Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Evolutions de la dosimétrie externe et leurs conséquences pour la métrologie de référence

J.M. Bordy
CEA, LIST, Laboratoire National Henri Becquerel, LNE LNHB,
centre de Saclay ; BP 91191 Gif sur Yvette CEDEX

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Pour comprendre le présent et envisager des évolutions, il faut connaitre le passé

dans un premier temps, remonter un peu le temps

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

-Introduction (complexité du problème)

- Années 80 (Gprot. Gphys. Gop.)

- Méthodes de mesure des Gop. (exemple)

- Ref. primaires (quoi, pourquoi, comment)

- Années 90 (introduction Diag.)

- Analyse des besoins

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Métrologie = mesure ; certes mais mesurer quoi ?

Matière inerte et un type de rayonnement

la physique « pure » peut suffire

(quantité d'énergie déposée ou absorbée dans cette matière)

Matière vivante exposée à des rayonnements de nature et d'énergie diverses

Désorganisation mais aussi fonctionnement altéré

Effets BIOLOGIQUES (dysfonctionnement – « détriment »)

Pondération de la quantité d'énergie déposée ou absorbée

La gageure est d'élaborer un système SIMPLE fondé sur une GRANDEUR UNIQUE pour rendre compte de la complexité à la fois des modes d'interaction du rayonnement et de l'effet sur le vivant.

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Métrologie = mesure ; certes mais mesurer quoi ?

GRANDEUR UNIQUE !!! ?

Différences de mode d'interaction des rayonnements (photons, électrons, hadrons, neutrons)

Différences des effets dus à chaque catégorie de rayonnement

Différences de radiosensibilité des organes et tissus

Différence entre effets stochastiques et déterministes

Des besoins particuliers pour :

Les références

La quantification des effets « biologiques »

Les mesures opérationnelles

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Pourquoi des référence métrologique ? Positionnement sociétal

Références Nationales Pour les Rayonnements Ionisants

Radioprotection Environnement

Accident Irrad. Indust.

Radio Diagnostic

Médecine Nucléaire

Radiothérapie

Public et Travailleurs

Patients

Public Travailleurs
- Secteur médical
- Secteur industriel

Applications à l'Homme

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Métrologie = mesure ; certes mais mesurer quoi ?

GRANDEUR UNIQUE !!! ?

Hélas NON

Un concept :

La Dose absorbée (énergie par unité de masse)

Un principe :

La pondération de la dose absorbée par des facteurs multiplicatifs sans dimension

Gy # J / kg ; Sv # J / kg ; $ML^2T^{-2} / M = L^2T^{-2}$

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Début des années 1980 PANORAMA dosimétrie externe Ray. Ionisants

Grandeur et unité du Système International (SI)

Dose Abs. organe
Dose Equivalente
Dose Effic

Pas mesurables !

otection »

Calcul

Grandeurs physiques
(p
Gy

Pas effets Biologiques !

Abs.
kerma
Fluence

Effets biologiques
Fantôme anthropo.
Limites d'exposition

Mesures absolues
Ref. nationales

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Interactions « physiques » → Effets biologique

ORNL 8381 (70's)
1.74 m 70 kg

Dose Absorbée $D_{T,R}$

Dose équivalente
$H_T = \Sigma_R w_R D_{T,R}$

W_R dépend de la nature et de l'énergie du rayonnement à l'extérieur du corps

W_R

E définie pour des expositions corps entier

Rn → H_{reins}

Inspiré d'après Y. Giraud

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Début des années 1980 PANORAMA dosimétrie externe Ray. Ionisants

Grandeur et unité du Système International (SI)

Dose Abs. organe
Dose Equ
Dose Eff

Radiothérapie

Radioprotection des
vailleurs et du publi

Pas mesurables !

Pas effets Biologiques !

Estimateurs conservatifs

Calcul

Fluence

Effets biologiques
Fantôme anthropo
Limites d'exposition

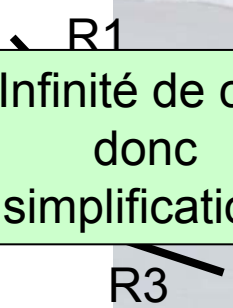
Mesurables
Fantomes simplifiés
& Effets biologiques

Mesures absolues
Ref. nationales

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

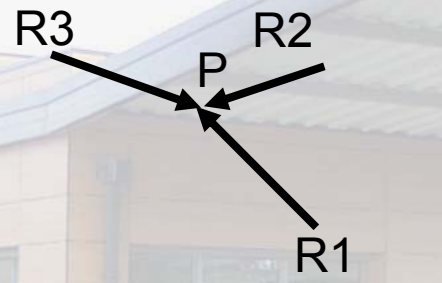
Définition de l'équivalent de dose

Définie en **un point** dans un champ de rayonnements réel

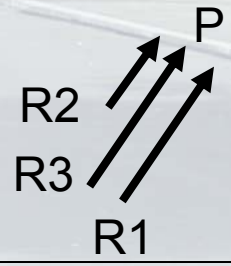


Infinité de cas donc simplifications

Point de mesure dans un champ de ray. « expansé »



Champ de Ray. expansé et « unidirectionel »



Simplification par rapport à la réalité

Conditions de définition
Fantôme

Effets biologiques

Calcul des dépôts d'énergie dans un fantôme

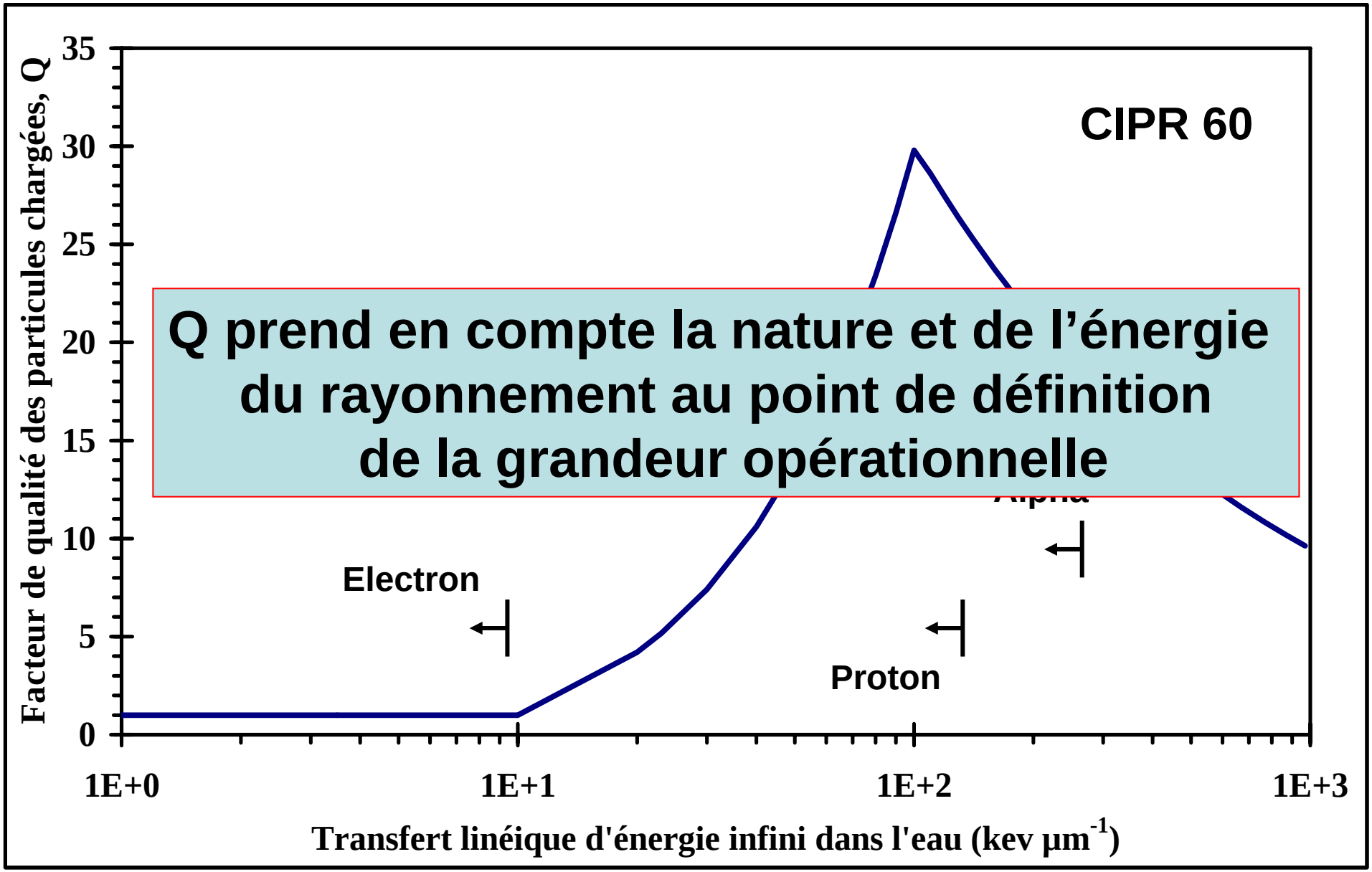
Sphère ICRU (Φ 30 cm)
Dosim. zone

d = 10 mm

$H^*(10) > E$

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

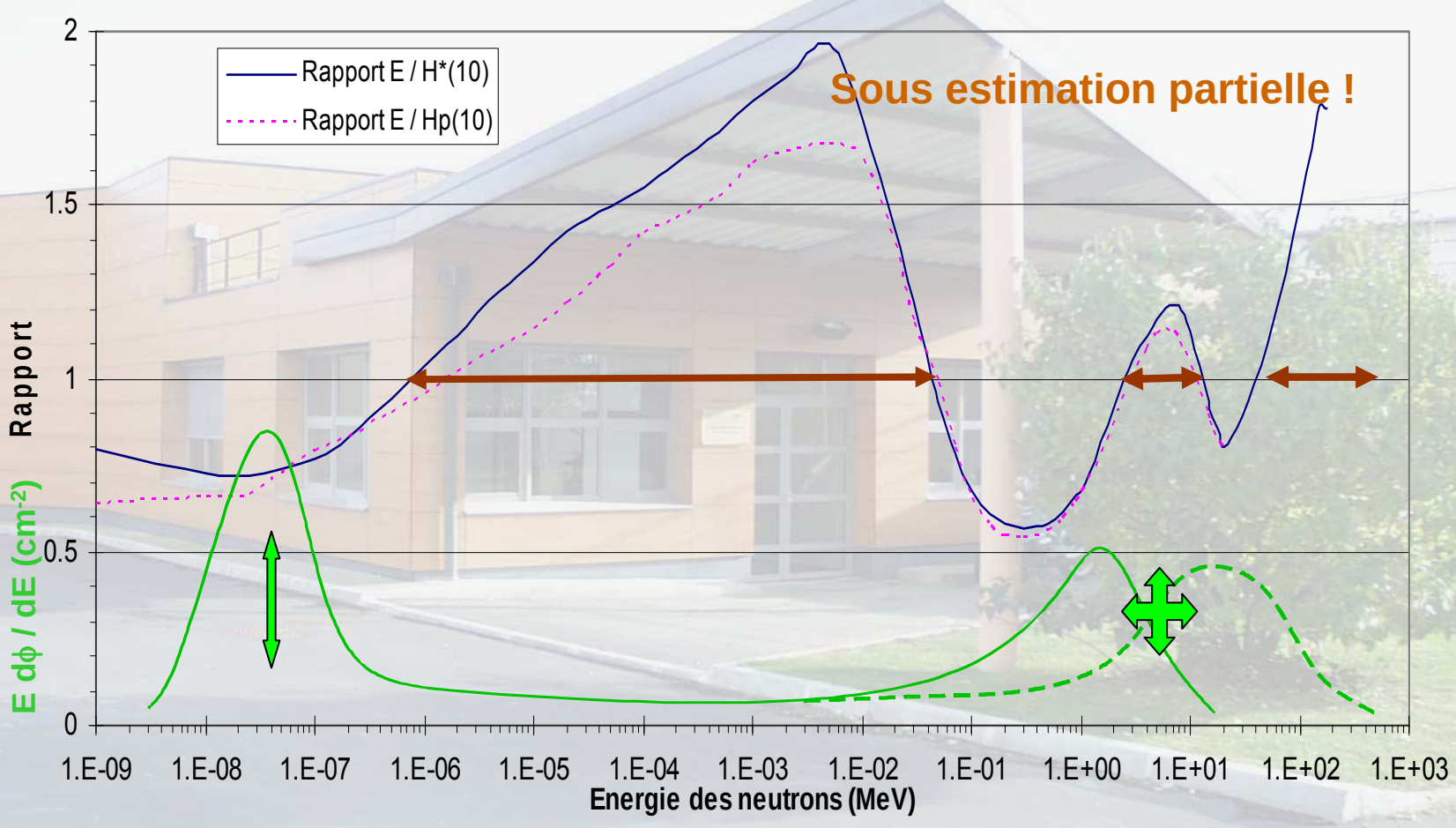
Ray. / Dosim.	Faiblement pénétrant	Fortement pénétrant
de zone	$H'(0.07, \alpha)$	$H^*(10)$
	$H'(3, \alpha)$ $H'(10, \alpha)$	
individuelle	$H_p(0.07, \alpha)$	$H_p(10, \alpha)$



Q prend en compte la nature et de l'énergie du rayonnement au point de définition de la grandeur opérationnelle

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Equivalents de dose, $H^*(d)$, $H_p(10,0°)$

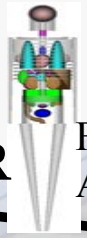


Forme typique d'un spectre neutron

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Grandeurs de Protection
$D_{T,R}$ dose engagée à l'organe
H_T dose équivalente à l'organe
E dose efficace
Gy / Sv

CIPR

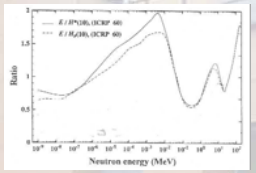


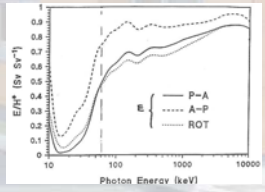
Fantômes Anthropo.

en un point

Grandeurs Physiques (Primaires)
γ, RX — K_{air}, D_W
n, γ, RX, PC — Φ
b, RX — $D_t(0,07)$
Gy (gray)

Estimateurs conservatifs !

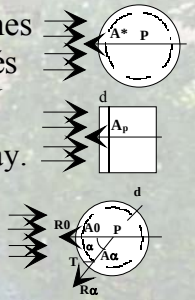




ICRU

Fantômes simplifiés tissu ICRU

Champ de Ray. simplifiés expansés unidirectionnels

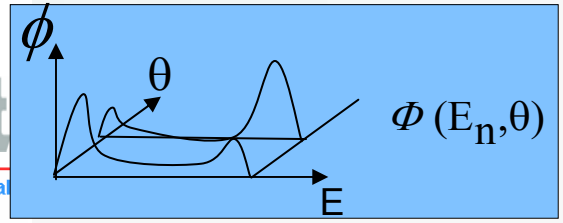


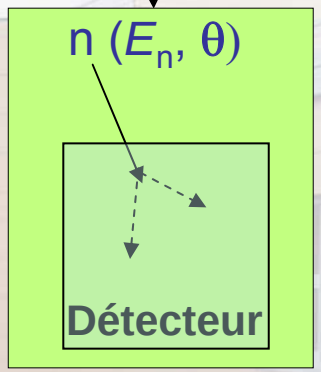
Corps entier et extrémités

Grandeurs Opérationnelles
$H'(d)$, $H^*(d)$, $Hp(d)$
Sv (sievert)

Mesure

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB





Indication
I

$$H = C_H\, I$$

Globale

Mesures des grandeurs opérationelles

C_H : coef. d'étalonnage expérimental

I : Indication du dosimètre corrigée des grandeurs d'influences

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

C_H : coef. d'étalonnage
I : Indication du dosimètre corrigée des grandeurs d'influences

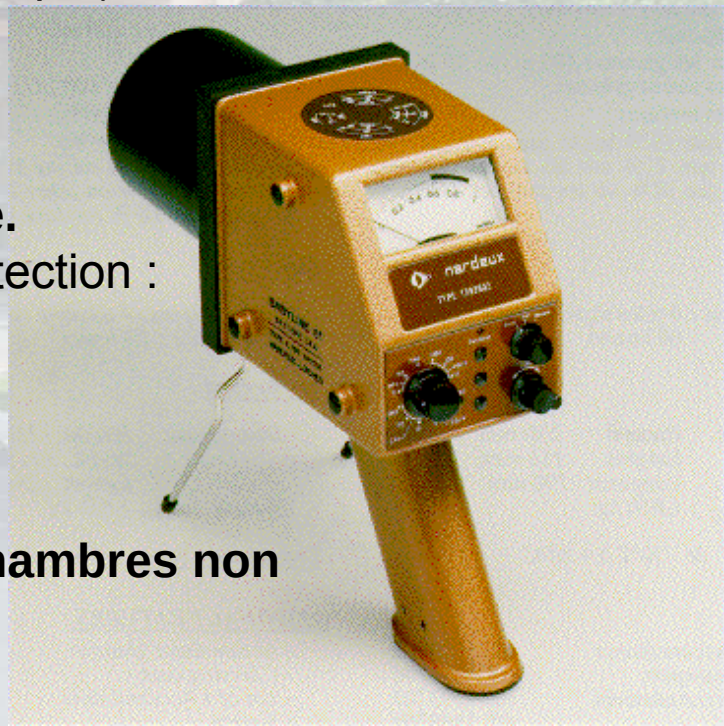
Méthode Globale : $H = C_H I$

Si réponse du dosimètre en termes d'équivalent de dose en fonction de l'énergie
du rayonnement incident constante (ou presque)

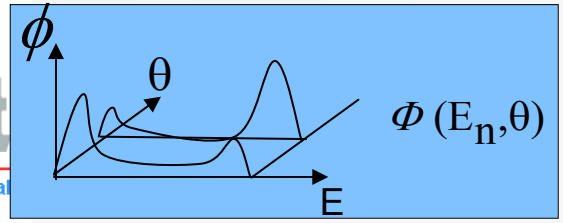
Chambre d'ionisation

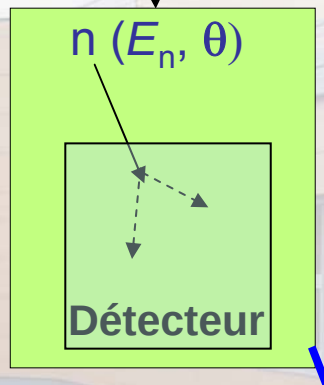
- Courant proportionnel au débit de dose.
Sensibilité croissante avec le volume de détection :
100 cm^3 pour la radioprotection,
0.6 cm^3 pour la radiothérapie.

- Correction du signal :
Pression, température, humidité relative **(chambres non scellées)**
Polarisation, recombinaison, …



Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB



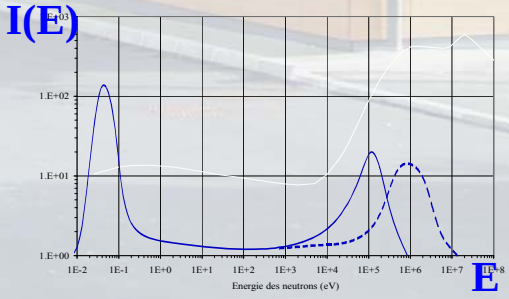


Mesures des grandeurs opérationelles

C_H : coef. d'étalonnage expérimental

I : Indication du dosimètre corrigée des grandeurs d'influences

Indication I



$$H = C_H\, I$$

$$H = \sum_E C_H(E)\, I(E)$$

Globale

Spectrométrie en Energie

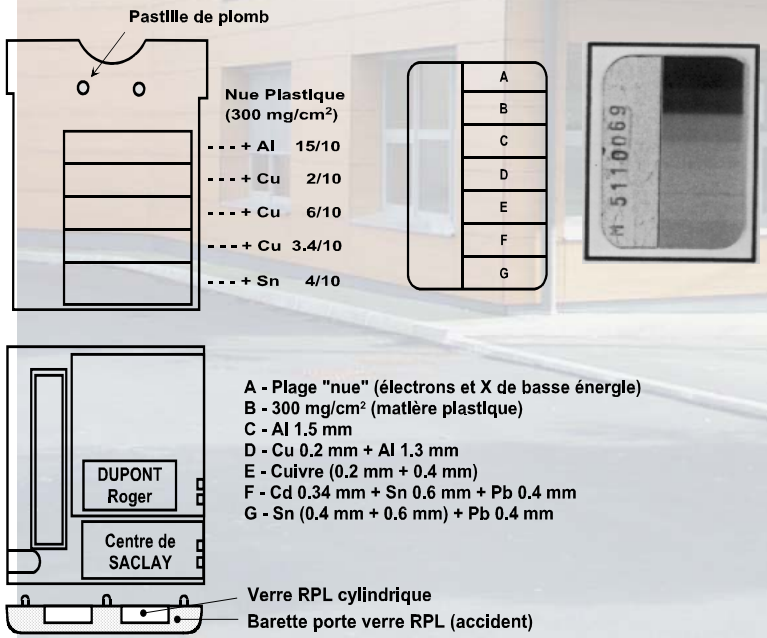
Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

C_H : coef. d'étalonnage
I : Indication du dosimètre corrigée des grandeurs d'influences

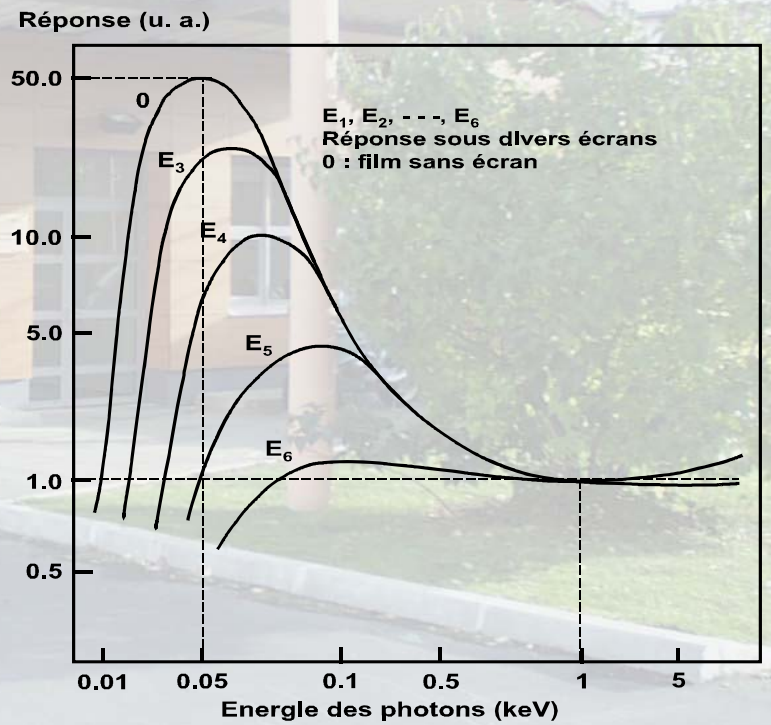
Spectro Energie :

$$H = \sum_E C_H(E)\, I(E)$$

Détermination de la nature du rayonnement, estimation du « spectre » en énergie, …

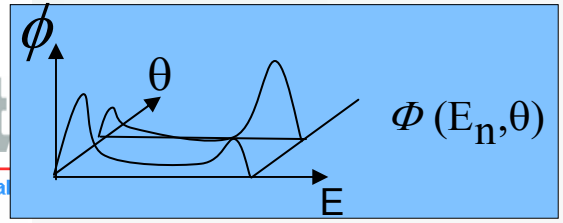


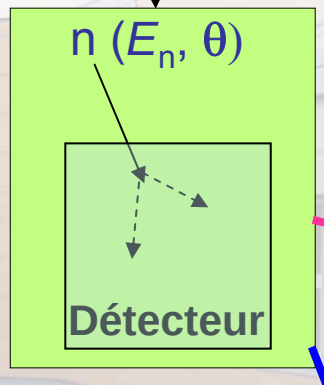
Boitier film photographique CEA.



R=f(E) d'un film photographique aux photons sous divers écrans.

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB



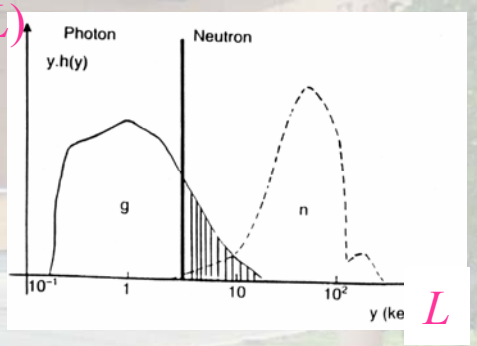


Mesures des grandeurs opérationelles

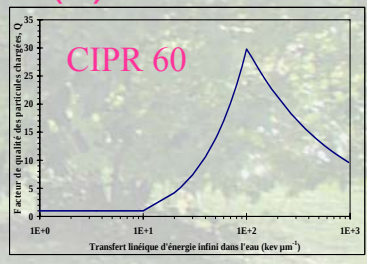
C_H & C_D : coef. d'étalonnage expérimentaux

I : Indication du dosimètre corrigée des grandeurs d'influences

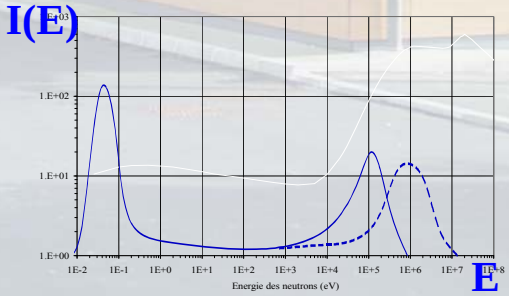
I(*L*)



Q(L)



Indication I



$$D = C_D \sum_L L\, I(L)$$

$$H = C_H\, I$$

$$H = \sum_E C_H(E)\, I(E)$$

$$H = C_H \sum_L Q(L)\, L\, I(L)$$

Globale

Spectrométrie en Energie

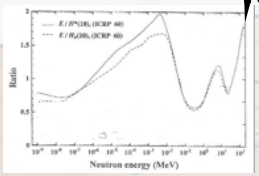
Spectrométrie des TLE

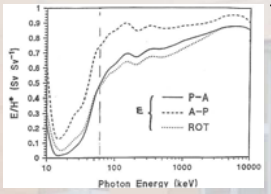
Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Grandeurs de Protection

$D_{T,R}$ dose engagée à l'organe
H_T dose équivalente à l'organe
E dose efficace

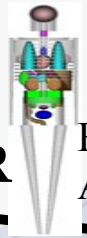
Gy / Sv





Estimateurs conservatifs !

CIPR



Fantômes Anthropo.

en un point

Grandeurs Physiques (Primaires)

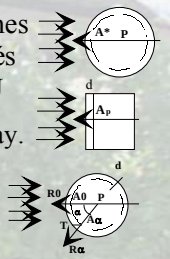
γ, RX	K_{air}, D_W
n, γ, RX, PC	Φ
b, RX	$D_t(0,07)$

Gy (gray)

ICRU

Fantômes simplifiés tissu ICRU

Champ de Ray. simplifiés expansés unidirectionnels



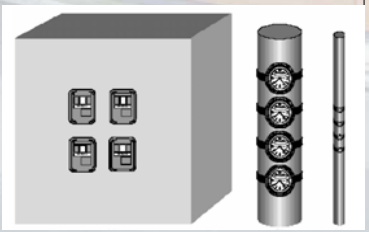
Corps entier et extrémités

Grandeurs Opérationnelles

$H'(d)$, $H^*(d)$, $Hp(d)$

Sv (sievert)

Dosim. \ Ray.	Faiblement pénétrant	Fortement pénétrant
de zone	$H'(0.07,\alpha)$	$H^*(10)$
	$H'(3,\alpha)$ $H'(10,\alpha)$	
individuelle	$Hp(0.07,\alpha)$	$Hp(10,\alpha)$



Fantômes ISO d'étalonnage PMMA - eau

Spectrométrie		Globale
Energie	TLE	
$H = \sum_E \phi_E h_E C_E$	$H = C \sum_y D_y Q_y$	$H = C \,.\, \mathrm{Lect}$
CP, scintillateur Semi-conducteur	CPET	Chambre d'ionisation scintillateur, GM Semi-conducteur TLD, films, OSL ...

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Détermination des valeurs de référence, mesures absolues

La référence est le **dosimètre** servant à la mesure **absolue** et non l'installation de production du rayonnement.

Dans tous les cas, la mesure « s'appuie » sur une **« constante » physique**.

- soit l'énergie moyenne pour crée une paire d'ion dans un gaz (**W/e**) pour les chambre d'ionisation,
- soit le **rendement calorifique** du graphite pour le calorimètre en graphite.

Mais aussi sur la mesure :

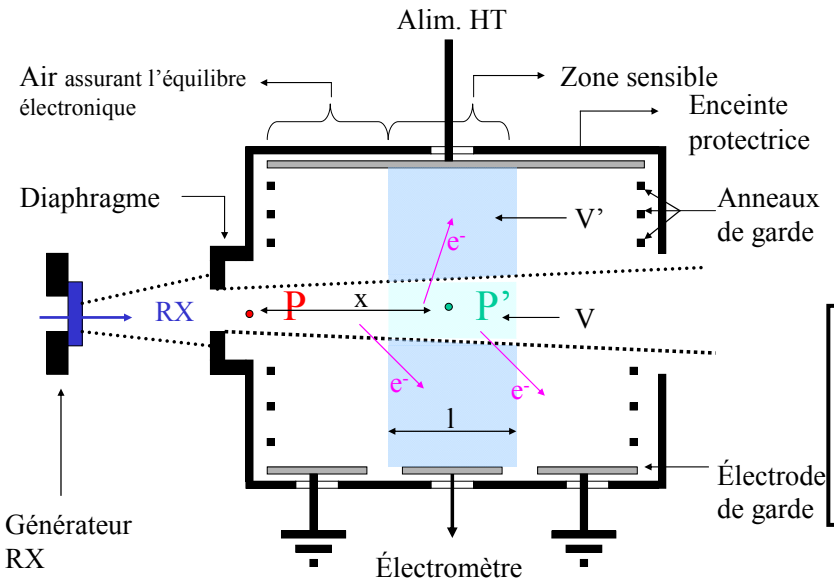
- du poids de l'absorbeur pour les calorimètres
- du volume de collection pour les chambres d'ionisation.

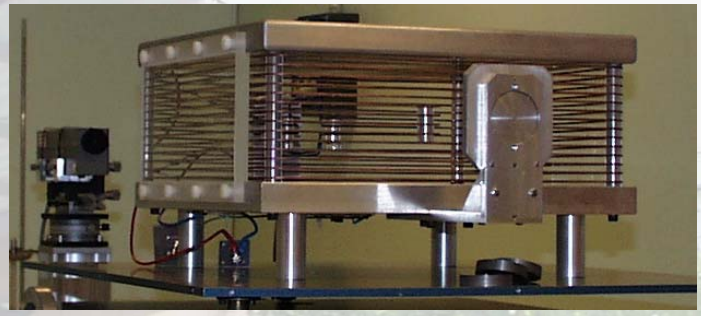
En France c'est **Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB)** qui est le laboratoire national de métrologie pour les rayonnements ionisants.

Laboratoire Nat Henri Becque
LNE-LNHB

Détermination des valeurs de référence, mesures absolues

Chambre à paroi d'air
(RX faible et moyenne énergie)





$$K_{air} = \frac{Q}{\rho \cdot V} \cdot \frac{W_{air}}{e} \cdot \frac{1}{1-g} \cdot \prod k_i$$

$$\Pi_i k_i = k_h \,.\, k_{sc} \,.\, k_e \,.\, k_s \,.\, k_a \,.\, k_d \,.\, k_{pol} \,.\, k_{letp}$$

W_{air} /e : énergie minimale pour produire une paire d'ion, 33.97 J/C (PTN)

1 / (1-g) : rayonnement de freinage $(K_c \longrightarrow K_{Total})$

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Détermination des valeurs de référence, mesures absolues

Calorimètre : dosimètre absolu

mesure directe de l'énergie déposée par les rayonnements ionisants dans la matière

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Energie moyenne communiquée par les rayonnements ionisants

masse de matière

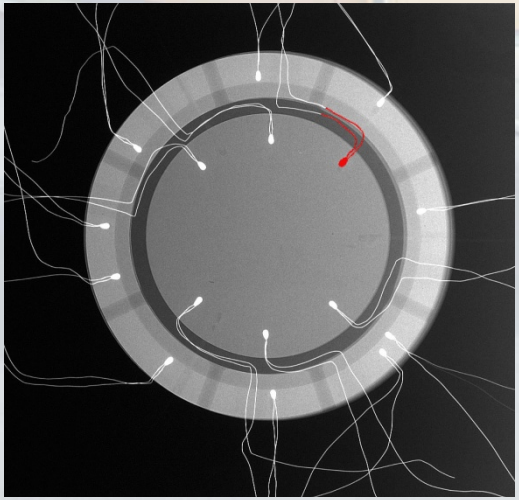
$$\overline{D} = \frac{Q}{m} \cdot \frac{1}{rcal}$$

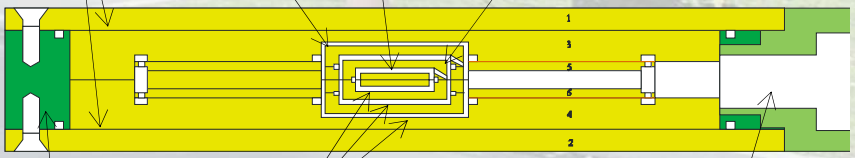
rcal = 1 rendement calorifique

quantité de chaleur directement mesurée

Masse de l'absorbeur thermiquement isolé

Calorimètre dans le fantôme en graphite





Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Contexte international

Laboratoire Nationaux de métrologies

EURAMET …/…

BIPM

Joint Commetee of RMO's and BIPM

Key Comparison Data Base

Calibration and Measurement Capabilities

Mutual Recognition Arrangement

Laboratoires d'étalonnage accrédités

Utilisateurs

Portée d'accréditation ISO 17025

Organismes d'accréditation

European Cooperation for accreditation

Audit 17025

Multilateral Agreement

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Comparaison des références nationales entre elles :
Etablies dans des faisceaux normalisés dont les caractéristiques (« qualités ») peuvent être reproduites à l'identique (ou presque) dans chaque pays.

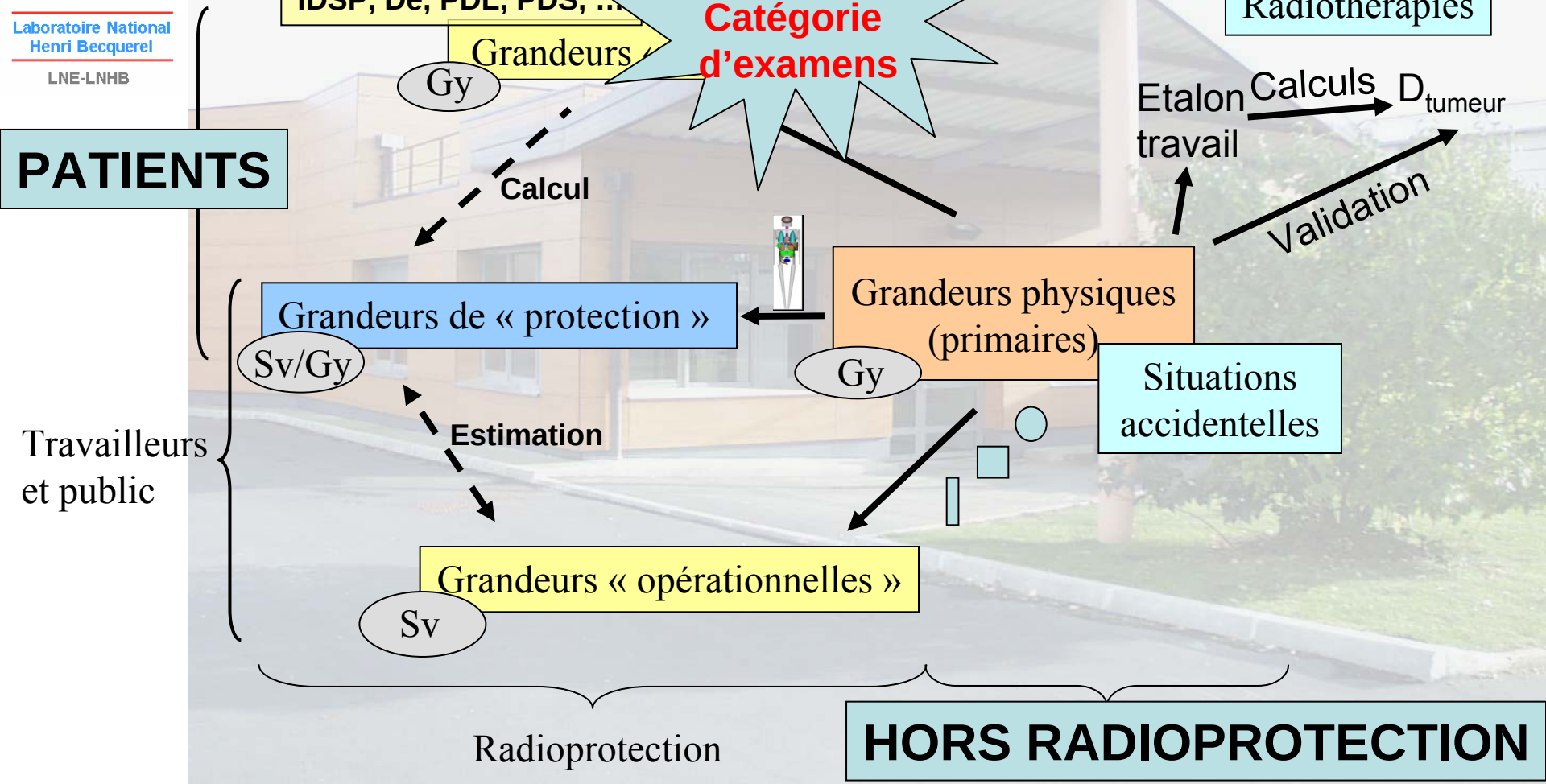
Domaine	Rayonnement	Critère	Bibliographie
Radio-thérapie	RX de freinage	$TPR_{20,10}$	***AIEA Tech Doc 277 et 398***
	Electron	R_{50}	
	Proton	Dose absorbée ?	***AIEA Tech Doc 398***
Radio-protection	RX (filtration et fluorescence)	CDA, Φ_E	***Normes ISO 4037***
	Sources isotopiques de photons	Φ_E, …	
	Sources isotopiques de particules beta	Φ_E , …	***Normes ISO 6980***
	Neutrons (sources isotopiques et réactions nucléaires)	Φ_E , …	***Normes ISO 8529 et 12789***
Diagnostic	RX	CDA, $\Phi_{E\ (RQR\ et\ RQA)}$	***Norme CEI 61267***

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Moyens de mesure primaires en fonction de la grandeur à mesurer, du rayonnement et de l'application.

Grandeurs primaires	Rayon.	Energie	Dosimètres primaires	Utilisation
Dose absorbée dans les tissus sous 0,07 mm de profondeur	bêta	Energie max quelques centaines de keV à quelques MeV	Chambre d'ionisation à extrapolation	Radioprotection
Kerma dans l'air	RX et gamma	De quelques keV à quelques centaines de keV	Chambre d'ionisation à paroi d'air	Radioprotection, Diagnostic et Radiothérapie
Kerma dans l'air	RX et gamma	De quelques centaines keV à plusieurs MeV	Chambre d'ionisation à cavité	Radioprotection et Radiothérapie
Kerma de référence	RX et gamma	De quelques keV au MeV		Curiethérapie
Dose absorbée dans l'eau	^{60}Co, RX et électrons de haute énergie	Du MeV à quelques dizaines de MeV	Calorimétrie dans l'eau ou le graphite	Radiothérapie externe

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB



Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Grandeurs physiques/primaires (« primary quantities » en anglais) :

établissement et la comparaison des références nationales des différents pays. Toutes les autres catégories de grandeurs doivent leurs êtres « traçables », par le calcul et/ou l'étalonnage.

Grandeurs de protections (« protection quantities » en anglais) :

pour quantifier le risque d'effet stochastique de l'exposition aux rayonnement, établir des limites d'expositions des travailleurs et du public et vérifier leur respect dans le cadre de la radioprotection, définies par la CIPR,

Grandeurs opérationnelles (« operational quantities » en anglais) :

pour mesurer l'exposition des travailleurs et du public aux rayonnements ionisants développées par l'ICRU

Grandeurs pratiques (« practical quantities » en anglais) :

pour mesurer et optimiser l'exposition des patients subissant des examens diagnostics et la comparer aux niveaux de références en diagnostic définis pour chaque type d'examen,

Afin de compléter le panorama des grandeurs utilisées, nous devons ajouter celles relatives aux fortes doses rencontrées dans le cadre des **expositions accidentelles** et de la **radiothérapie** pour lesquelles une dénomination globale n'est, en générale, pas arrêtée ; peut être du fait de la similitude avec les grandeurs primaires et de la spécificité des applications.

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Patients

Travailleurs et public

60 millions d'examens / an

Grandeurs « pratiques »

Gy

200 000 traitements /an
4 millions de séances

Radiothérapies

Grandeurs physiques (primaires)

Gy

Grandeurs de « protection »

Sv/Gy

Situations accidentelles

qqes cas / an

Grandeurs « opérationnelles »

Sv

300 000 suivis /an dont
12 000 « doses » > 1mSv

Radioprotection | **Hors radioprotection**

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Précision requise

De 100 % à 50 %	De 30 % a 10 %	< 5 % à 2 %
Radioprotection des travailleurs et du public	**Radioprotection** des patients (diagnostic)	**Radiothérapie** (patient)
300 000 travailleurs suivis en France, **25 000 travailleurs avec *E* > au seuil de d'enregistrement,** **12 000 travailleurs *E* > 1 mSv**	**~60 millions d'actes par an** ~20000 Diagnostic ~32000 Dentaires ~600 Scanners ~2500 Mammographe	**~200 000 traitements par an** **~180 Centres** ~400 LINAC ~30 Cobalts ~90 Curiethérapie

Plus grande précision requise dans le secteur médical
Plus de personnes concernées dans le secteur médical

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Hypothèse vraisemblable (pays industrialisés) :

Augmentation de la demande de soins
(augmentation de la population et de son vieillissement),

Accès facilité aux soins
(augmentation de la population urbaine),

Extension de certaines procédures
(mammographie, tomodensitométrie, radiologie interventionnelle)

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Rad. Prot.

Etude radiobiologie (débouche sur une évolution des G.Phys.)

Difficulté d'approvisionnement de ^{137}Cs (RX 400-500 kV)

Indice de qualité des faisceaux de RX en Rad. Prot. (spectro.)

Rayonnement pulsé pour le diagnostic (Dosim. Electronique)

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Rad. Prot. → **Rad. Thérapie**

Cristallin : $H_p(3)$ radiologie-chirurgie interventionnelles

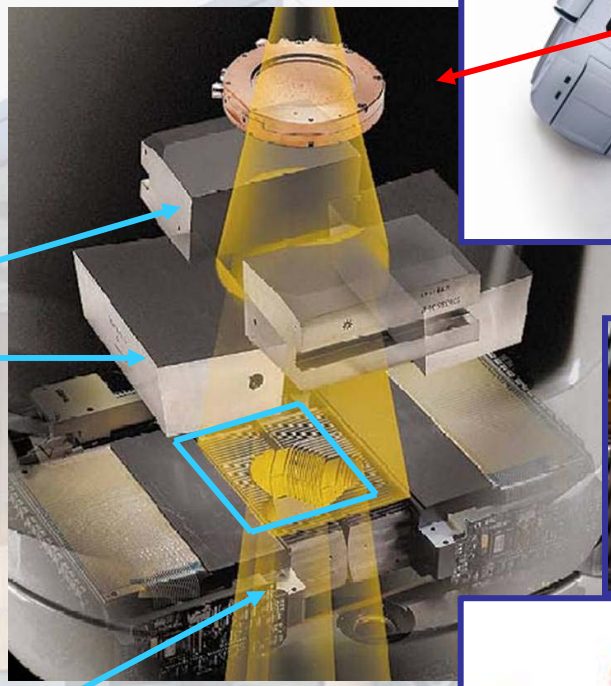
Doses périphériques (lors d'un traitement en radiothérapie)

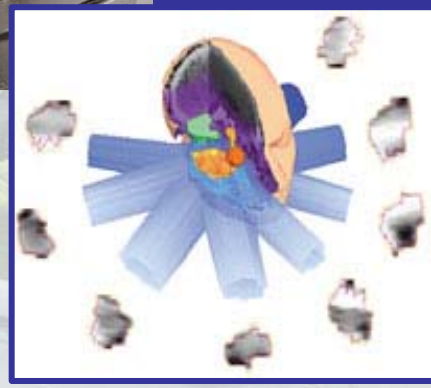
Radiothérapie de contact (nouvelles qualités de RX faible énergie)

Nouvelles conditions de référence RCMI, Arc thérapie (tomo), Stéréo.

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Contexte Radiothérapie conventionnelle / RCMI





Radiothérapie conventionnelle

✓Mâchoires ➔ champs rectangulaires

✓Champs d'irradiation > 3-4 cm

✓Champ d'irradiation de référence : 10 x 10 cm²

Radiothérapie Conformationnelle avec Modulation d'Intensité

✓Collimateur multilames ➔ champs complexes

✓Champs d'irradiation cm ➔ mm

✓Champ d'irradiation de référence 10 x 10 cm² non adapté!!

Besoin de références primaires adaptées aux petits champs d'irradiation

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Rad. Prot. → **Rad. Thérapie**

Cristallin : $H_p(3)$ radiologie-chirurgie interventionnelles

Doses périphériques (lors d'un traitement en radiothérapie)

Radiothérapie de contact (nouvelles qualités de RX faible énergie)

Nouvelles conditions de référence RCMI, Arc thérapie (tomo), Stéréo.

Référence en termes de dose absorbée dans l'eau en curiethérapie

Référence pour la hadron thérapie

Conclusions

Laboratoire National Henri Becquerel

LNE-LNHB

Scanner

IDS_C IDS_P ($CTDI_{100,c}$ $CTDI_{100,p}$)

$$IDS = \frac{1}{nT}\int_Z D(z)\,dz$$

IDSP Indice de Dose Scanographique Pondéré (CTDI)

$$IDSP = \left(\tfrac{1}{3} IDS_c + \tfrac{2}{3} IDS_p\right)$$

Gy

PLD Produit "Longueur x Dose" (DLP)

Gy.cm

mode séquentiel N rotations de T cm pour C mAs et i séquences

$$PLD = \sum_i IDSP_n\, T\, N\, C$$

mode hélicoïdal sur longueur L pendant un temps t pour C mAs et i séquences

$$PLD = \sum_i IDSV_n\, L\, C \qquad IDSV_n = \frac{IDSP_n}{Pitch} = IDSP_n \frac{NT}{\Delta d}$$

Diagnostic

Classique, Mammographie Dentaire Fluoroscopie

(D_gN, Dose glandulaire moy. = KASE g c s) (DWP, *produit "Dose x épaisseur"*)

Gy

Gy

De, Dose dans l'air à la surface d'entrée, par cliché (ESD)

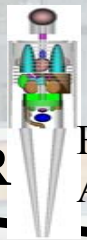
PDS, Produit "De x Surface", pour un examen (DAP)

Gy.cm²

$$PDS = \iint_{x\,y} D_e(x,y)\,dx\,dy$$

$$K_{air} = \frac{Q}{\rho_{air}\,V}\,\frac{W_{air}}{e}\,\frac{1}{1-g}\prod_i k_i$$

Calcul vers *E*



CIPR

Fantômes Anthropo.

en un point

Grandeurs Physiques (Primaires)

γ, RX — K_{air}, D_W

n, γ, RX, PC — Φ

b, RX — $D_t(0,07)$

Gy (gray)

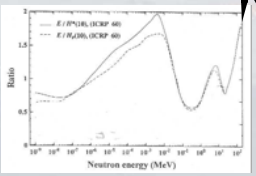
Grandeurs de Protection

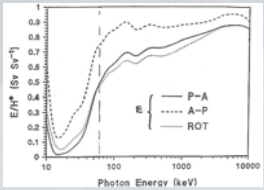
$D_{T,R}$ dose engagée à l'organe

H_T dose équivalente à l'organe

E dose efficace

Gy / Sv





Estimateurs conservatifs !

Corps entier et extrémités

Grandeurs Opérationnelles

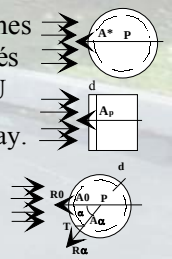
$H'(d)$, $H^*(d)$, $Hp(d)$

Sv (sievert)

ICRU

Fantômes simplifiés tissu ICRU

Champ de Ray. simplifiés expansés unidirectionnels



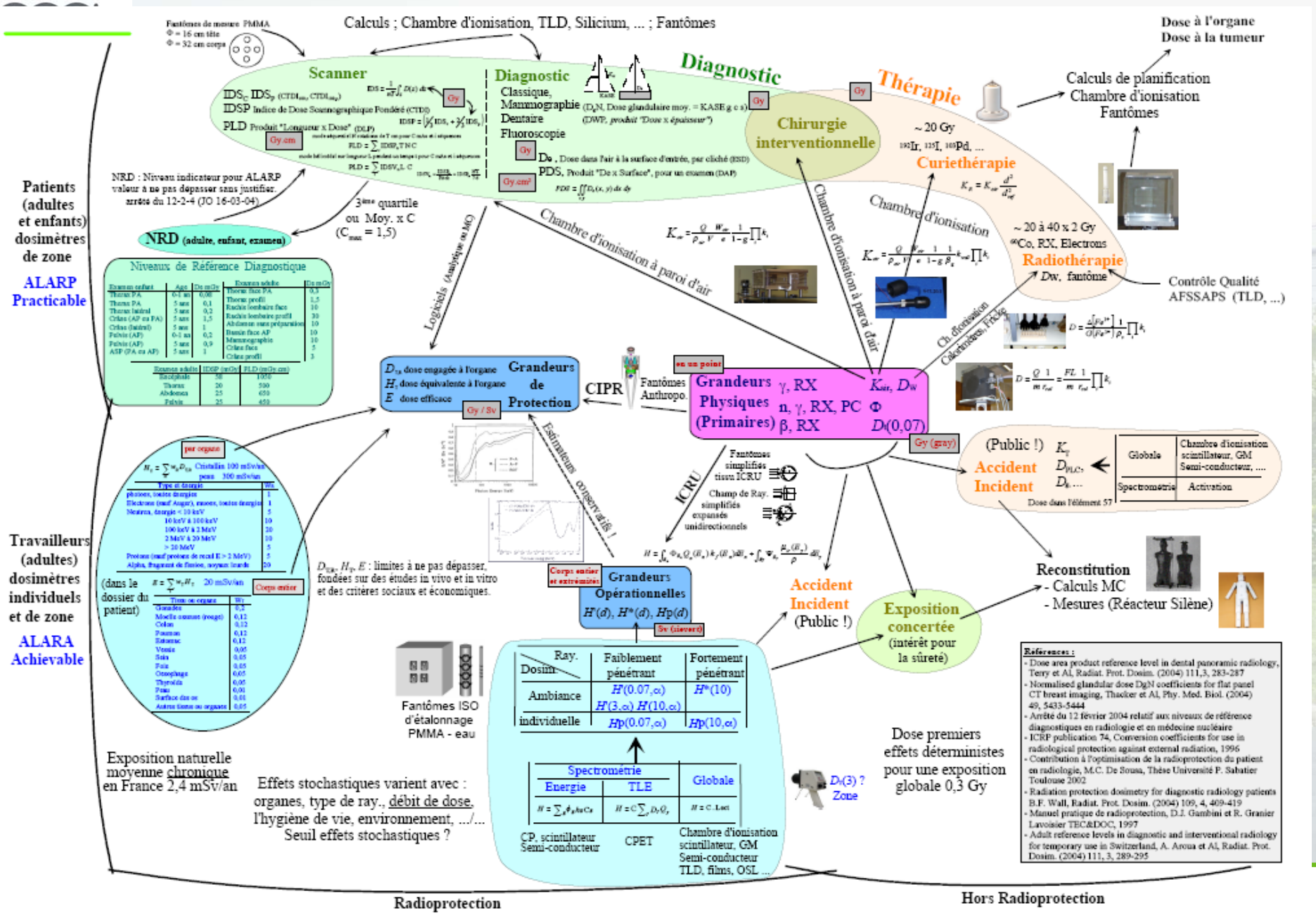
Conclusions

Laboratoire National Henri Becquerel
LNE-LNHB

Lexique Français - anglais

Français	Anglais	Français	Anglais
Dose absorbée ($_D$)	Absorbed dose	IDS (indice de dose scanographique)	CDTI (computerized tomographic dose index)
Kerma dans l'air (K_{air}, K_a)	Air kerma	IDSP (indice de dose scannographique pondéré)	$CDTI_W$ (weighted computerized tomographic dose index)
Fluence (F)	Fluence	IDSV (indice de dose scannographique volumique)	$CDTI_{vol}$ (volumic computerized tomographic dose index)
Equivalent de dose directionel (H'(d,α))	Directional dose equivalent	Produit Dose Longueur (PDL)	Dose Lenght Product (DLP)
Equivalent de dose ambiant (H^*(d))	Ambient dose equivalent	Dose à l'entrée (De)	Entrance dose
Equivalent de dose individuel (H_p(d))	Personal dose equivalent	Produit dose surface (PDS)	Dose Area Product (DAP)
Dose équivalente (H_T)	Equivalent dose	Dose efficace (E)	Effective dose

Conclusions



Laboratoire National
Henri Becquerel

LNE-LNHB

Je vous remercie pour votre attention