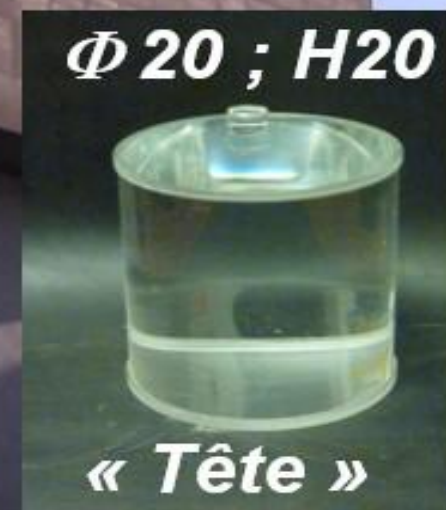




Tutorial

Mise en place du suivi dosimétrique du cristallin (traçabilité et méthode de suivi)

Jean-Marc Bordy
Université Paris-Saclay, CEA-List,
Laboratoire National Henri Becquerel (LNE-LNHB)
F91120, Palaiseau , France





Tutorial

Mise en place du suivi dosimétrique du cristallin (traçabilité et méthode de suivi)



**CONDITIONS DE LA TRAÇABILITÉ AUX
RÉFÉRENCES NATIONALES**



**CHOIX DE LA MÉTHODE DE
MESURE DIRECTE ET INDIRECTE**



1 ■ Conditions de la traçabilité aux références nationales

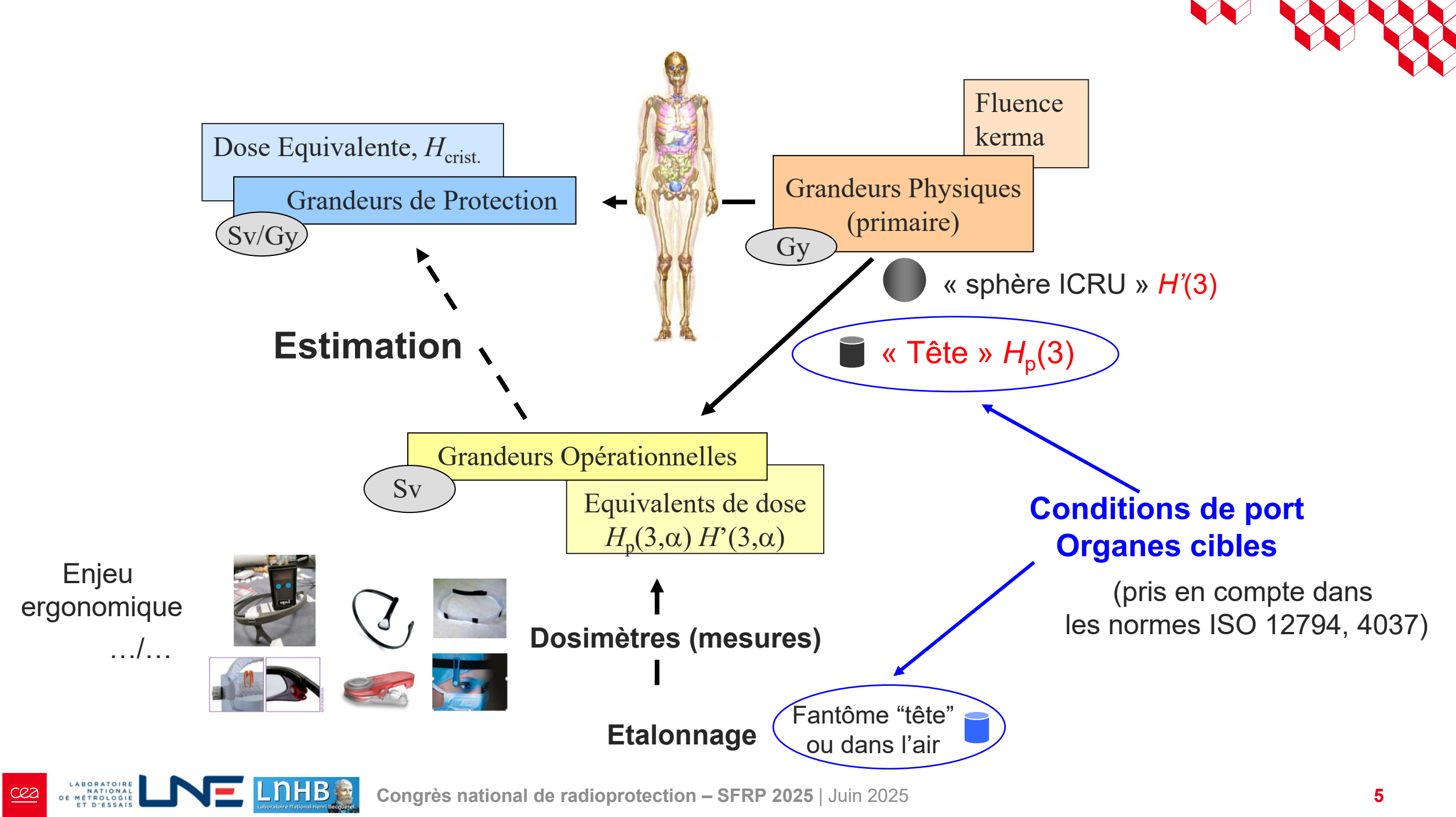


Le cristallin est cas particulier :

☐ Il ne fait pas parti de la liste des organes pour le calcul de la dose efficace

Cependant

☐ Il est prévu dans les dispositions légales de réaliser une mesure de routine en dosimétrie individuelle ou de zone afin de vérifier le respect de la limite d'exposition en termes de dose équivalente - $H_{\text{cristallin}}$





2. Choix méthode directe et indirect

L'estimation de $H_{\text{Cristallin}}$ implique dans le meilleur des cas une mesure directe de $H_p(3)$ avec un dosimètre spécialement étudié pour mesurer $H_p(3)$, dosimètre porté au niveau de l'œil, **derrière** l'éventuelle protection individuelle (lunette, visière ...)

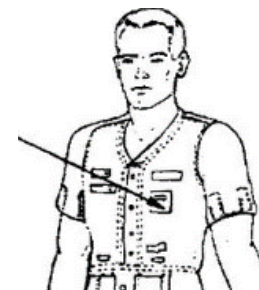
Une solution de compromis entre la **contrainte** de porter un dosimètre supplémentaire près de l'œil, et le besoin d'un **suivi précis** de l'exposition du cristallin, peut conduire au choix d'une méthode de mesure indirecte. C'est-à-dire :

Estimer $H_p(3)$ à partir de la mesure d'une autre grandeur opérationnelle (ex. $H_p(10)$ pour la dosimétrie corps entier portée au niveau du tronc)

Etude de poste

Routine

$$R = H_p(3) / H_p(10) \quad \rightarrow \quad H_p(3) = R \ H_p(10)$$

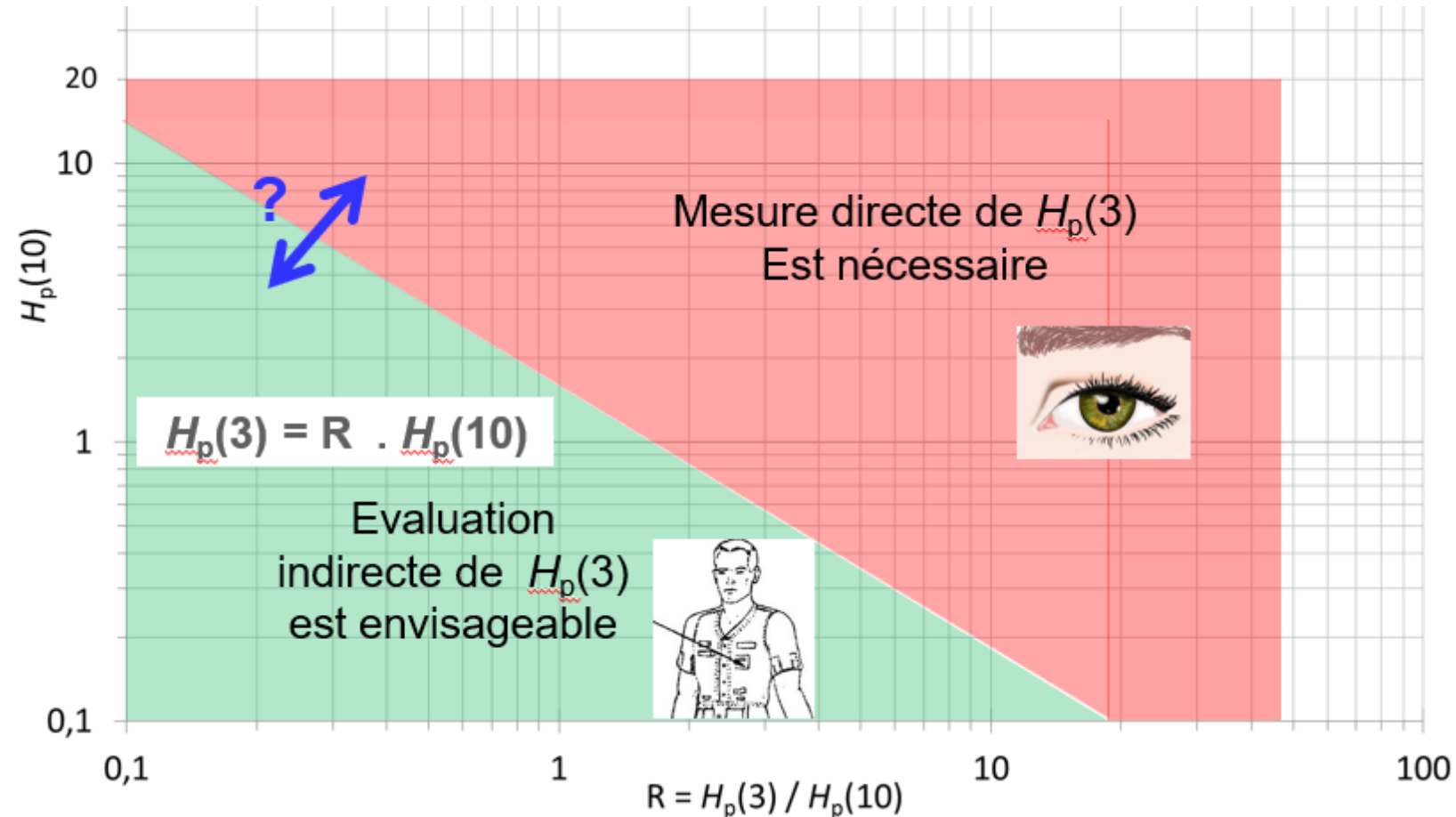


Le recours à la méthode indirecte introduit une incertitude supplémentaire $u(R)$

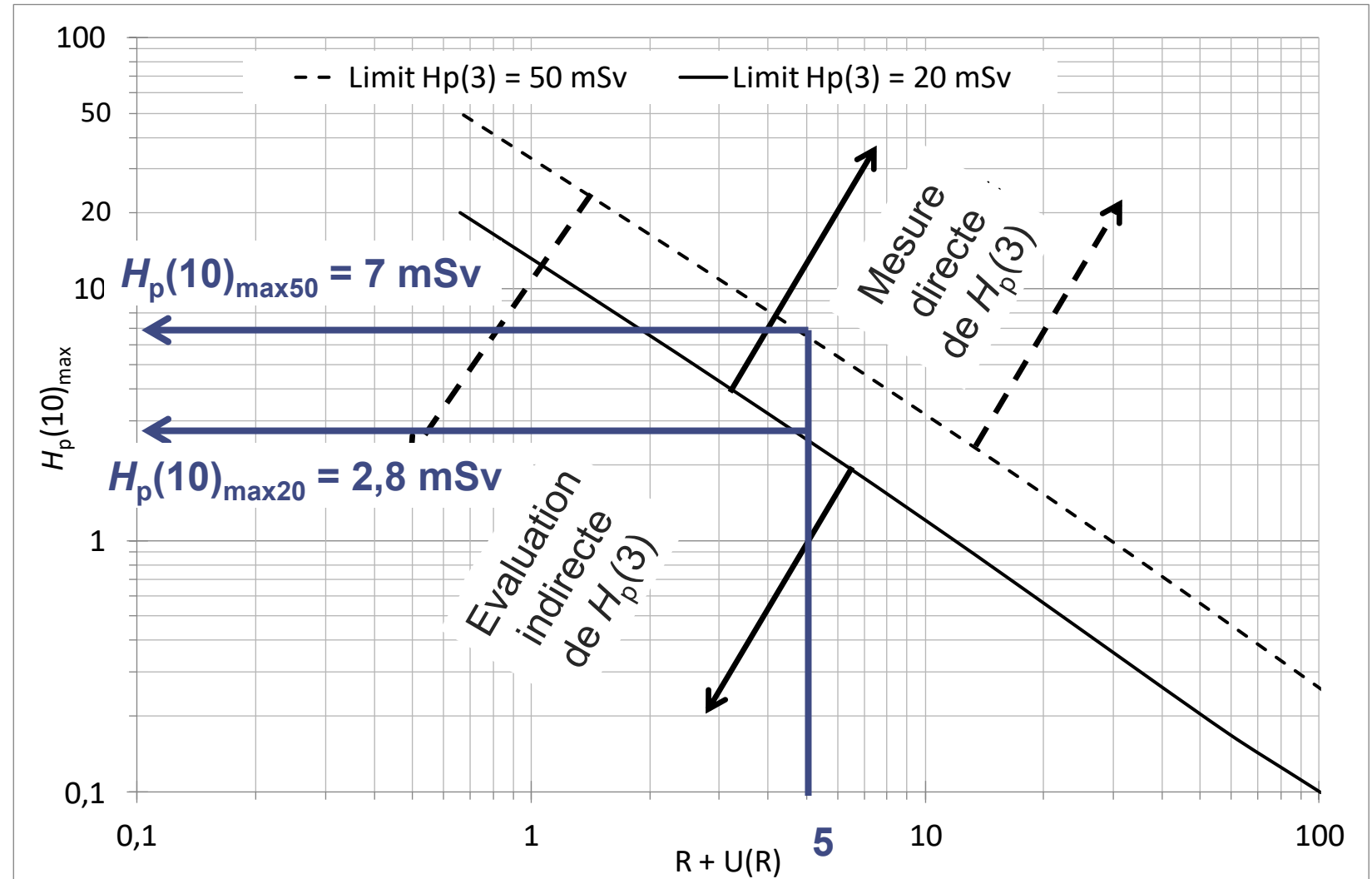
$$H_p(3) = R \cdot H_p(10)$$

$$u(Hp3) = \sqrt{\left(\frac{\partial Hp3}{\partial R}\right)^2 u^2(R) + \left(\frac{\partial Hp3}{\partial Hp10}\right)^2 u^2(Hp10)}$$

On doit donc justifier l'utilisation de la méthode indirecte, avec un niveau de confiance statistique (95%), en minimisant le risque de ne pas signaler un dépassement de la limite d'exposition en termes de $H_p(3)$

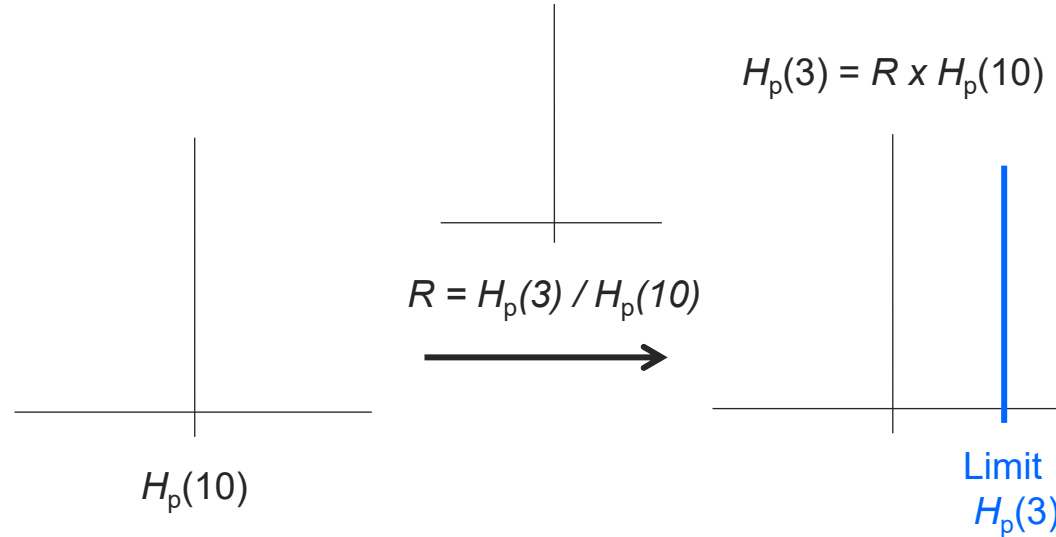


On peut définir
une valeur
mesurée
 $H_p(10)_{\max}$ en
dessous de
laquelle une
évaluation
indirecte de $H_p(3)$
est réalisable



Attention : le champ de rayonnement doit rester conforme à celui obtenu lors de l'étude de poste

Proportionnalité
directe simple

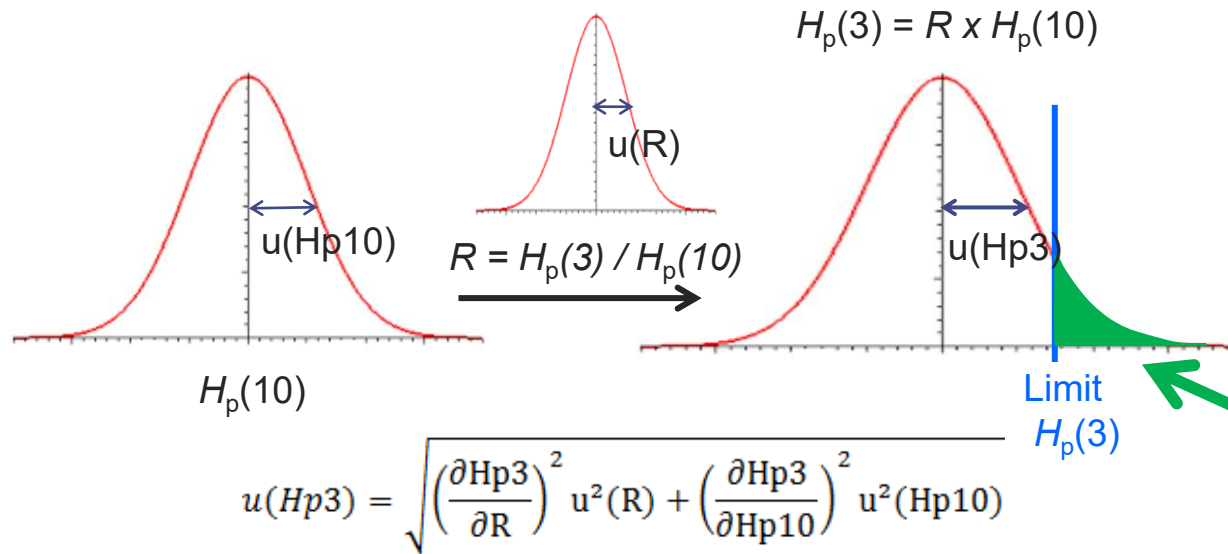


Monde parfait



On doit garder à l'esprit que
l'évaluation indirecte conduit
une diminution de la précision
de la mesure.

Avec les
incertitudes de
mesure



Situation réelle

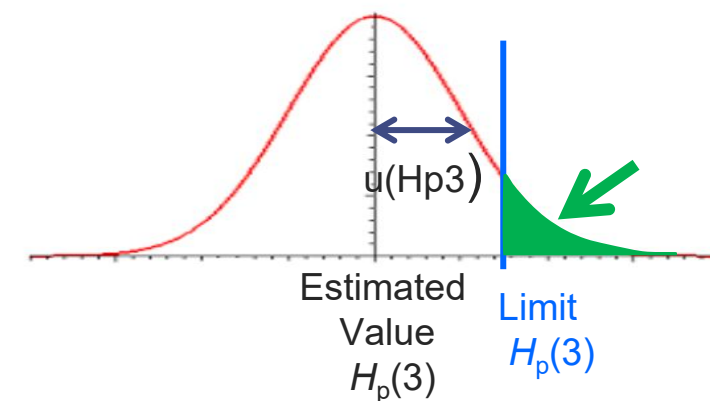


Risque de dépassement
de la limite alors que la
mesures indirecte
demeure sous cette limite.

Exemple pour la limite $H_p(3) = 20 \text{ mSv}$, $u(R) = 25\%$

R + U(R)	5		3		2		1		0,5	
R	3,75		2,25		1,5		0,75		0,375	
$H_p(10)$	$H_p(3)$	P	$H_p(3)$	P	$H_p(3)$	P	$H_p(3)$	P	$H_p(3)$	P
< 2	< 3,75	< 1E-05	< 2,25	< 1E-07	< 1,5	< 1E-06	< 0,75	< 1E-06	< 0,375	< 1E-06
2,0	7,50	1,2E-05	4,50		3,00		1,50		0,75	
3,0	↓		6,75		4,50		2,25		1,13	
4,0			9,00	5,6E-04	6,00		3,00		1,50	
5,0			↓		7,50	3,5E-06	3,75		1,88	
6,0					9,00	4,5E-04	4,50		2,25	
8,0					↓		6,00		3,00	
8,9							6,67		3,33	
10,0							7,50	2,1E-06	3,75	
12,0							9,00	3,5E-04	4,50	
13,3							10,0	2,7E-03	5,00	
15,0	↓		↓		↓		↓		5,63	
20,0									7,50	1,6E-06

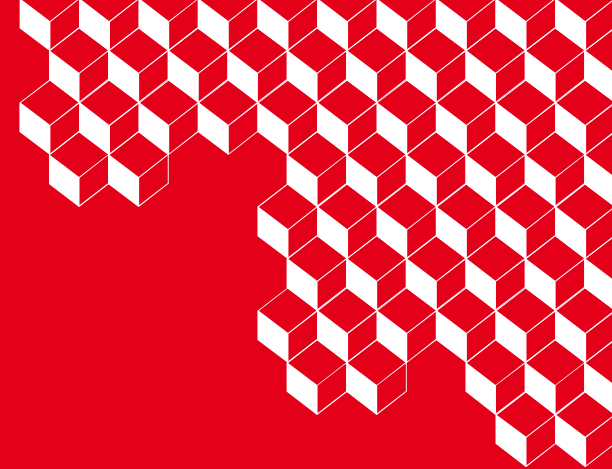
Domaine de mesure directe



Pour cet exemple
Probabilité inférieure à
 $2,7 \cdot 10^{-3}$



list



Merci pour votre attention

Jean-Marc Bordy
Université Paris-Saclay, CEA-List,
Laboratoire National Henri Becquerel (LNE-LNHB)
F91120, Palaiseau , France

Congrès de la SFRP

Mise en place du suivi dosimétrique du cristallin Orano La Hague

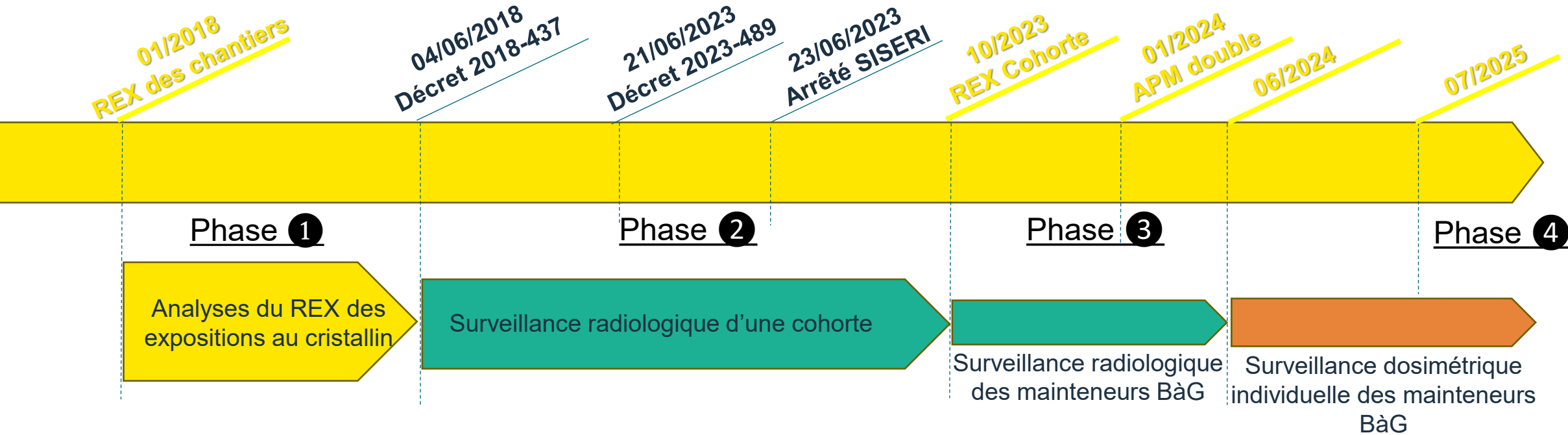
LOPEZ Gérald
17/06/2025





00 • Le site de la Hague

Sur le site de la Hague 6000 personnes interviennent annuellement sur les installations et réalisent 850 000 opérations
Certaines activités peuvent présenter des expositions au cristallin non couverte par les expositions à l'organisme entier, une stratégie relative au cristallin a donc dû être mise en œuvre.



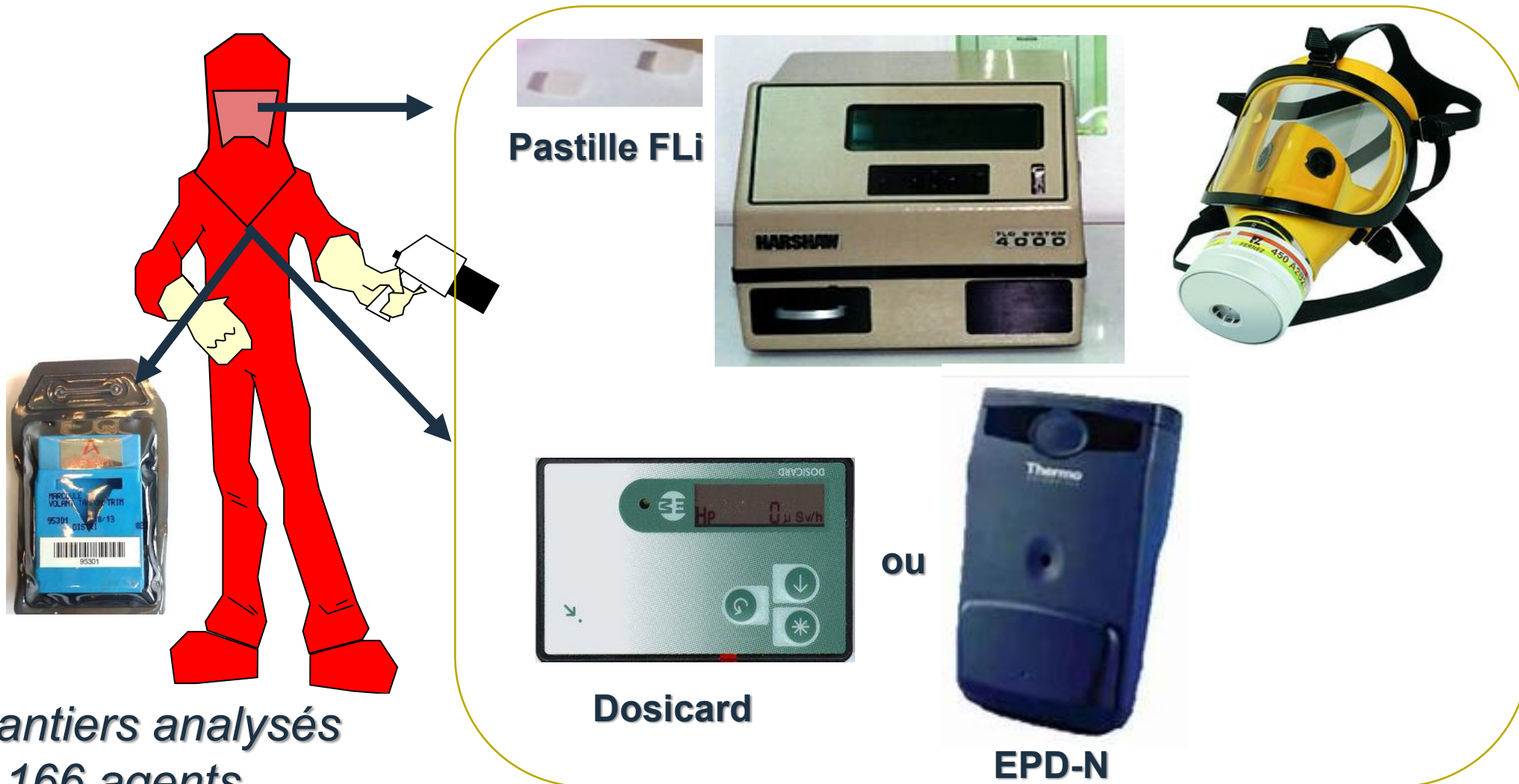


orano

Donnons toute sa valeur au nucléaire

01 • Analyse du REX des chantiers à risque au cristallin

01 • Le suivi dosimétrique individuel sur les chantiers analysés



6 chantiers analysés
166 agents
1600 résultats de dosimétrie

Analyses des données « Opérationnelles »

01 • Exemple de chantiers de l'étude et caractéristiques

Maintenance et assainissement d'équipement en GP



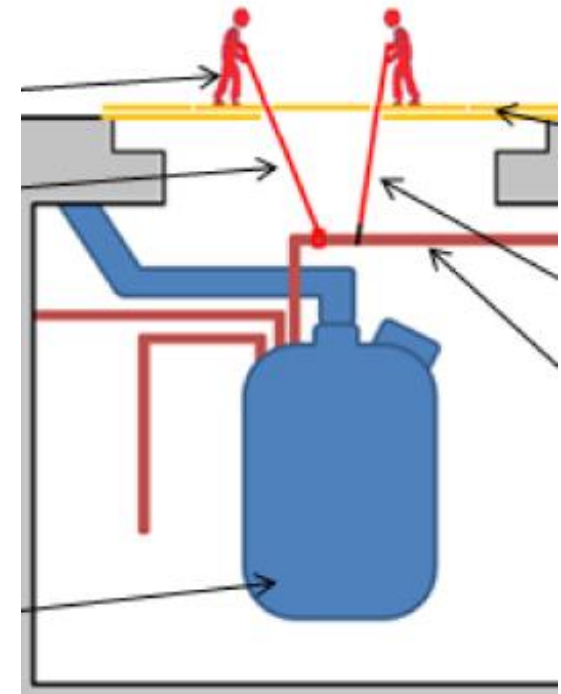
*Hétérogénéité d'exposition
Cs137-Sr/Y90
Béta / Gamma
Visière 8mm+Tablier*

Traitement des OX



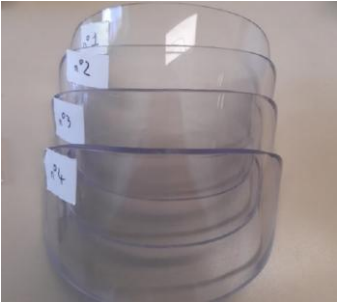
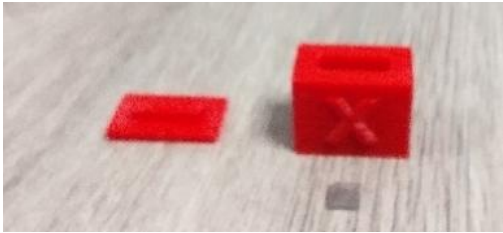
*Tvx en BâG
Am/Pu
Gamma-neutron
Port de tablier*

Démantèlement d'un dissolvant



*Hétérogénéité d'exposition
Cs137
Gamma
/*

01 • Le rapport « R »



$$R = \frac{Hp(3)}{Hp(10)}$$

Dosicard



ou



EPD-N

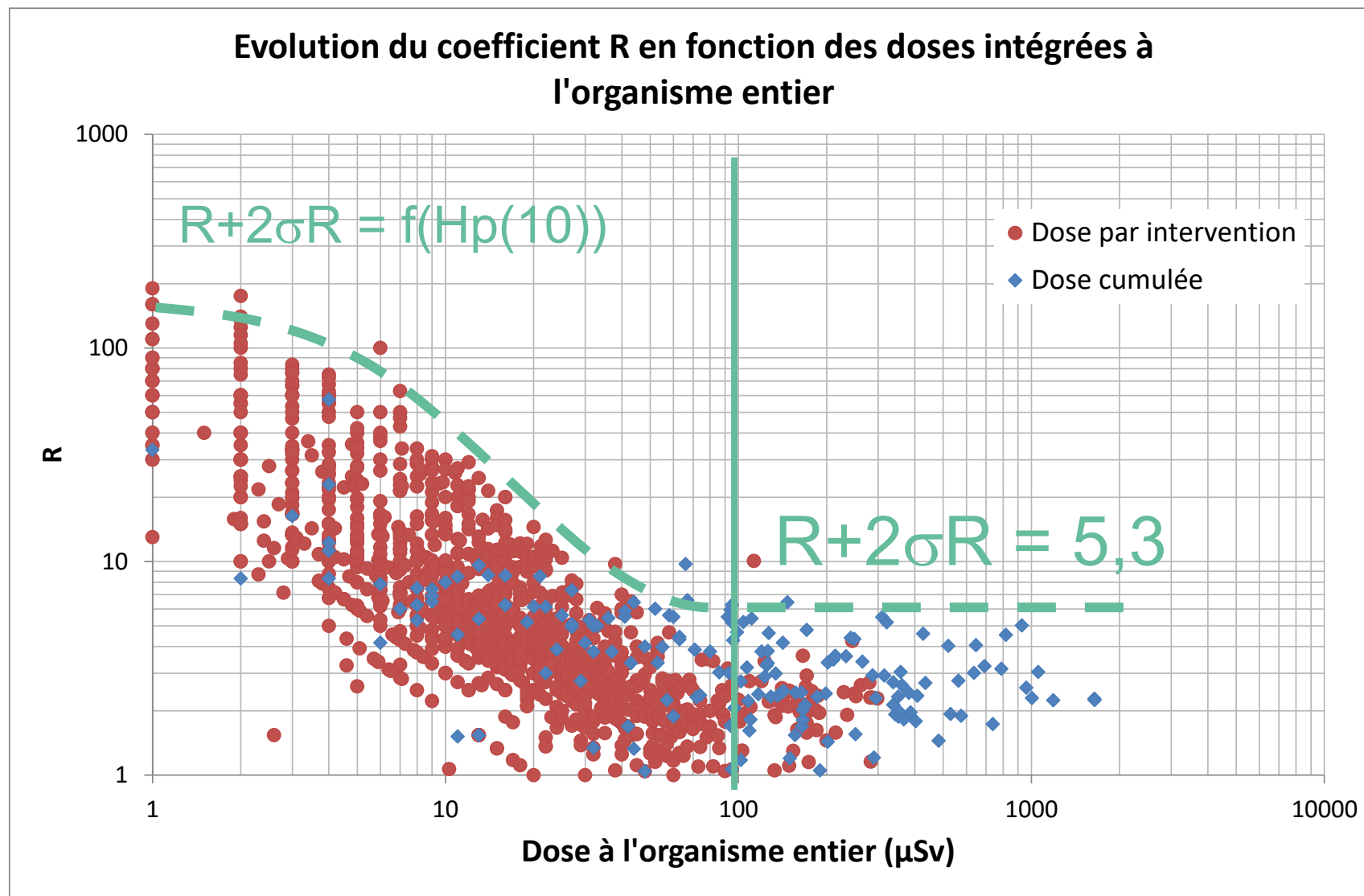
$$Hp(3) = Hp(3)_\gamma + Hp(3)_{neutron} + Hp(3)_\beta$$

$$Hp(3)_{neutron} = 1,2 \times Hp(10)_{neutron}$$

Spectre type	Lieu de réalisation des spectres	Energie moyenne neutrons	Coefficient de conversion Hp(10)n → Hp(3)n
Pu « frais »	Extérieur BAG	1,5 MeV	1
Pu « américié »	Extérieur BAG	1,25 MeV	1,2
Produits de fission	Extérieur protection biologique pont de transfert des conteneurs standard de déchets vitrifiés	0,22 MeV	1,15
Combustible utilisé	Extérieur château de transport du combustible utilisé	0,61 MeV	1

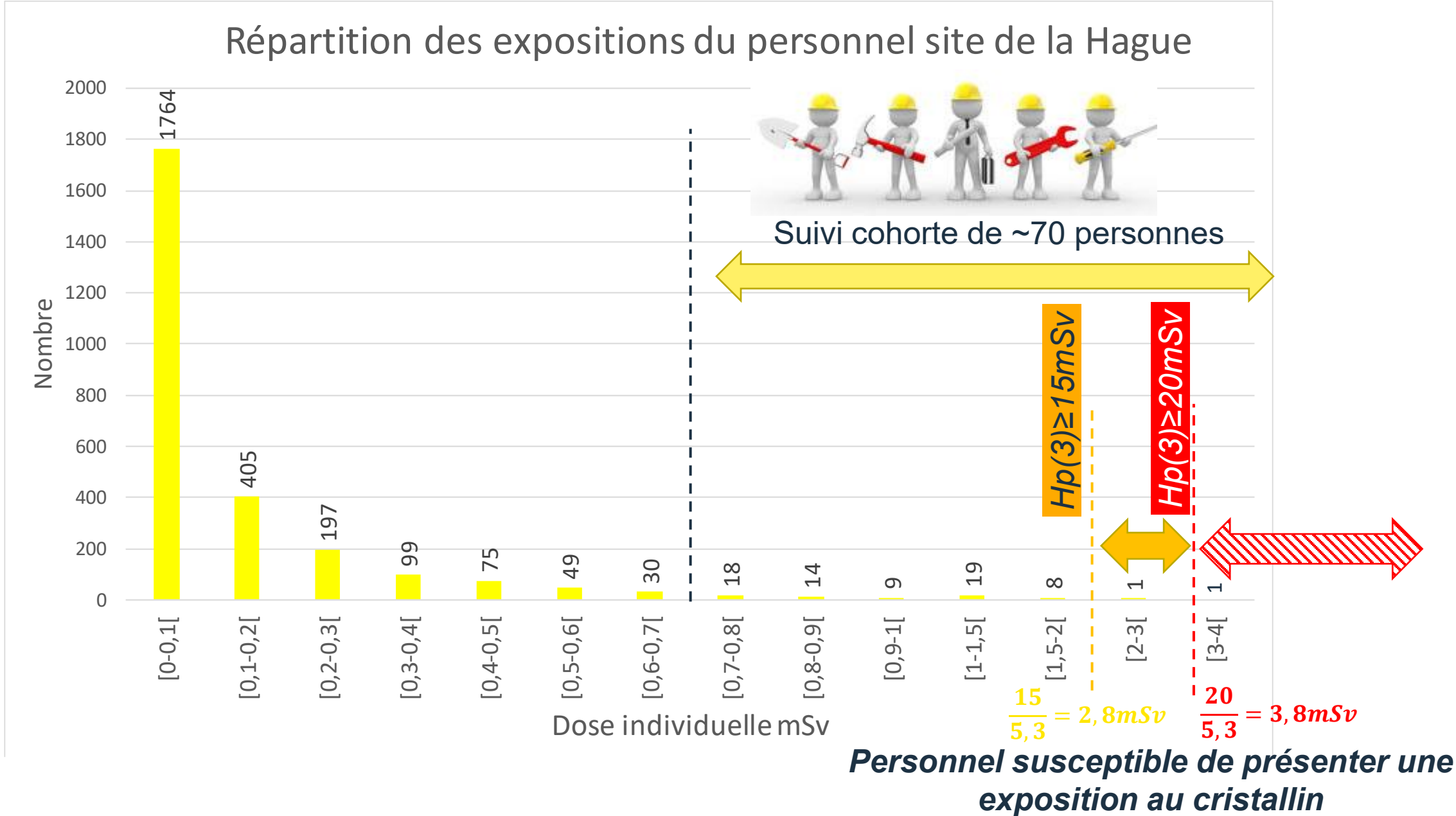
Neutron energy (MeV)

01 • Analyse de R en fonction Hp(10)



$$R + 2\sigma R = e^{-8,2E-4 \times \ln(Hp(10))^5 - 0,0224 \times \ln(Hp(10))^4 + 0,2166 \times \ln(Hp(10))^3 - 0,775 \times \ln(Hp(10))^2 + 0,034 \times \ln(Hp(10)) + 5,07}$$

01 • Conclusion de l'étude



02 • Surveillance radiologique d'une cohorte

02 • Constitution de la cohorte et modalité de suivi



Diversités des régimes

Diversités des secteurs

Affectation	2x8	3x8	5x8	HN	Total général
RP Dém.	1			2	3
RP cisailage	1		4	3	8
RP vitrif	3			4	7
Exploitant château	1				1
Exploitant piscine			17		17
Exploitant Piscine			7		7
Mainteneur vitrif		1			1
Mainteneur divers	1				1
Mainteneurs Zone 4	4				4
Laboratoire	7			1	8
Maintenance BàG	9			1	10
Exploitant Pu	3				3
Total général	30	1	28	11	70

Suivi de 2018 à 2023



Type de Campagne de conditionnement	Couleur étui PVC	
	Mois pair	Mois impair
Cristallin mensuels clients internes et externes	Caramel	Bordeaux
Cristallin trimestriels clients internes et externes	Vanille	Noir

02 • Analyse des coefficients « R »

résultats dosimétrique cohorte année 2018				
N° agent	Service	Dose organisme entier en mSv	Dose cristalin en mSv	coefficient R
1	Maintenance secteur Plutonium	3,17	5,89	1,86
3	Maintenance secteur Plutonium	1,2	3,2	2,67
7	Maintenance secteur Plutonium	0,87	2,33	2,68
4	Maintenance secteur Plutonium	1,13	2,06	1,82
2	Radioprotection démantèlement	1,95	1,65	0,85
6	Maintenance secteur Plutonium	1,04	1,6	1,54
8	Maintenance secteur Plutonium	0,72	1,44	2,00
12	Maintenance secteur Plutonium	0,27	1,3	4,81
5	Radioprotection laboratoires	1,07	0,63	0,59
14	Maintenance secteur Plutonium	0,15	0,57	3,80
13	Maintenance secteur Plutonium	0,17	0,45	2,65
15	Radioprotection secteur Plutonium	0,12	0,43	3,58
11	Radioprotection déchets	0,32	0,29	0,91
16	Radioprotection secteur Plutonium	0,12	0,25	2,08
9	Radioprotection vitrification	0,58	0,22	0,38
10	Radioprotection cisailage	0,52	0,17	0,33

Données initiales

1783

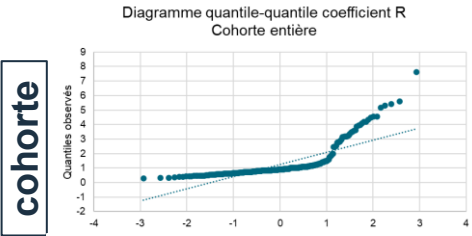
Données exploitables

295

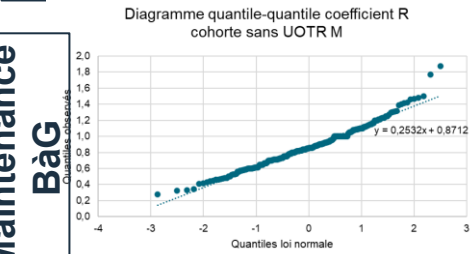


QQ-plot

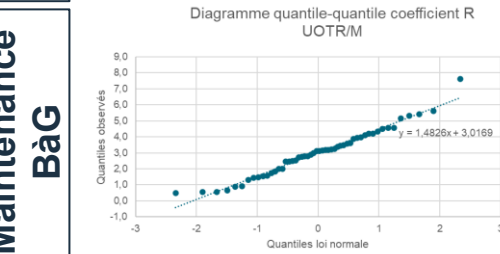
Test de Kolmogorov Smirnov



Loi non normale



Loi normale



Loi normale

Population

R avec niveau de confiance 97,5 %
Type A

Cohorte hors Maintenance BÀG

1,36

Maintenance BÀG

5,99

02 • Conclusion de l'analyse

Collaborateurs Orano Recyclage hors Maintenance BàG

- $Hp(3) < 5 \text{ mSv / an}$
- ✓ Validation catégorie B ($< 15 \text{ mSv / an}$)
- ✓ Pas de surveillance radiologique nécessaire ($< 10 \text{ mSv / an}$)
- ✓ Avec coefficient $R = 1,36$: Surveillance radiologique nécessaire si $Hp(10) > 7,4 \text{ mSv / an}$

Période	Dose maximale au cristallin hors UOTR/M (en mSv)	Dose maximale au cristallin UOTR/M (en mSv)
2018	1,65	5,89
2019	1,16	7,44
2020	1,02	13,63
2021	1,69	8,07
2022	2,63	11,82

Collaborateurs Maintenance BàG

- $Hp(3) \text{ cohorte} < 15 \text{ mSv / an}$
- ✓ Validation catégorie B ($< 15 \text{ mSv / an}$)
- ✓ Surveillance radiologique nécessaire du service UOTR/M ($> 10 \text{ mSv / an}$)

→ La cohorte est réduite aux équipes de maintenance Boite à Gants

03 • **Surveillance radiologique des mainteneurs boîte à gants**

03 • Suivi de la cohorte



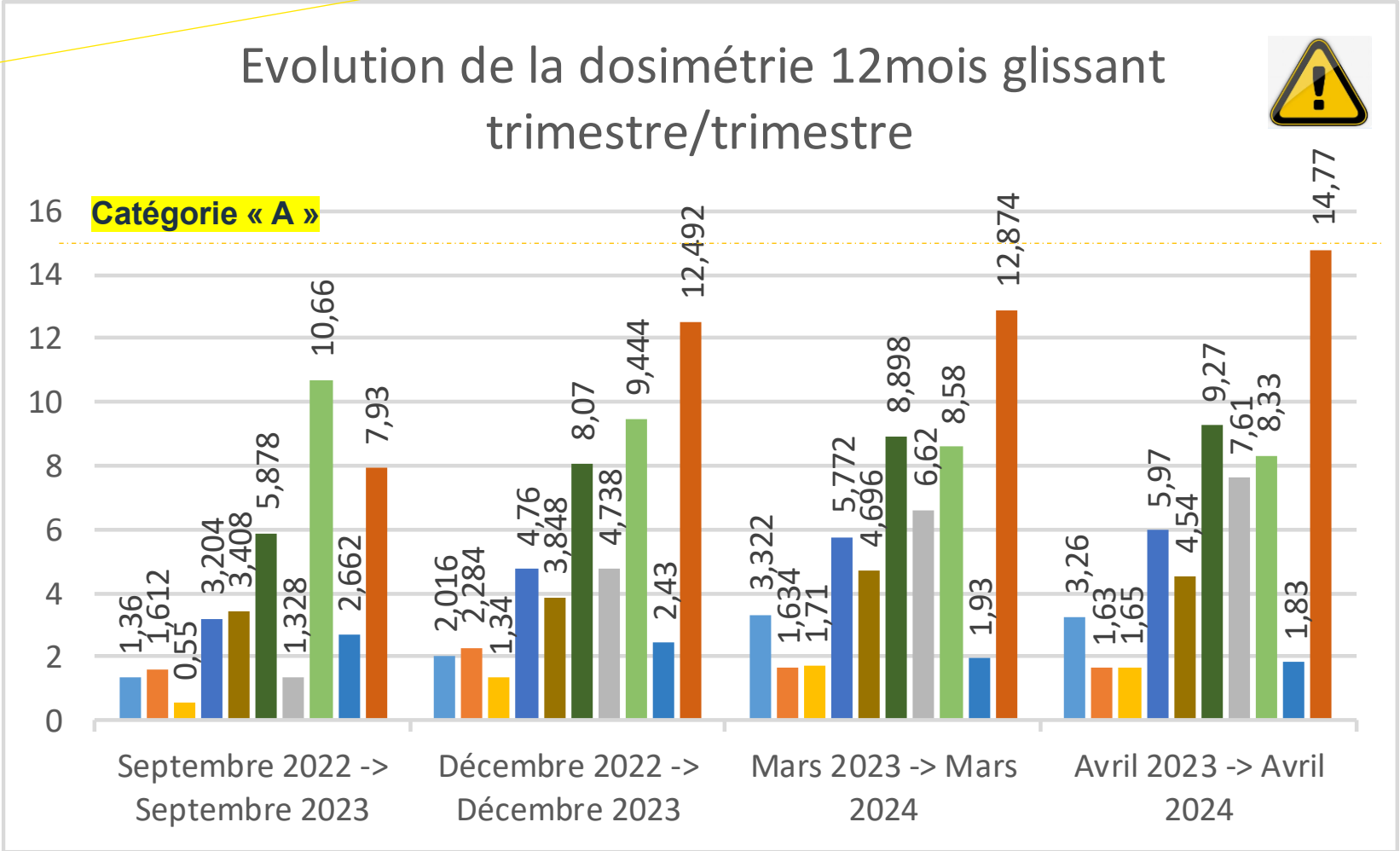
$$Hp(3)_{cristallin} = Hp(3)_{\gamma cristallin} + 1,2 \times Hp(10)_{n OE}$$

Dans le suivi mensuel de la dosimétrie cristallin nous avons constaté une augmentation des doses de certains opérateurs nous approchant de la limite de catégorie « A »

Origines principales :

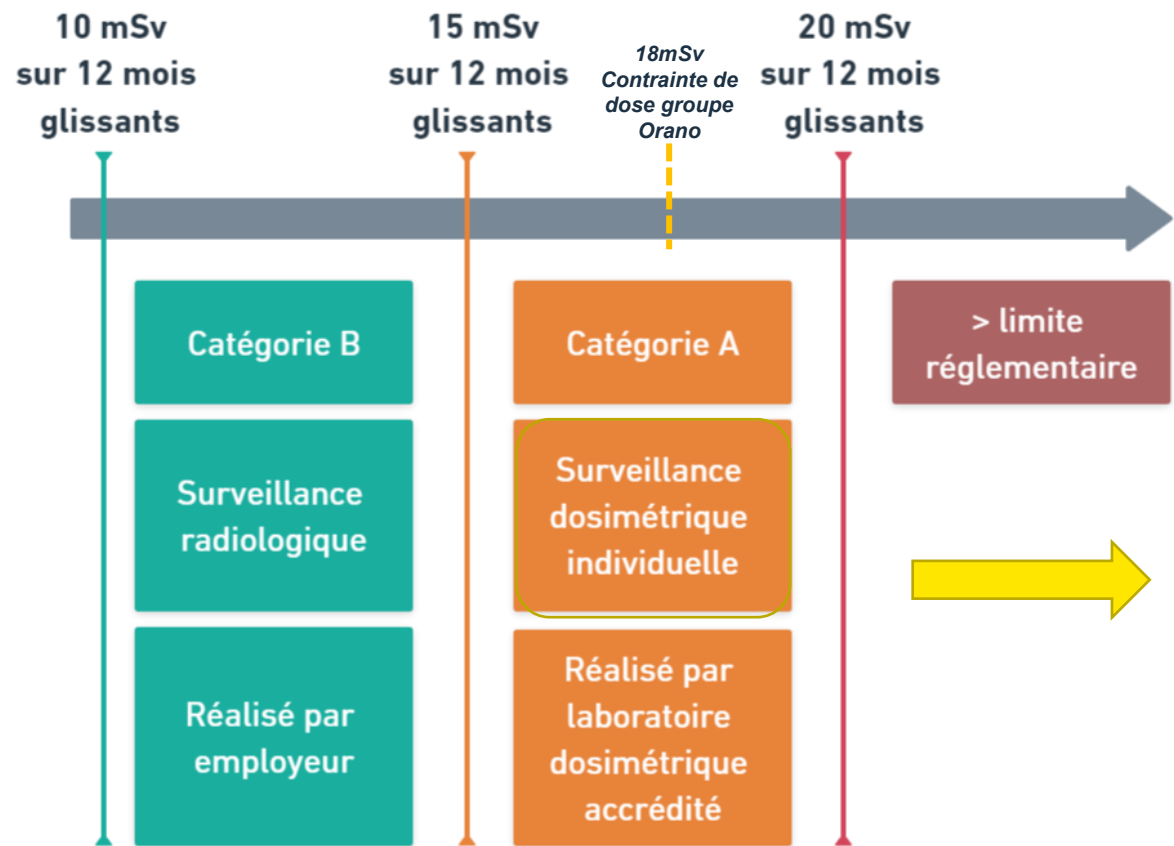
- APE long et simultané des 2 UO
- Pb d'effectifs (arrêts)
- Choix opérationnel « l'équipe qui démonte est celle qui remonte »
- Morphologie...

Evolution de la dosimétrie 12mois glissant trimestre/trimestre



03 • Suivi de la cohorte

Q/R DGT/ASN 26 juin 2019
Décret 2023-489



Arrêté du 26 juin 2019 relatif à la surveillance individuelle de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants

Lorsque les conditions de travail ne permettent pas le port de dosimètre adapté à la mesure de la dose au cristallin ou aux extrémités, l'employeur, avec l'appui du conseiller en radioprotection et du médecin du travail définit une méthode alternative permettant d'extrapoler la dose reçue au cristallin ou aux extrémités à partir de celle mesurée pour l'organisme entier ou par un dosimètre porté au plus près de l'organe concerné. Il apporte la démonstration que la méthode retenue présente la même fiabilité que celle reposant sur la mesure de la dose au cristallin ou aux extrémités et consulte le conseil social et économique.

Cette méthode alternative peut être également retenue par l'employeur, avec l'appui du conseiller en radioprotection et du médecin du travail, lorsque la dose efficace, organisme entier, est représentative de la dose équivalente reçue au cristallin ou aux extrémités, et ne nécessite pas l'usage d'un dosimètre dédié.

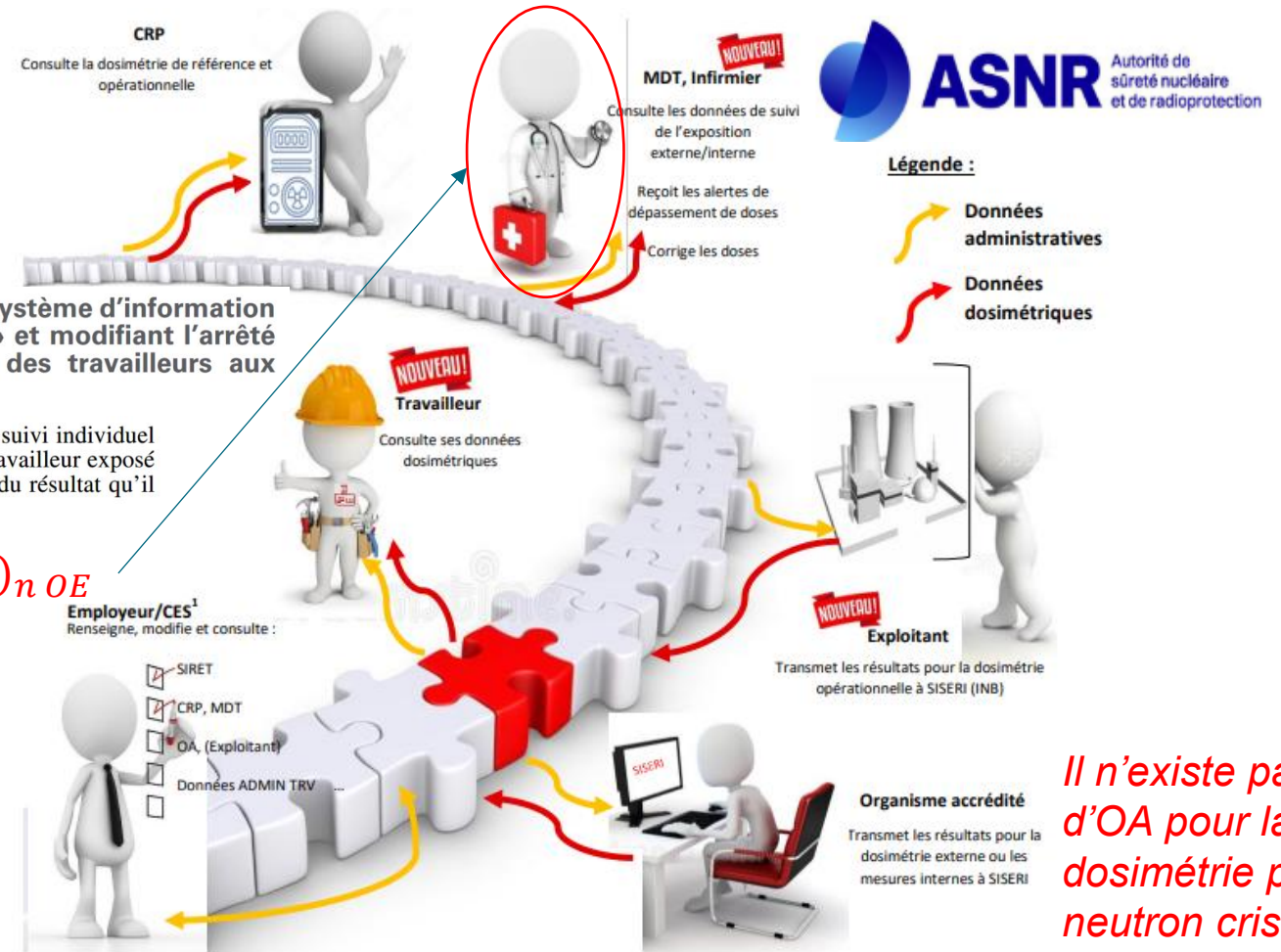
➔ Contrairement à MELOX Principe non retenu sur la Hague car le personnel disposait déjà d'un suivi par dosimétrie à lecture différée

➔ Passage en catégorie « A » du personnel de maintenance BÀG (mécanicien) et en mode de suivi dosimétrique individuelle par dosimétrie à lecture différée au cristallin

03 • Suivi de la cohorte – rôle du médecin du travail

Art. 25. – I. – Seul le médecin du travail, désigné par l'employeur dans SISERI, assurant un suivi individuel renforcé, peut saisir dans SISERI un résultat lié à la surveillance dosimétrique individuelle d'un travailleur exposé qui ne provient pas d'un organisme accrédité. Il est responsable de la pertinence et de la qualité du résultat qu'il saisit dans SISERI.

$$Hp(3)_{cristallin} = Hp(3)_{\gamma\text{ cristallin}} + 1,2 \times Hp(10)_{nOE}$$

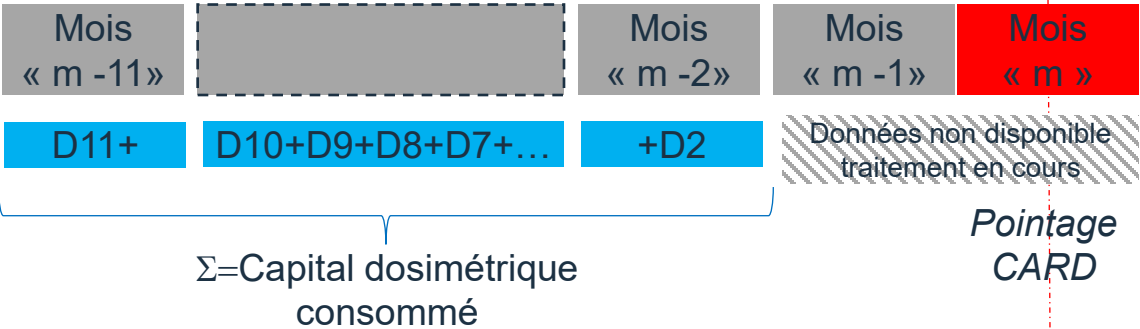


*Il n'existe pas
d'OA pour la
dosimétrie passive
neutron cristallin*

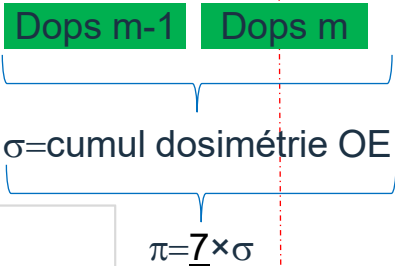
04 • Moyens de prévention et de surveillance complémentaire

04 • Le suivi dosimétrique en temps réel – Contrôle des accès

Données de dosimétrie à lecture différée au cristallin

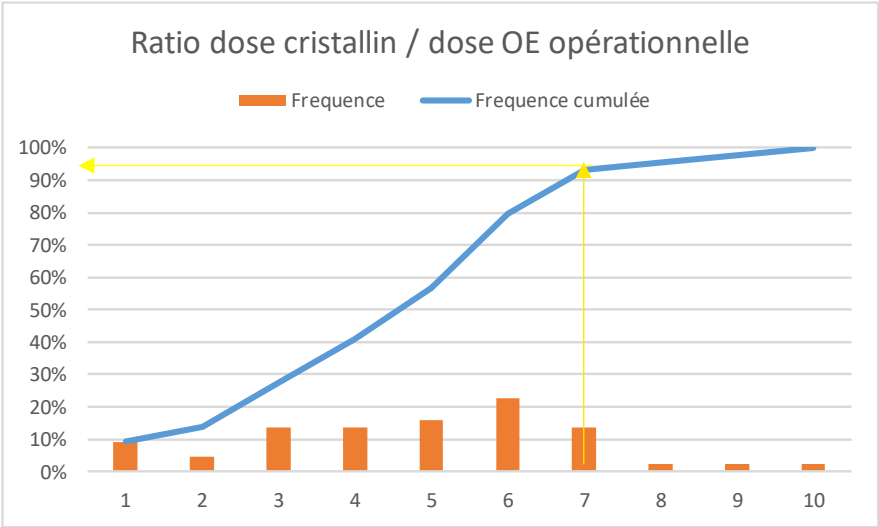


Données de dosimétrie opérationnelle OE



Extrapolation dosi cristallin via dosi ops

Test d'autorisation d'accès en zone 95%

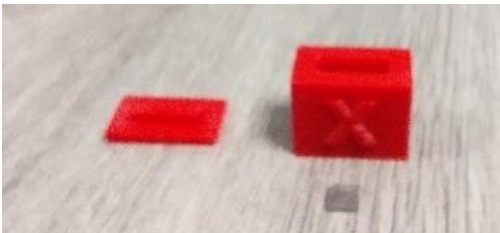


Si $(\Sigma + \pi) > 18$
Blocage CARD

04 • Moyens de protection et de mesure

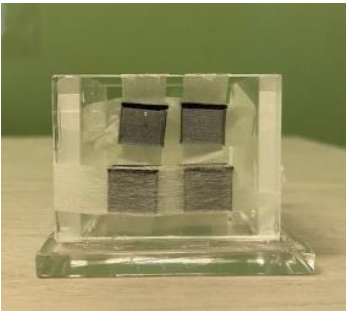
- Protection individuelle
- Le suivi en intervention

Limite de dose par intervention 300µSv



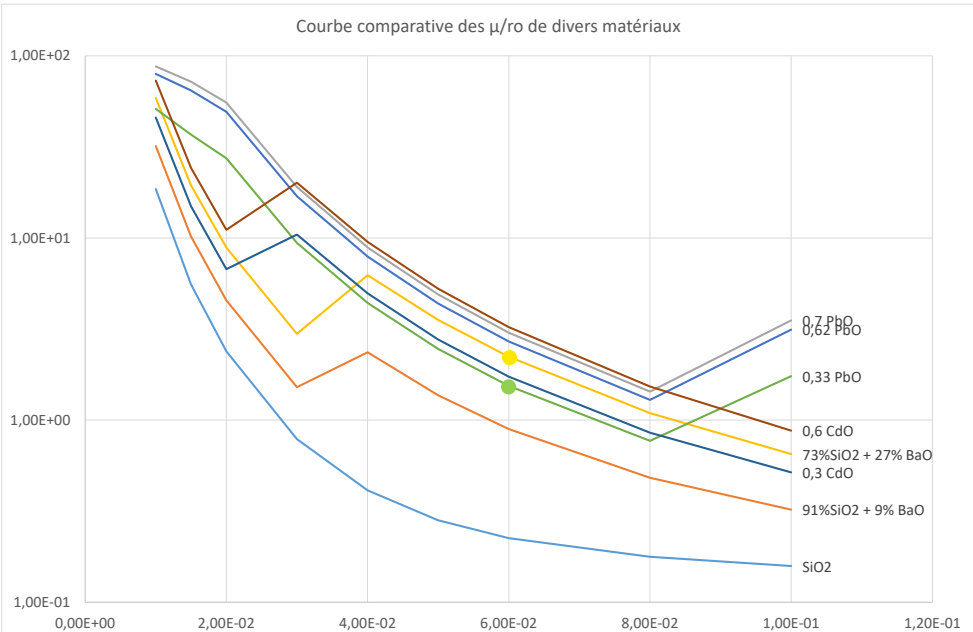
Suivi en temps réel via ED 3 + sonde D3

Utilisation de visière 4mm cristal dopé au Ba



mm cristal dopé

		Valeurs						
		Extérieur boîte			Intérieur boîte			
Date	heure	BDF Fli	n° FLI	Dose (en mSv)	BDF Fli	n° FLI	Dose (en mSv)	Atténuation
18/06/2024	9h30-12h00	59 uSv	15	2,7	68 uSv	7	0,270	10,00
18/06/2024	9h30-12h00	73 uSv	16	2,9	68 uSv	8	0,260	11,15
19/06/2024	17h00-19h45	61 uSv	18	3,2	72 uSv	3	0,300	10,67
19/06/2024	17h00-19h45	66 uSv	19	3,5	76 uSv	2	0,280	12,50
20/06/2024	17h45-19h10	66 uSv	10	2,1	68 uSv	1	0,198	10,61
20/06/2024	17h45-19h10	62 uSv	11	2	73 uSv	5	0,200	10,00



Mise en place du suivi dosimétrique du cristallin et de lunettes radio-protégées



orano

SOMMAIRE



01

Contexte



02

Etudes gamma



03

Etude neutron



04

Conclusions



01 • Contexte

Contexte

Années 2000

Etudes épidémiologiques (notamment dans le secteur médical) : risque accru de cataractes radio-induites chez les radiologues interventionnels

La dosimétrie du cristallin devient la contrainte de dose la plus importante sur MELOX.

2011

Recommandation de la CIPR d'une réduction drastique de la limite annuelle d'exposition des travailleurs, de 150 mSv/an à 20 mSv/an en moyenne sur 5 ans, avec un maximum de 50 mSv sur un an

2013

Directive européenne 2013/59/Euratom : Intégration de cette nouvelle limite, obligation des états membres de l'UE à la transposer dans leur droit national d'ici 2018

2013-2018

Groupe de travail constitué par la Direction Générale du Travail, l'Autorité de Sûreté Nucléaire et l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire par adapter la réglementation française.

Emission d'un livre blanc proposant de nouvelles stratégies de suivi dosimétrique

2018

Décret n°2018-437 du 4 juin 2018 : Précise les obligations pour la dosimétrie du cristallin. Début d'une période transitoire avec une limite de 100 mSv sur 5 ans sans dépasser 50 mSv/an

2023

Depuis le 1^{er} juillet 2023 : limite à 20 mSv/an au cristallin

Options pour Mélox en terme de suivi dosimétrique

Mettre en place un port de dosimètres cristallin étalonnés en Hp(3) obligatoire

Avantage : Facilité des échanges avec ASNR, suivi analogue aux autres grandeurs

Défauts rédhibitoires :

- Risque de non port des dosimètres par oubli
- Risque de perte des dosimètres cristallin
- Risque de mauvais positionnement des dosimètres cristallin
- ... il n'existe pas de dosimètre étalonné en Hp(3) pour le neutron qui représente 70% de la dose Organisme Entier à Mélox

Utiliser la méthode déportée de JM Bordy

- Avantage : Elle est possible !
- Inconvénients :
 - Etudes de poste nécessaires pour évoluer les coefficients R tels que $H_p(3) = R.H_p(10)$
 - Faute de dosimètre qualifié pour le neutron, utilisation de méthode Monte Carlo et des spectres neutron de Mélox pour déterminer le R_{neutron}
 - Instruction nécessaire par une expertise indépendante
 - Nécessité de surveiller les coefficients R afin de justifier leur absence d'évolution dans le temps

02 • Cas du rayonnement gamma

03 • Etudes de postes

Etudes de postes pour l'application de la méthode indirecte

Champs de rayonnement mixtes neutron-photon
Composantes Hp(10) mesurées par Cogebadge et dosimètre opérationnel EPDN2
Composante Hp(3) gamma mesurée par dosimètre Landauer
Etude réalisée sur 62 cas répartis dans l'installation

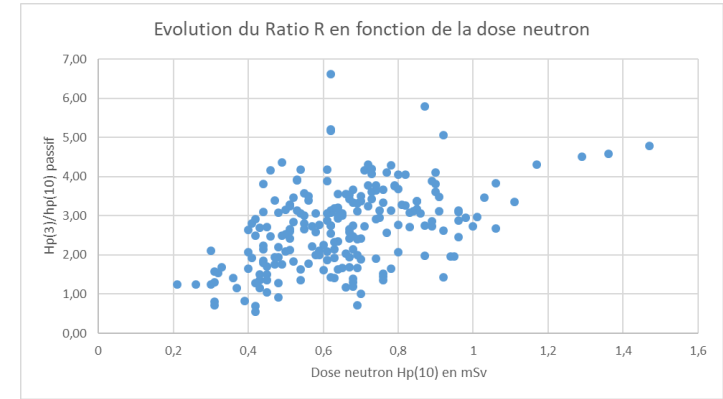
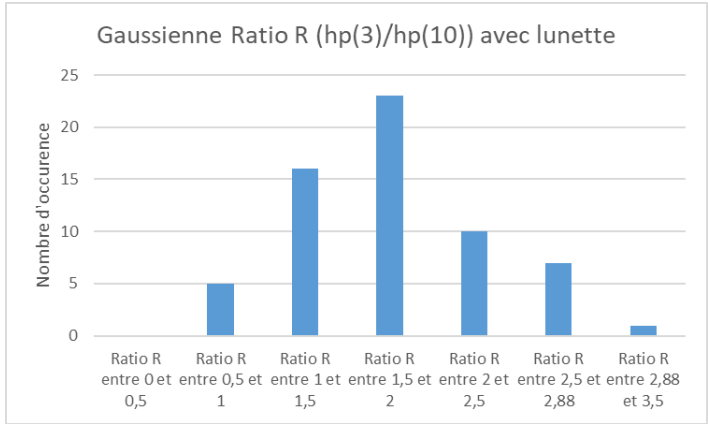
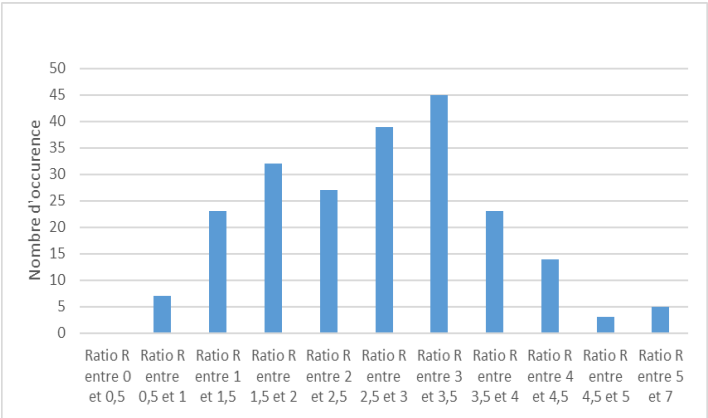
Les études de postes déterminent la dose cristallin en appliquant les formules suivantes :

- Avec lunette radioprotégée : $H_p(3) = (2,88 \times H_p(10) \text{ Y})$
- Sans lunette radioprotégée : $H_p(3) = (4,99 \times H_p(10) \text{ Y})$

Aujourd'hui la valeur maximale est de 18,4 mSv pour une personne MELOX travaillant sur le secteur Rectification.

Sur les secteurs identifiés (Poudres, Presses/Fours, Rectification et maintenance Melox) la lunette radioprotégée et la veste radioprotégée sont obligatoires dès lors que les intervenants entrent en salle procédé.

Pour vérifier que ces personnes portent correctement leur lunette, ils sont équipés d'une sacoche de masque verte pour les distinguer des autres.



03 • Etudes de postes



- Port des lunettes radioprotégées avec deux dosimètres Landauer.
- Port des dosimètres réglementaires sous la veste radioprotégée.
- Détermination du ratio $H_p(3)/H_p(10)$ gamma



03 • La dosimétrie cristallin sur MELOX

Evolution des EPI

Au cours du mois de février 2024, réalisation d'une nouvelle campagne de mesure avec les dosimètres de Marcoule (FLI7). MELOX a mis en évidence que les dosimètres disponibles sur le marché surestimaient les doses gamma.

Depuis le mois de février 2023, le service de radioprotection surveille que le personnel MELOX identifié devant porter des lunettes respecte la règle de port. Ce suivi est remonté hebdomadairement en comité opérationnel.

Présentation des lunettes V1, V2 et V3

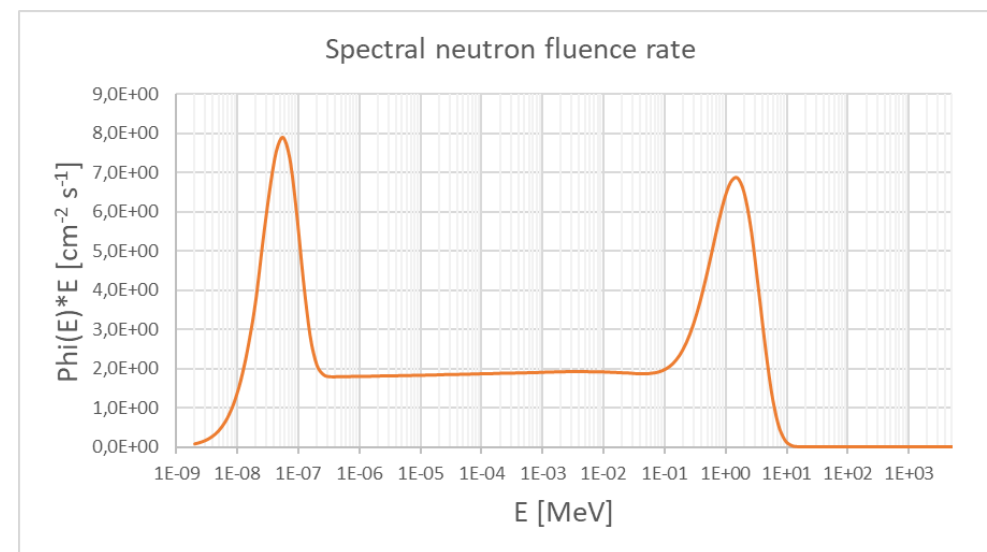
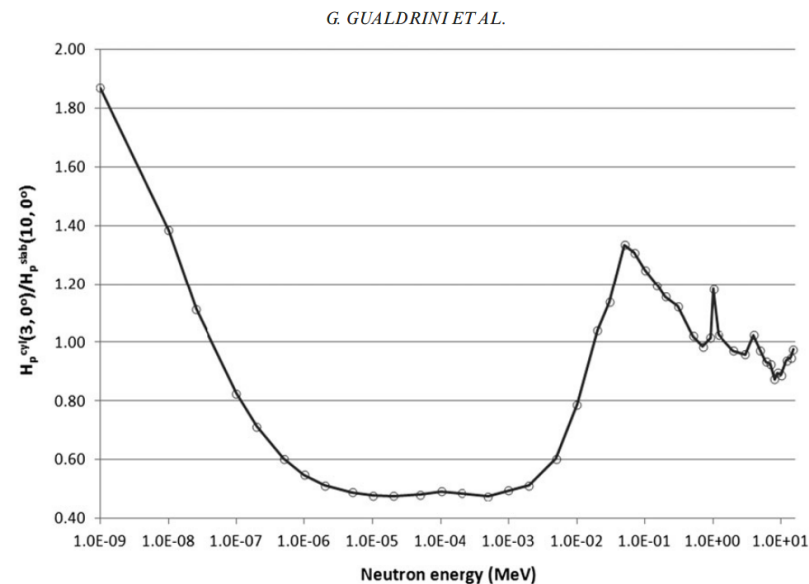


03 • Cas du rayonnement neutron

03 • Cas de la dose neutron

Utilisation de l'article de Gualdrini et al. *

- Ce papier fournit les valeurs des coefficients de conversion de la fluence vers Hp(3) neutron en fonction de l'énergie des neutrons. C
- A partir du spectre neutronique établi en 2023 avec le Rospec sur les différents postes de MELOX, le ratio Hp(3)/Hp(10) neutron est égal à 1.



*Fluence to $H_p(3)$ conversion coefficients for neutrons from thermal to 15 MeV ; G. Gualdrini et al ; Radiation Protection Dosimetry (2013), Vol. 157, No. 2, pp. 278–290

04 • Conclusions

04 • Conclusions

- **Les études de postes déterminent la dose cristallin en appliquant les formules suivantes :**
 - **Avec lunette radioprotégée :** $H_p(3) = (2,88 \times H_p(10) \gamma) + H_p(10) n$
 - **Sans lunette radioprotégée :** $H_p(3) = (4,99 \times H_p(10) \gamma) + H_p(10) n$
- **L'approche pragmatique a les avantages de concilier la réalité du terrain (pas de port de dosimètre) et la rigueur du suivi dosimétrique exigée par la réglementation**
- **La méthode utilisée nécessite de requalifier les coefficients annuellement afin de vérifier leur non-remise en cause : toutes les vérifications sont conformes**
- **Perspectives : Des études sont en cours avec notre laboratoire de dosimétrie pour développer des dosimètres calibrés en $H_p(3)$ à base de FLi_7 afin de s'affranchir du « bruit » neutron dans le signal gamma**