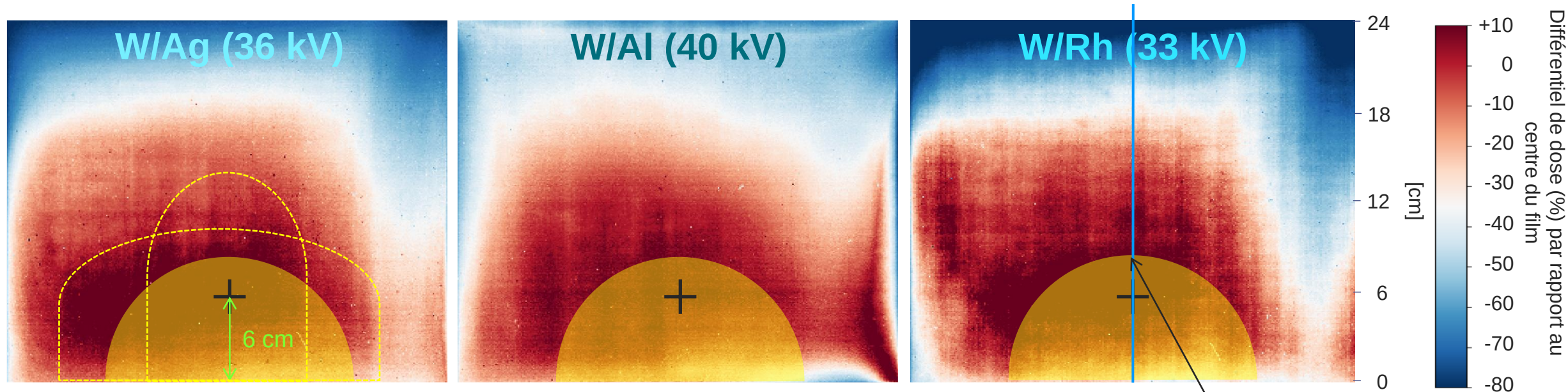
(1.5) Comparaison D_G mesurée vs affichée (console HEGP) – Configuration CQ

- **Sous-estimation systématique de la D_G affichée** par la console du mammographe : -4 % à -12 %
- Aucune influence de l'ordre d'empilement des plaques de PMMA et de PEHD sur la D_G affichée

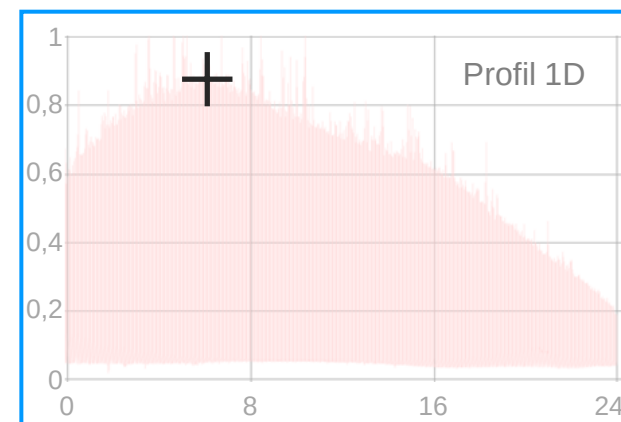
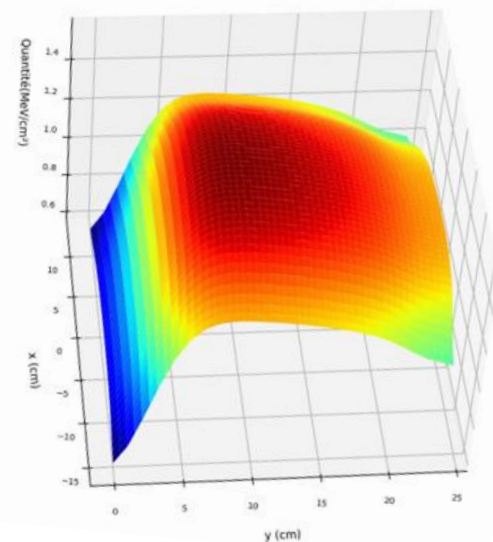
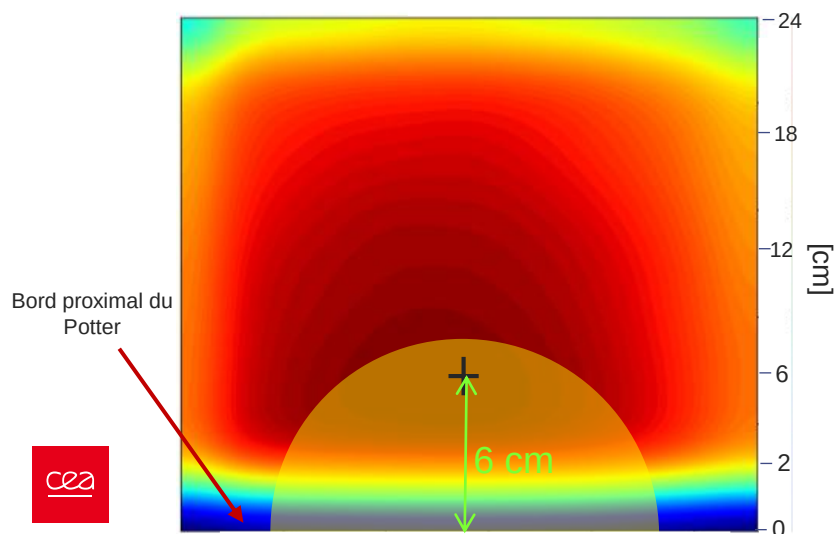


Comparaison des valeurs de D_G mesurées à l'aide de la chambre de transfert Radcal 10X6-6M avec les valeurs affichées par le logiciel du mammographe

(1.6) Mesures de la distribution spatiale de la dose délivrée par le mammographe numérique de l'HEGP



Distribution spatiale de la dose sur film Gafchromic LD-V1. (En jaune) Projection d'un sein standard selon le modèle de Dance (disque de rayon = 8 cm) proximal du potter (croix).



Profil de dose au centre du film depuis le bord proximal du Potter (à gauche)



5 ■ Conclusions & perspectives

Conclusions & Perspectives

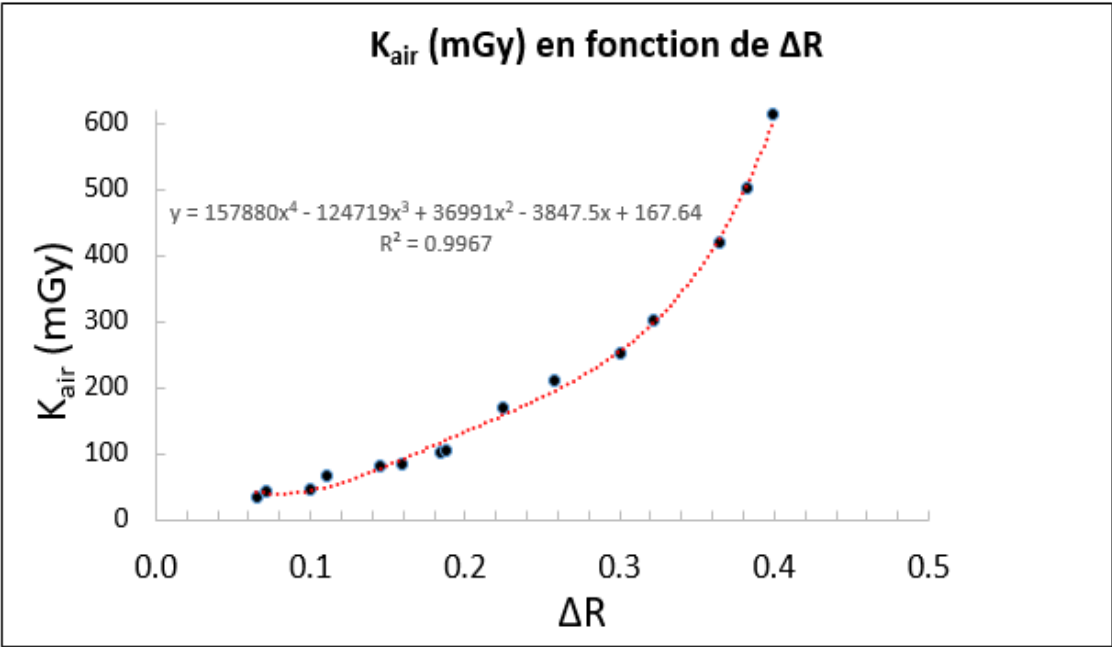
- **Chaîne de traçabilité validée** : faisceaux cliniques HEGP → LNHB
 - **Etalonnage d'une chambre de transfert (K_a)** avec l'étalon de référence national du LNHB
 - **Mesures de D_G et comparaison avec valeurs affichées sur mammographe** : sous-estimation jusqu'à 12 % de la D_G mesurée
 - **Modèle MCNP du tube RX du mammographe de l'HEGP validé**
- Design d'un dosimètre pour la mesure directe de la D_G fondé sur les modélisations MCNP validés (2025/2026)
- ◆ Possibilité d'étudier des matériaux absorbants au LNHB avec les qualités de faisceaux du mammographe de l'HEGP :
- fantômes de sein
 - implants mammaires (étude en cours...)
 - etc.



Merci pour votre attention



Etalonnage des films radiochromiques



La pente de la courbe augmente significativement avec ΔR , ce qui signifie que la sensibilité du film GAFCHROMIC varie selon la dose reçue.

Le coefficient de détermination $R^2 = 0,9967$, indiquant une excellente correspondance entre le modèle et les données



Polish Journal of Medical Physics and Engineering
The Journal of Polish Society of Medical Physics
ISSN 1898-0309, doi: 10.2478/pjmpe-2024-0006

June 2024
Vol 30, Issue 2

Scientific Paper

Energy dependence of GafChromic LD-V1 film dose response to X-ray photons in the 60 to 180 kV range

Jonathan MBEWE ^{1,ABCD,*}

¹Division of Medical Physics, Groote Schuur Hospital/University of Cape Town, South Africa

*Corresponding author: Jonathan Mbeve; jmbewe@gmail.com

(received 25 July 2023; revised 13 September 2023; initially accepted 11 October 2023; withdrawn for technical reasons 26 November 2023; re-submitted 20 March 2024; accepted 27 March 2024)

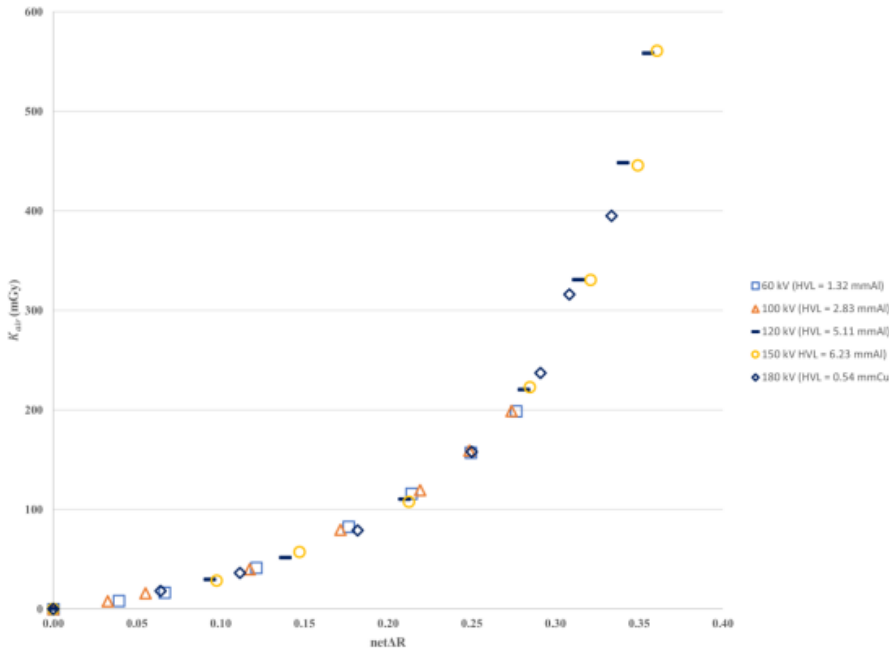


Figure 2. Response of GafChromic LD-V1 film at the beam qualities investigated.