

# Évaluation des contraintes radiologiques exercées sur un équipement d'accélérateur par simulation Monte-Carlo

Juste Vincent

M1 promotion 2019

# Plan

- I- Contexte de l'étude
- II- Espace des phases et mesure d'émittance
- III- Estimation des contraintes radiologiques par simulations Monte-Carlo

# I- Contexte

- Collaboration entre le JINR (Joint Institute of Nuclear Research) et le CNRS/IN2P3 sur la caractérisation de faisceaux d'ions en basse énergie
- Construction d'un scanner de l'espace des phases transverses de type Allison dans une ligne d'injection d'accélérateur
- Application au nouveau cyclotron DC-280 (Dubna, Russie) et sur le C70 d'ARRONAX (Nantes)
- But: évaluer les contraintes radiologiques pour la maintenance et le transport entre laboratoires
  
- **Contacts**
  - au JINR : Raushan Kabytayeva, Semen Mitrofanov
  - à ARRONAX : Freddy Poirier

# Cyclotron DC-280

- Construit et mis en fonctionnement récemment
- Dédié à la production d'ions très lourds
- Espoir de découvrir de nouveaux éléments lourds avec  $Z > 118$  et d'isotopes plus proches de la couche fermée à  $N=184$

DC-280 (expected) E=4 - 8 MeV/A		
Ion	Ion energy [MeV/A]	Output intensity
${}^7\text{Li}$	4	$1 \times 10^{14}$
${}^{18}\text{O}$	8	$1 \times 10^{14}$
${}^{40}\text{Ar}$	5	$6 \times 10^{13}$
${}^{48}\text{Ca}$	5	$0,6-1,2 \times 10^{14}$
${}^{54}\text{Cr}$	5	$2 \times 10^{13}$
${}^{58}\text{Fe}$	5	$1 \times 10^{13}$
${}^{124}\text{Sn}$	5	$2 \times 10^{12}$
${}^{136}\text{Xe}$	5	$1 \times 10^{14}$
${}^{238}\text{U}$	7	$5 \times 10^{10}$

Position de l'émittance-mètre



# II- Espace des phases et mesure d'émittance

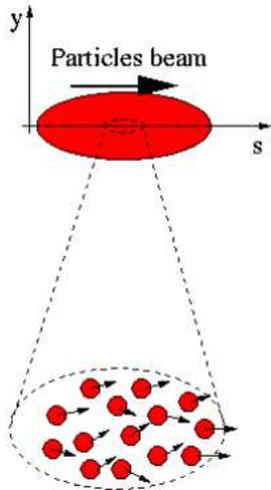
# Notion d'émittance

- Emittance = volume occupé par le faisceau dans l'espace des phases
- Définition générale:  $\mathcal{V}^6 = \int \int \int \int \int \int dx dy dz dp_x dp_y dp_z$

- Si le mouvement de propagation (selon z) ne se couple pas aux mouvements transverses:

$$\mathcal{V}^6 = \int \int \int \int dx dy dp_x dp_y \int \int dz dp_z = \mathcal{V}_T^4 \times A^L$$

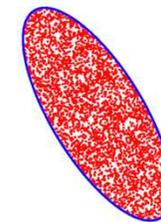
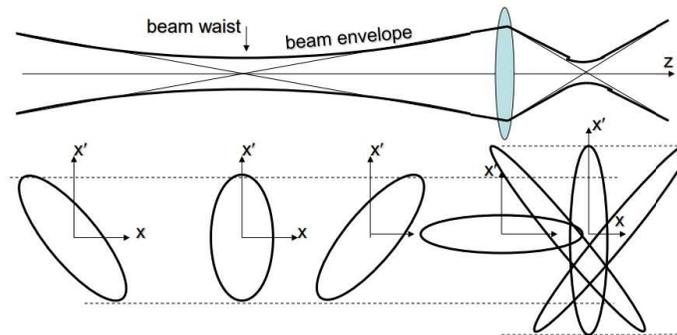
Emittance transverse      Emittance longitudinale (2D)



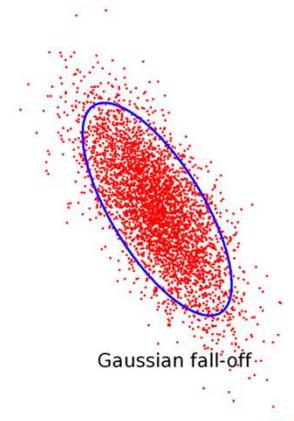
- L'analyse de l'espace des phases transverse permet d'analyser les distributions des particules en position et impulsion, c'est une mesure de la qualité du faisceau
- Dans l'espace des traces  $x' = \frac{dx}{dz} = \frac{p_x}{p_z}$ ,  $y' = \frac{dy}{dz} = \frac{p_y}{p_z}$  les tangentes des angles entre les impulsions et l'axe du faisceau:

$$\mathcal{V}_T^4 = \beta^2 \int \int \int \int dx dy dx' dy' = \beta^2 \times \frac{1}{\chi} A^x A^y = \beta^2 \times V_T^4$$

- L'ellipse d'émittance:



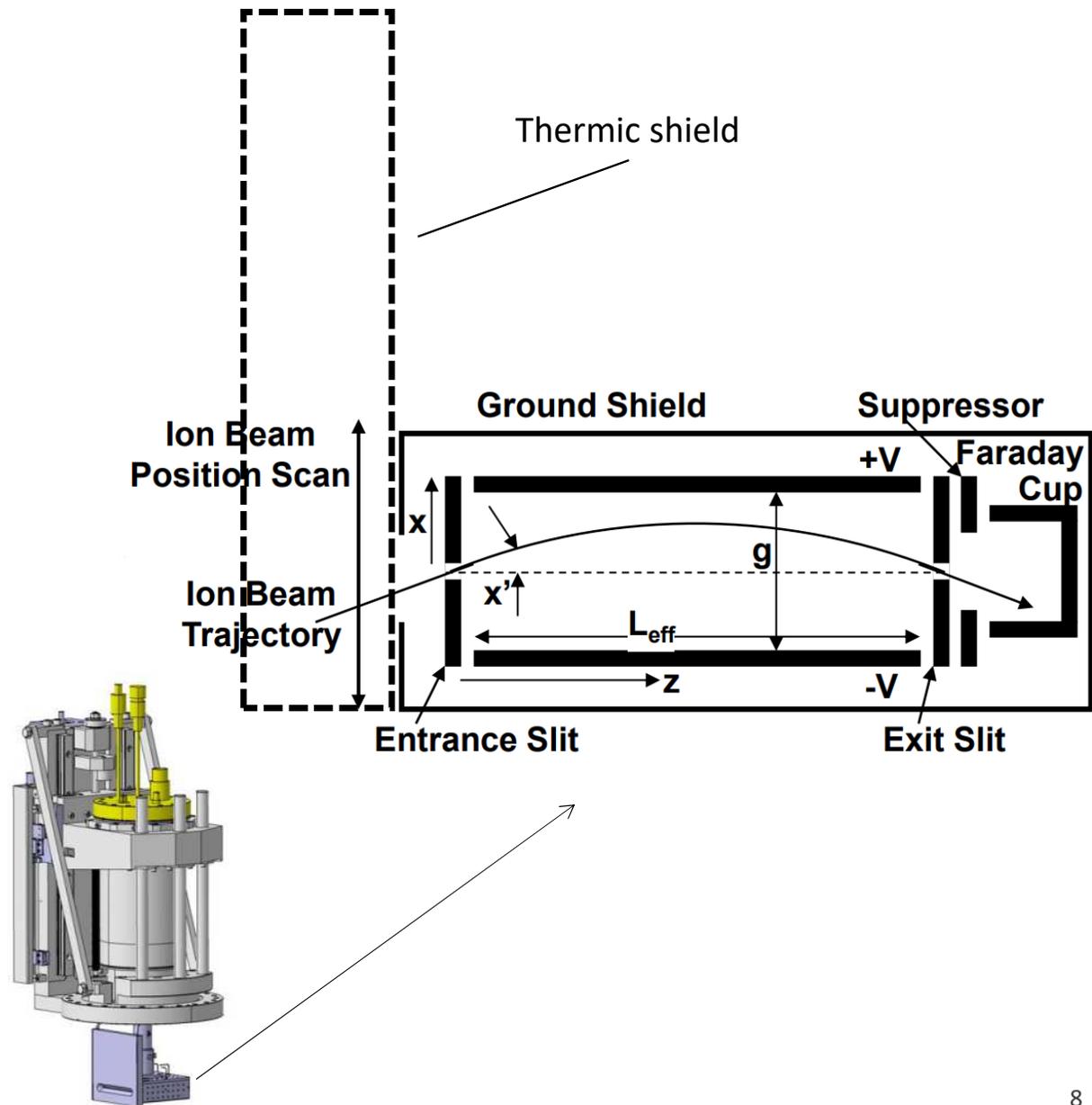
Uniform density



Gaussian fall-off

## Mesure de l'émittance: scanner de l'espace des phases type Allison

- Une fente d'entrée pour sélectionner une partie du faisceau
- Un condensateur plan + une tension pour dévier les particules
- Une fente de sortie pour sélectionner une partie des particules déviées
- Une coupelle de Faraday pour mesurer l'intensité du faisceau traversant les deux fentes
- Un repousseur d'électrons pour prendre en compte l'intensité



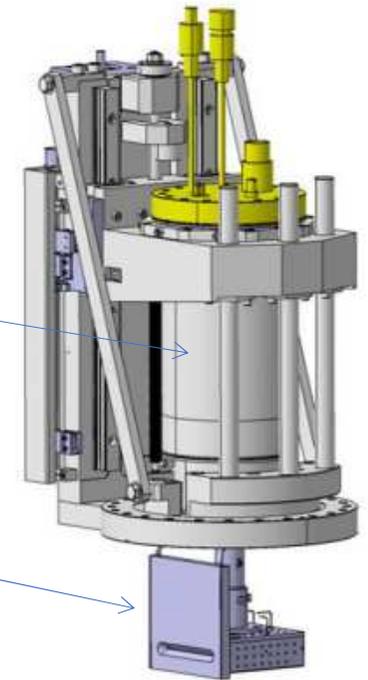
# III- Simulations Monte-Carlo

# Fluka: quelques mots

- Général:
  - Module de simulation Monte-Carlo
  - Application en de nombreux domaines (physique des neutrinos, accélérateurs, dosimétrie...)
- Interactions:
  - Modèles d'interaction nucléaires (hadron-nucléon / hadrons-noyau...)
  - différents régimes (haute/basse énergie, interaction élastique, évaporation, fission...)
  - Prise en charge des phénomènes électromagnétiques (photoélectrique, Compton, Rayleigh, Bremsstrahlung, Bhabha...)
- Particules implémentées:
  - ~70 particules pré-implémentées
  - Possibilité de définir des ions lourds ( $Z > 2$ )
- Transport:
  - Trajectoires
  - Pertes d'énergie
  - Transport des neutrons de faible énergie
- Estimations:
  - noyaux résiduels
  - Dose
  - Activité
  - Fluence

# Irradiation de l'émittance-mètre

- Sources :
  - Le contact direct du faisceau avec le bouclier thermique et la fente de l'émittance-mètre
  - L'environnement radioactif, essentiellement neutronique, dû aux collisions dans le cyclotron et aux pertes de faisceau en particulier l'activation neutronique
- L'émittance-mètre consiste (essentiellement) d'un bouclier thermique en cuivre refroidit par un circuit d'eau, d'une fente en tungstène et d'une structure en inox
- Modélisation par étapes : simple plaque de cuivre → plaque de cuivre + plaque de tungstène → fente Cu, W + structure en inox → modèle final



# Etat de l'art

- Domaine du champ de rayonnement secondaire neutronique auprès d'accélérateurs d'ions lourds (e.g. cyclotrons), dosimétrie d'ambiance et spectre en énergie des neutrons
- Concerne l'interaction ions lourds de haute énergie avec l'environnement : production de neutrons avec 2 spectres distincts : neutrons d'évaporation ( $E < 10$  MeV, distribution isotrope) et neutrons de cascade ( $E <$  énergie d'accélération des ions lourds, spectre continu). Les neutrons secondaires sont produits à la fois dans les matériaux constituant la ligne de traitement, les murs de la salle et dans les cibles
- Selon Brassart : 50 % de la dose équivalente dans le champ de rayonnement est due aux neutrons d'énergie comprise entre 0,1 et 10 MeV, 10 à 20 % aux neutrons lents et au rayonnement gamma, le complément à des neutrons d'énergie supérieure à 10 MeV pour les cyclos. Le développement de cascades intranucléaires commence à devenir important au-delà de 50 MeV

# Simulations

- Fluka ne permet pas de définir 2 sources simultanément → simulations d'irradiation par neutrons et faisceau séparées

- Quantités d'intérêt:

- L'activité (Bq)
- La dose absorbée (Gy)
- La dose équivalente (Sv)

- Simulations:

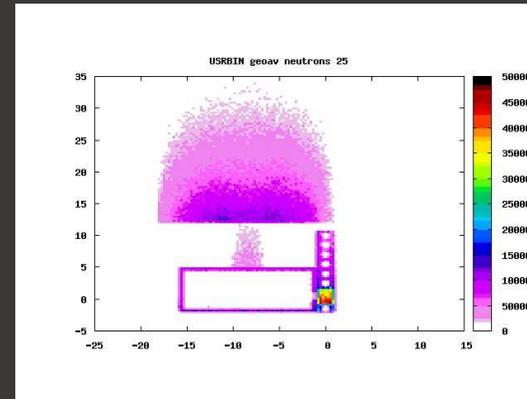
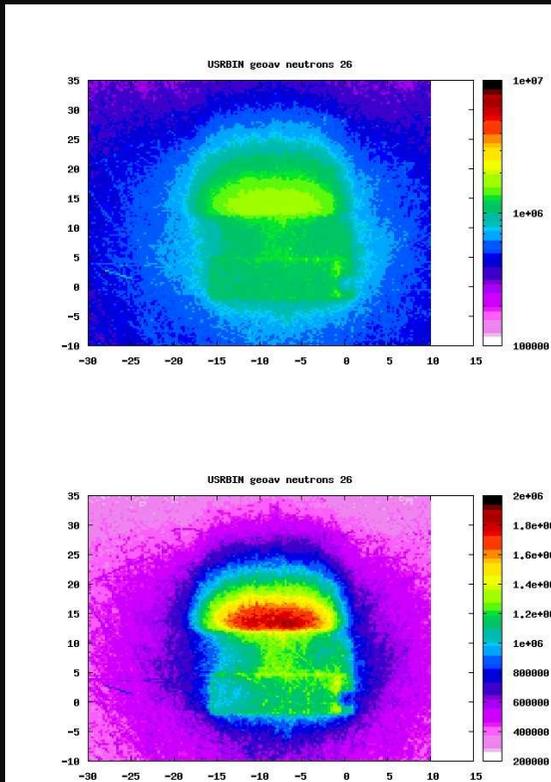
- Faisceau
- Neutrons (1)
- Neutrons (2)

- Source sphérique
- $E = 4 \text{ MeV}$ ,  $\Delta E = 4 \text{ MeV}$ ,
- $t_{\text{irr}} = 17\,280\,000 \text{ s} = 24 \text{ h/j} * 20 \text{ j/m} * 10 \text{ m}$
- intensité =  $1.0\text{E}+12 \text{ p/s}$
- 100 000 000 events requested x 5 cycles → runs longs (~44 h)

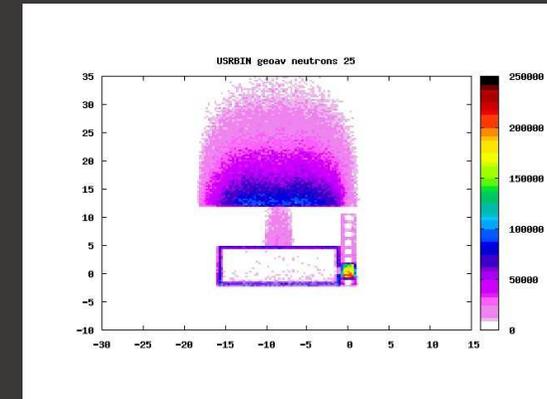
- Utilisation d'une collision de  $^{20}_{10}\text{Ne}$  sur du cuivre comme source d'irradiation
- $E = 4.5 \text{ MeV}$ ,  $t_{\text{irr}} = 17\,280\,000 \text{ s}$ , intensité =  $6.10^{13} \text{ p/s}$

# Résultats neutrons (1)

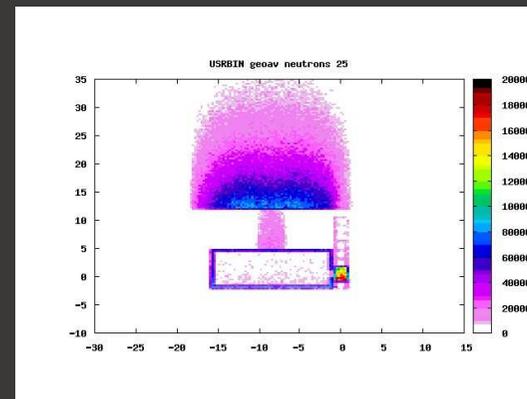
Dose  
équivalente  
prompte (pSv)



prompte



1 jour



1 semaine

Activité (Bq/cm<sup>3</sup>), après de  
différents temps de  
refroidissement

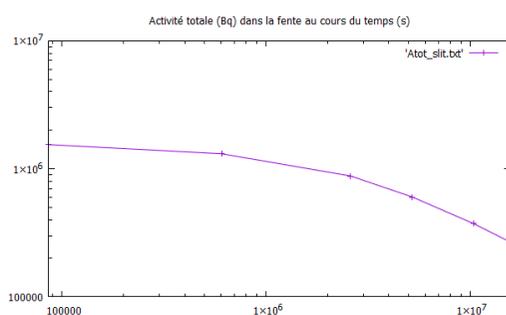
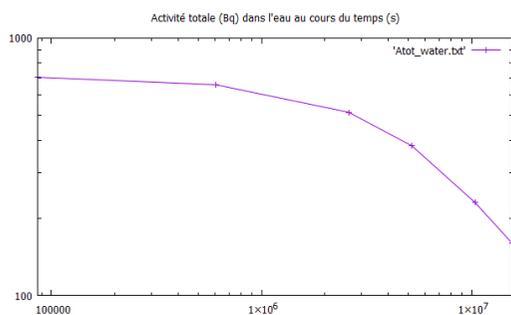
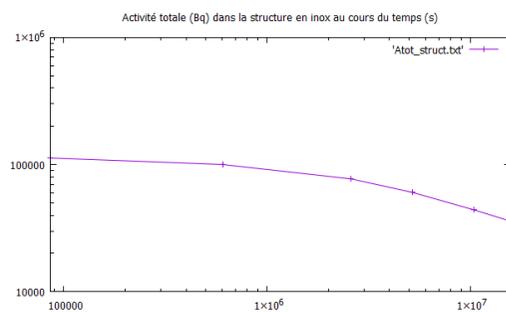
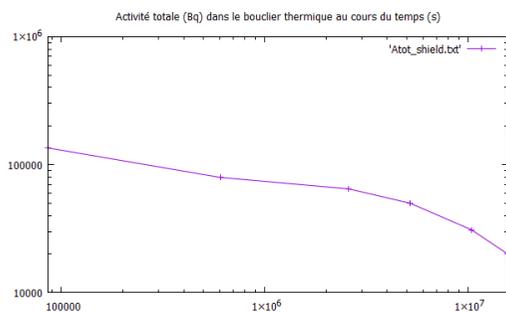
Noyau		Activité (Bq)	Demi-vie
47Ag	110Ag	997,3 +- 12,39%	24,6 s
	109 m1Ag	561,6 +- 11,27%	39,6 s
	108Ag	517,7 +- 13,87%	2,37 min
	107 m1Ag	684,4 +- 5,875%	44,3 s
	104Ag	362,3 +- 17,96%	69,2 min
33As	76As	1527,0 +- 5,267%	1,0942 j
	74As	1228,0 +- 3,780%	17,77 j
	73As	1428,0 +- 6,998%	80,30 j
	72As	842,3 +- 9,457%	26,0 h
29Cu	66Cu	1,2793.10 <sup>4</sup> +- 2,178%	5,120 min
	64Cu	1,5692 .10 <sup>5</sup> +- 8,7342.10 <sup>-2</sup> %	12,700 h
	62Cu	2,3129.10 <sup>5</sup> +- 0,7266%	9,673 min
	61Cu	1,0958.10 <sup>5</sup> +- 0,8098	3,333 h
	60Cu	42470,0 +- 8,834%	23,7 min
65Ni		40540,0 +- 9,747%	2,5172 h
27Co	61Co	9775,0 +- 2,206%	1,650 h
	60 m1Co	1,0064.10 <sup>4</sup> +- 2,028%	10,467 min
	58Co	6,8692.10 <sup>4</sup> +- 2,291%	70,86 j
	58 m1Co	4,0011.10 <sup>4</sup> +- 2,291%	9,04 h
	57Co	9241,0 +- 1,977%	271,74 j
59Fe		654,0 +- 11,75%	44,495 j

Noyau		Activité (Bq)	Demi-vie
90Nb		598,1 +- 0,9383%	14,60 h
57Ni		1719,0 +- 1,319%	35,60 h
27Co	60m1Co	651,8 +- 3,375%	10,467 min
	58Co	1,0587.10 <sup>4</sup> +- 0,5294%	70,86 j
	58m1Co	6167,0 +- 0,5294%	9,04 h
	57Co	6761,0 +- 0,1773%	271,74 j
	56Co	7736,0 +- 0,2085%	77,233 j
26Fe	55Fe	1,0318.10 <sup>4</sup> +- 7,4804.10 <sup>-2</sup> %	2,737 a
	53Fe	2550,0 +- 0,6196%	8,51 min
	53m1Fe	1275,0 +- 0,6196%	2,526 min
25Mn	56Mn	1,0004.10 <sup>4</sup> +- 0,5559%	2,5789 h
	54Mn	2,5741.10 <sup>4</sup> +- 0,1842%	312,03 j
	52Mn	2255,0 +- 0,3446%	5,591 j
	52m1Mn	2013,0 +- 0,5083%	21,1 min
	51Cr	4,1875.10 <sup>4</sup> +- 0,1941%	27,7025 j
24Cr	49Cr	1040,0 +- 1,486%	42,3 min
	52V	3058,0 +- 1,026%	3,743 min
23V	49V	1868,0 +- 1,241%	329 j
	48V	1234,0 +- 1,323%	15,9735 j
47Sc		512,9 +- 1,452%	3,3492 j
28Al		624,3 +- 1,038%	2,2414 min
11C		1418,0 +- 0,9690%	20,334 min
12B		528,8 +- 3,372%	20,20 ms

Noyaux		Activité (Bq)	Demi-vie
$^{74}\text{W}$	$^{187}\text{W}$	$8,3559 \cdot 10^4 \pm 3,404\%$	23,72 h
	$^{185}\text{W}$	$1,7036 \cdot 10^5 \pm 1,618\%$	75,1 j
	$^{185\text{m}1}\text{W}$	$8,9726 \cdot 10^4 \pm 1,177\%$	1,597 min
	$^{183\text{m}1}\text{W}$	$6,1564 \cdot 10^5 \pm 0,5021\%$	5,2 s
	$^{181}\text{W}$	$3,6683 \cdot 10^5 \pm 1,021\%$	121,2 j
	$^{179}\text{W}$	$5,4660 \cdot 10^5 \pm 0,3592\%$	37,05 min
	$^{179\text{m}1}\text{W}$	$2,7368 \cdot 10^5 \pm 0,3592\%$	6,40 min
	$^{178}\text{W}$	$3,9323 \cdot 10^5 \pm 2,090\%$	21,6 j
	$^{177}\text{W}$	$1609,0 \pm 23,09\%$	132 min
	$^{176}\text{W}$	1609,0	2,5 h
$^{73}\text{Ta}$	$^{185}\text{Ta}$	$2,2847 \cdot 10^4 \pm 5,078\%$	49,4 min
	$^{184}\text{Ta}$	$3,1107 \cdot 10^4 \pm 7,420\%$	8,7 h
	$^{183}\text{Ta}$	$5,3632 \cdot 10^4 \pm 3,521\%$	5,1 j
	$^{182\text{m}1}\text{Ta}$	$3,6613 \cdot 10^4 \pm 3,521\%$	283 ms
	$^{182\text{m}2}\text{Ta}$	$1,8306 \cdot 10^4 \pm 3,521\%$	15,84 min
	$^{180}\text{Ta}$	$2,1937 \cdot 10^4 \pm 5,125\%$	8,152 h
	$^{179}\text{Ta}$	$1,0881 \cdot 10^5 \pm 0,3678\%$	1,82 a
	$^{178}\text{Ta}$	$3,9339 \cdot 10^5 \pm 2,110\%$	9,31 min
	$^{177}\text{Ta}$	$1716,0 \pm 22,53\%$	56,56 h
$^{176}\text{Ta}$	1609,0	8,09 h	
$^{175}_{72}\text{Hf}$	$554,8 \pm 57,74\%$	70 j	

Noyaux	Activité (Bq)	Demi-vie
$^{16}_7\text{N}$	$1454,0 \pm 17,07\%$	7,13 s
$^{15}_8\text{O}$	$1,6976 \cdot 10^4 \pm 6,906\%$	122,24 s
$^{12}_5\text{B}$	$984,8 \pm 35,95\%$	20,20 ms
$^{11}_6\text{C}$	$2767,0 \pm 13,56\%$	20,334 min
$^7_4\text{Be}$	$607,8 \pm 18,90\%$	53,22 j
$^3_1\text{H}$	$103,8 \pm 9,589\%$	12,32 a

### Noyaux résiduels dans l'eau de refroidissement à T0



# Activité totale au cours du temps

---

# Conclusion

- Les simulations avec faisceau à 100 keV ne montrent aucun signe d'irradiation (comme prévu )
- Les simulations avec source de neutrons montrent:
  - Dose prompte estimée  $< 10^{-5}$  Sv (décroît avec le temps) → sans danger
  - Certains radionucléides présentant des activités notables et des temps de demi-vie longs:  $^{179}\text{Ta}$  (1.82 a),  $^3_1\text{H}$  (12.32 a),  $^{55}\text{Fe}$  (2.737 a) ...
- Une mesure et caractérisation du flux de neutrons sur place est envisagée pour valider ces résultats

# Remerciements

- Eric baussan (IPHC)
- Yannick Patois (IPHC)
- Raushan Kabytayeva (JINR)
- Marcel Heine (IPHC)
- Semen Mitrofanov (JINR)
- Freddy Poirier (ARRONAX)
  
- Merci à Francis Osswald (IPHC) pour ce stage!

# Bibliographie

- Induced activation in accelerator components, C. Bungau et al., PRST AB 17, 084701 (2014)
- Aspects spécifiques de la radioprotection autour d'un cyclotron, N. BRASSART et al., Radioprotection 1995, Vol. 30 n° 3
- Complex workplace radiation fields at European high-energy accelerators and thermonuclear fusion facilities P. Bilski et al., CERN 2006-007
- Induced Radioactivity at Accelerators, Lecture 1: Basic Principles & Activation of Accelerator Components, JD.Cossairt, FNAL, 2007
- Long-term residual radioactivity in an intermediate-energy proton linac, J. Blaha et al., NIM A 753 (2014) 61
- Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV Particle Accelerator Facilities, National Council on Radiation Protection and Measurements, (NCRP) Report No. 51, 1977
- Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities, (NCRP) Report No. 144, 2005
- Radiation protection at CERN, D. Forkel-Wirth et al., CERN-2013-001.415
- R. Sander, Oscar. (1990). Transverse emittance: Its definition, applications, and measurement. 10.1063/1.39706.
- Measuring and Analyzing Transverse Emittances of Charged Particle Beams, Martin P. Stockli et al, FNAL, 2006
- Emittance Measurements Accelerator Beam Diagnostics, Uli Raich (CERN), 2009
- Activation analysis with 1 MeV/amu heavy ion beams, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-28, No. 2, April 1981, B. D. Lass and E. A. Schweikert
- Ion beam activation for material analysis: methods and applications, -MEETHniuaton1 01icN on ar Science, Vol. NS-28, No. 2, April 1981, T.W. Conlon
- Techniques de l'ingénieur: Activation, ref. BN3075 V1, 2002
- Gulbekian, G.G., Dmitriev, S.N., Oganessian, Y.T. et al. Phys. Part. Nuclei Lett. (2018) 15: 809, The New DC-280 Cyclotron: Status and Road Map

# Annexes

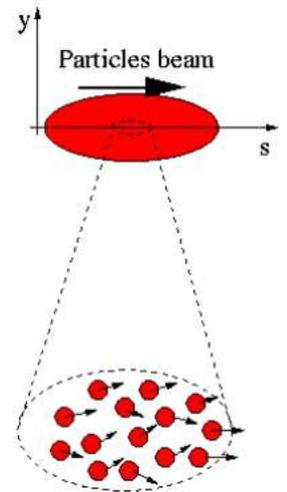
# Notion d'émittance

- Emittance = volume occupé par le faisceau de particules dans l'espace des phases (dim = 6)
- Définition générale:

$$\mathcal{V}^6 = \int \int \int \int \int \int dx dy dz dp_x dp_y dp_z$$

- Si le mouvement de propagation (selon z) ne se couple pas aux mouvements transverses:

$$\mathcal{V}^6 = \int \int \int \int dx dy dp_x dp_y \int \int dz dp_z = \underbrace{\mathcal{V}_T^4}_{\text{Emittance transverse}} \times \underbrace{A^L}_{\text{Emittance longitudinale (2D)}}$$



- Et si les mouvements transverses sont à leur tour non couplés:

$$\mathcal{V}_T^4 = \frac{1}{\chi} A^x A^y$$

Facteur de forme  $\chi \approx 2$  22 Emittance dans les plans  $(x;p_x)$  et  $(y;p_y)$  resp.

# Dans l'espace des traces

- $p_z$  invariant le long de l'axe du faisceau  $\rightarrow$  on peut factoriser par  $p_z \rightarrow$  espace des traces  $x, y, x', y'$  avec:

$$x' = \frac{dx}{dz} = \frac{p_x}{p_z}, y' = \frac{dy}{dz} = \frac{p_y}{p_z}$$

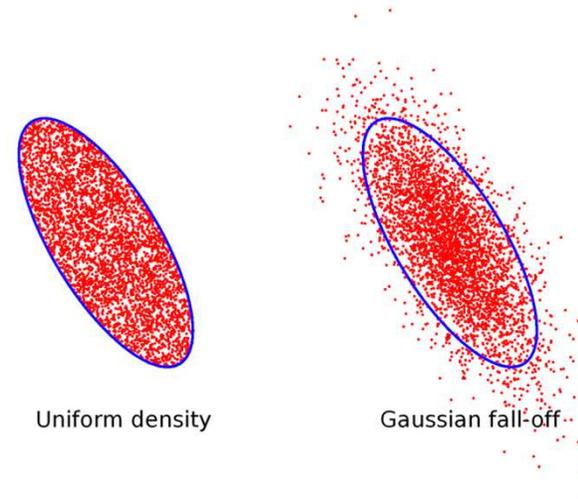
Les tangentes des angles entre les impulsions et l'axe du faisceau

- Par conséquent

$$v_T^4 = \beta^2 \iint \iint dx dy dx' dy' = \beta^2 \times \frac{1}{\chi} A^x A^y = \beta^2 \times V_T^4$$

- On parle en toute rigueur d'émittance d'aire ou de volume
- On peut aussi introduire l'émittance comme le produit des demi-axes d'un ellipsoïde avec le même volume:  $E^x \frac{A^x}{\pi}, E^y \frac{A^y}{\pi}, E_T^4 \frac{V_T^4}{\pi^2}$

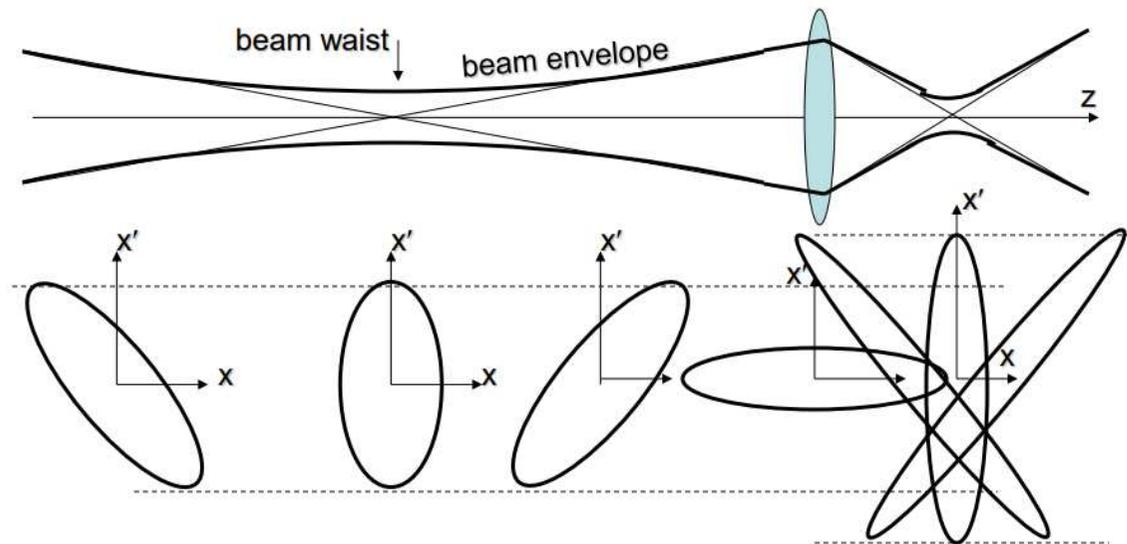
# L'ellipse d'émittance



- Représentation du faisceau dans un plan de l'espace des traces
- L'aire de l'ellipse reste constante mais sa forme et son orientation change
- Equation d'une ellipse:

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \frac{A}{\pi} = \varepsilon$$

avec  $\varepsilon$  l'émittance et  $\alpha, \beta, \gamma$  les paramètres de Twiss vérifiant  $\beta\gamma - \alpha^2 = 1$



# L'ellipse d'émittance

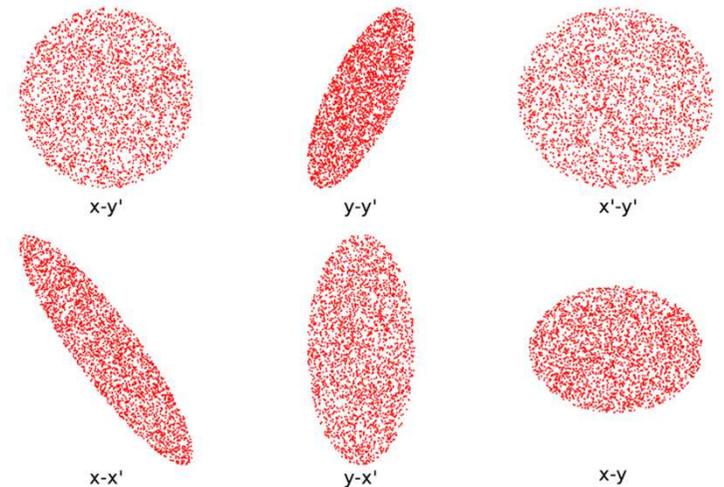
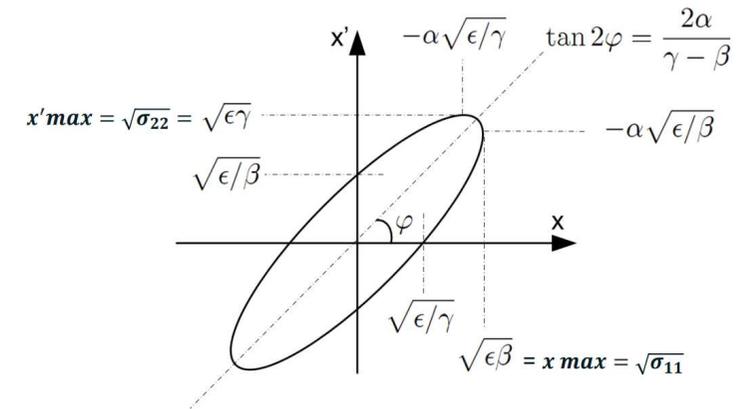
- On peut exprimer les axes majeur et mineur , resp. a et b, ainsi que l'angle d'orientation  $\theta$  de l'ellipse en fonction de ces paramètres:

$$\tan 2\theta = \frac{2\alpha}{\gamma - \beta},$$

$$\frac{a}{b} = \frac{\alpha}{\beta} + \frac{\beta + \gamma}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\beta + \gamma)^2 - 4}$$

- On a également :

$$x_{max} = \sqrt{\beta\varepsilon}, x'_{max} = \sqrt{\gamma\varepsilon}$$



# Paramètres de Twiss

- Aussi dits de Courant-Snyder
- Pour une distribution de particules non uniforme, ils peuvent être exprimés en fonction des moments d'ordre 2

$$M_{xx} = \iint x^2 \rho(x, x') dx dx' / \text{NORM} ,$$

$$M_{x'x'} = \iint x'^2 \rho(x, x') dx dx' / \text{NORM} ,$$

$$M_{xx'} = \iint xx' \rho(x, x') dx dx' / \text{NORM} ,$$

$$\text{NORM} = \iint \rho(x, x) dx dx' ;$$

$$\beta = \frac{M_{xx}}{\sqrt{M_{xx}M_{x'x'} - M_{xx'}^2}}$$

$$\gamma = \frac{M_{x'x'}}{\sqrt{M_{xx}M_{x'x'} - M_{xx'}^2}}$$

$$\alpha = \frac{-M_{xx'}}{\sqrt{M_{xx}M_{x'x'} - M_{xx'}^2}} .$$

- Le dénominateur commun est appelé émittance RMS

$$\epsilon_{\text{rms}} = \sqrt{M_{xx}M_{x'x'} - M_{xx'}^2} .$$

# Mesure de l'émittance

- Particule/ion de charge  $q$ , masse  $m$ , dans un champ  $E = \frac{2V}{g}$ ,  $E_c = \frac{1}{2}mv_z^2 = qU$
- Vitesse axiale  $v_z = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \frac{z}{t}$
- Vitesse transverse  $v_x = v_{x_0} + \int a_x dt = v_{x_0} + \int \frac{qE}{m} dt = v_{x_0} + \frac{qEt}{m} = v_{x_0} + \frac{qEz}{mv_z}$

# Mesure de l'émittance

- Particules passant la première fente ( $x=x_0=0$ ,  $t=0$ ,  $z=0$ ):

$$x = \int v_x dt = v_{x_0} t + \frac{qEt^2}{2m} = z \frac{v_{x_0}}{v_z} + \frac{qEz^2}{2mv_z^2} = x'z - \frac{Ez^2}{4U}$$

$$\rightarrow x = x'z - \frac{Vz^2}{2gU}$$

- Particules passant par la 2<sup>e</sup> fente ( $x=0$ ,  $z=L_{\text{eff}}$ ):

$$x' = \frac{VL}{2gU} \quad \text{ou} \quad V = 2Ux' \frac{g}{L}$$

# Mesure de l'émittance

- Vignettage de la plage angulaire pour  $x(L/2)=g/2$

$$x_{max} = x'_{max} \frac{L}{2} - \frac{VL^2}{8gU} = x'_{max} \times \frac{L}{4}$$

- → Limite d'acceptation  $x'_{max} = \frac{2g}{L}$
- → Limite de voltage  $x'_{max} = \frac{V_0 L}{2gU}$ , idéal:  $V_0 \cong x'^2_{max} U$
- Réalisable uniquement pour de faibles énergies  $\sim E < 1 \text{ Mev}$

# Les quantités d'intérêt: l'activité (Bq)

- Faisceau de fluence  $\phi$  (part.cm<sup>-2</sup>) constant incident sur un matériau d'épaisseur dx (cm) et de densité N (part.cm<sup>-3</sup>)
- On suppose un seul processus présent, de section efficace  $\sigma$

$$N(t) = \frac{N_0 \sigma \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

$$A(t) = \lambda N(t) = N_0 \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t})$$

→ croît de 0 jusqu'à une valeur limite  $N_0 \sigma \phi$  pour  $t \rightarrow \infty$

- fin de l'irradiation à  $t_i$  puis phase de désintégration

$$A(t_c > t_i) = N_0 \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_c}$$

# Équation de Bateman

- Donne l'activité résiduelle:

$$\frac{dN_i}{dt} = - \sum_{j \neq i} [\lambda_{ji}^d + \bar{\sigma}_{ji} \bar{\varphi}] N_i + \sum_{j \neq i} [\lambda_{ji}^d + \bar{\sigma}_{ji} \bar{\varphi}] N_j$$

$\lambda_{ji}^d$  → proba de désintégration du noyau i en le noyau résiduel j

$\sigma_{ji}$  → section efficace pour la transformation du noyau i en noyau j

$$\bar{\varphi} = \int \varphi(E) dE \quad \bar{\sigma}_{ji} = \int \varphi(E) \sigma_{ji}(E) dE$$

# Les quantités d'intérêt: la dose absorbée (Gy)

- Energie déposée par unité de masse par un rayonnement ionisant
- Exprimée en gray (Gy), 1Gy=1J/kg
- Energie cédée par des neutrons dans un processus:  $n+A=\text{particule}+B$

$$W_{\text{tot}} = \sum_i \int_0^{\infty} \frac{q_i(E)}{\rho} \Sigma_i(E) \varphi(x, E) dE$$

Avec: E énergie cinétique du neutron incident,  
 $q_i$  énergie de recul du noyau B après l'interaction i,  
 $\varphi$  fluence ( $n \cdot \text{cm}^{-2}$ ),  
 $\Sigma_i$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) section efficace macroscopique pour l'interaction i,  
 $\rho$  ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) masse volumique du matériau cible

# Les quantités d'intérêt: la dose absorbée (Gy)

- Energie cédée par des photons par effet compton:

$$\bar{q}_c(E) = E - \bar{E}' \quad \bar{E}' = \frac{1}{\sigma_c} \int \int_{4\pi} E' \left( \frac{d\sigma_c}{d\Omega} \right) d\Omega$$

Avec:  $\sigma_c$  la section efficace de l'effet compton

$$E' = E \frac{1}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad \text{énergie finale du photon}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \times \left[ \frac{E'}{E} \right]^2 \times \left[ \frac{E'}{E} + \frac{E}{E'} - \sin^2 \theta \right] \quad \text{la section efficace différentielle, } r_0 \text{ étant le rayon de l'e}^-$$

- Ordre de grandeur:

fer ( $A = 55,85$ ) irradié par  $10^{20} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$   
de 800 keV

photons d'énergie 7,75 MeV et  
d'intensité  $10^{13} \text{ } \gamma \cdot \text{cm}^{-2}$  dans de l'eau

$$W_{\text{tot}} \approx 5 \times 10^{16} \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1} = 0,8 \times 10^7 \text{ Gy}$$

$$q = 0,21 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} = 0,21 \text{ Gy}$$

# La dose équivalente (Sv)

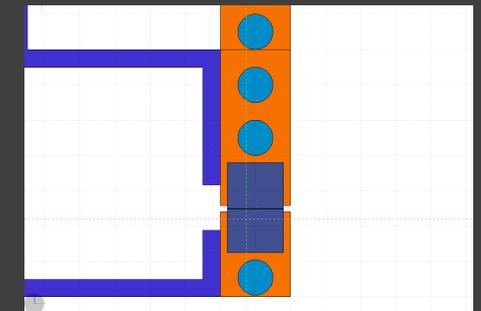
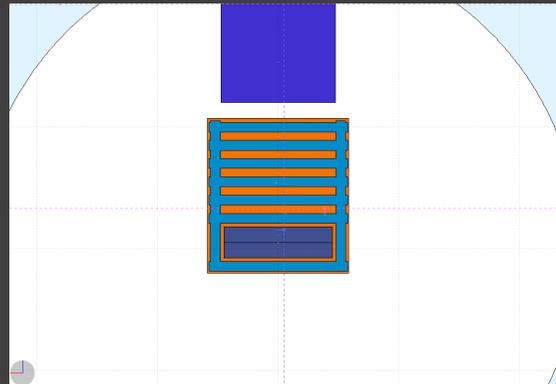
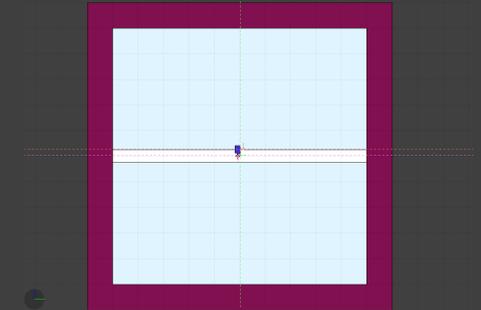
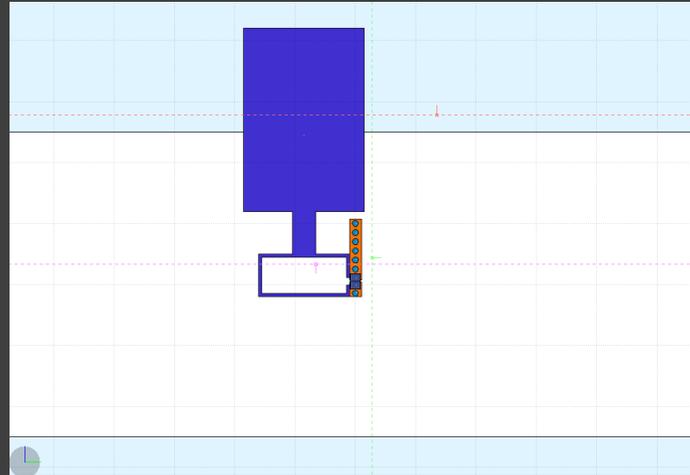
- Elle se définit comme la dose, corrigée d'un facteur de pondération du rayonnement (sans dimensions), qui prend en compte la dangerosité du rayonnement considéré

$$H = \sum_R w_R D_R$$

- Il existe différents ensembles de coefficients de pondération selon les conditions expérimentales
- La dose équivalente est exprimée en Sievert (Sv),  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$

# Géométrie

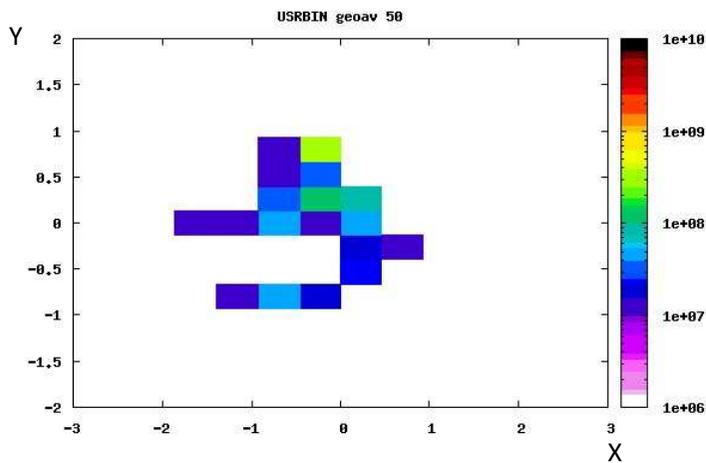
- Modèle final:
  - Enceinte en béton
  - Tube de vide
  - Bouclier thermique en cuivre
  - Fente en tungstène
  - Structure en inox
  - Système de refroidissement (eau)



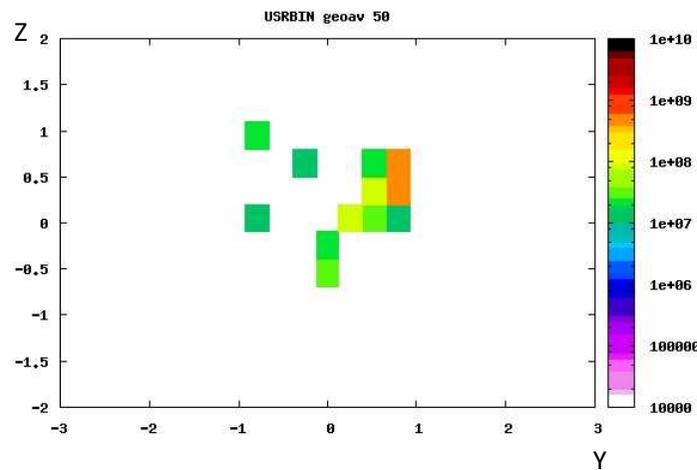
# Simulation: faisceau

- Aucune activation à 100 keV/A (en fait rien en dessous du MeV)
- $^{40}\text{Ar}$  à 10 MeV/A selon y, temps d'irradiation 15 552 000 s (6 mois),  $I=6.10^{13}$  part/s

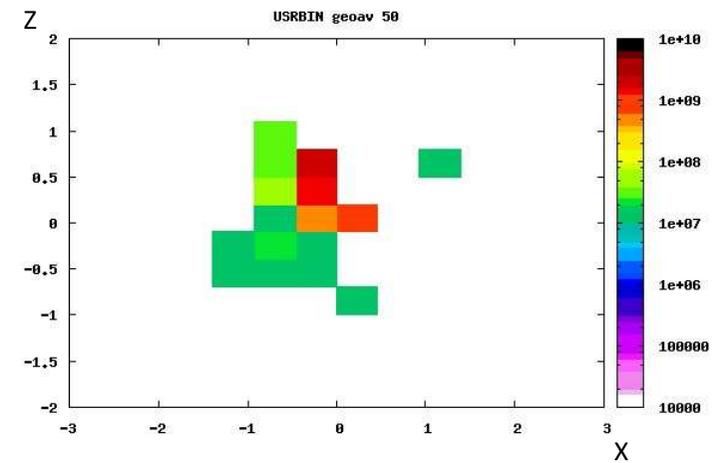
Activité (Bq/cm<sup>3</sup>) prompt



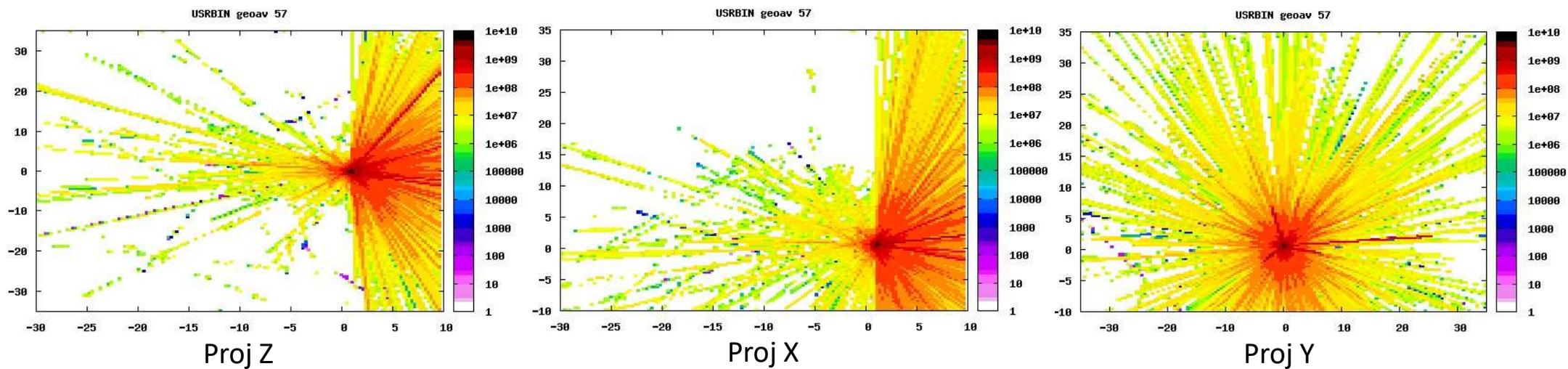
Proj Z



Proj X



Proj Y

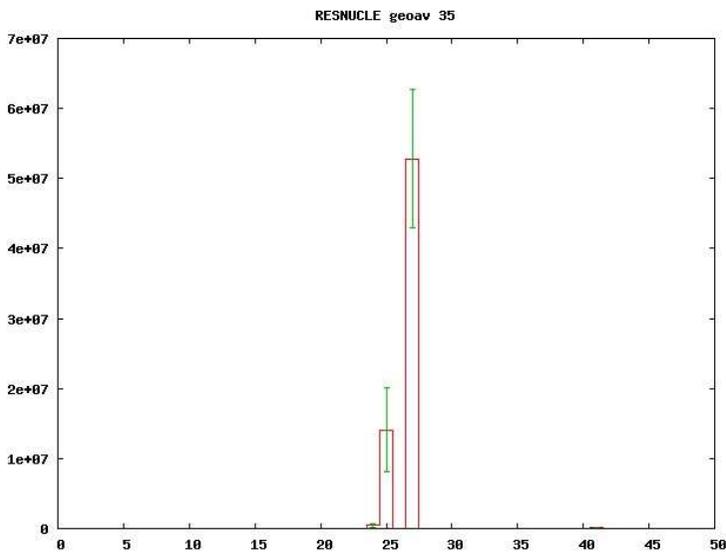


# Simulation: faisceau

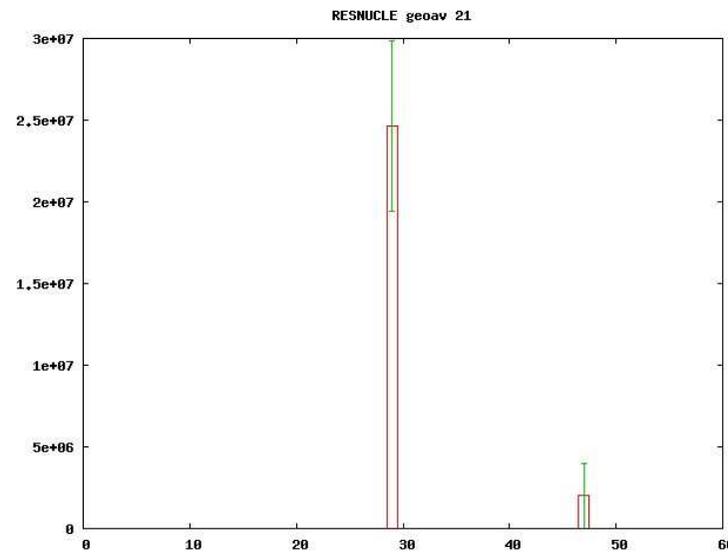
Dose équivalente prompt (pSv)

# Simulation: neutrons (1)

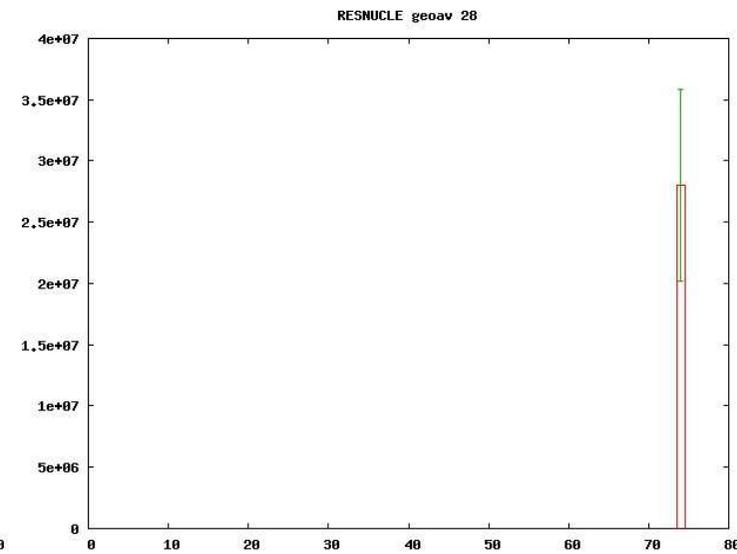
- Activité prompt (Bq) par radionucléide (Z):



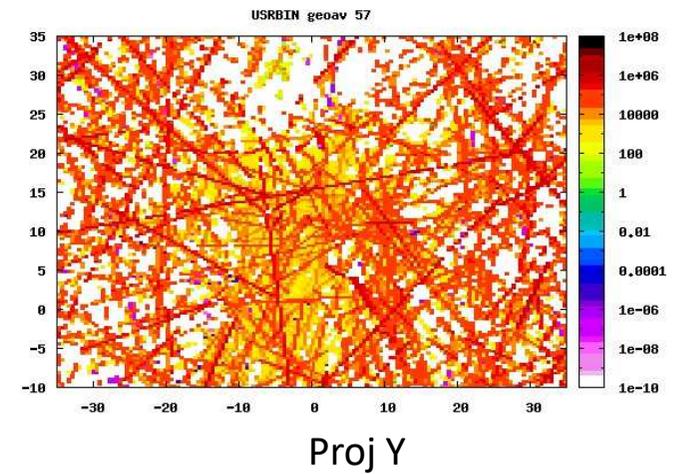
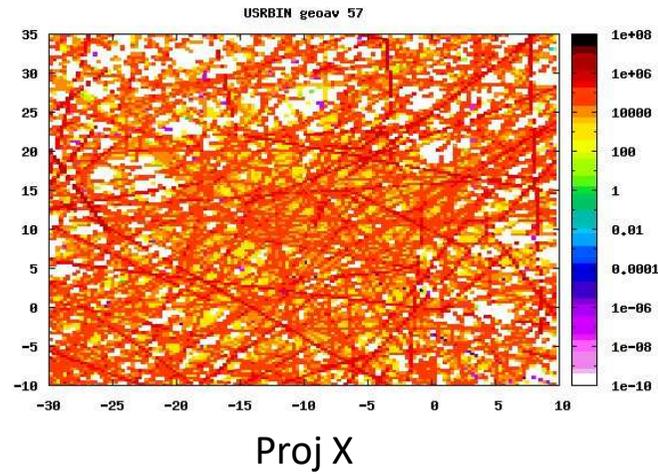
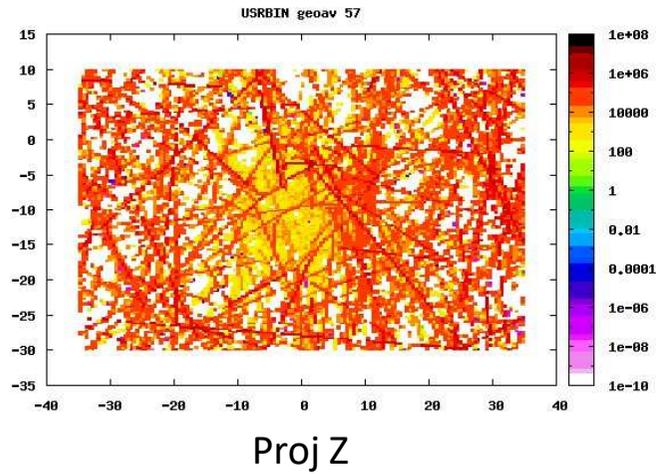
Structure inox



Bouclier cuivre



Fente tungstène

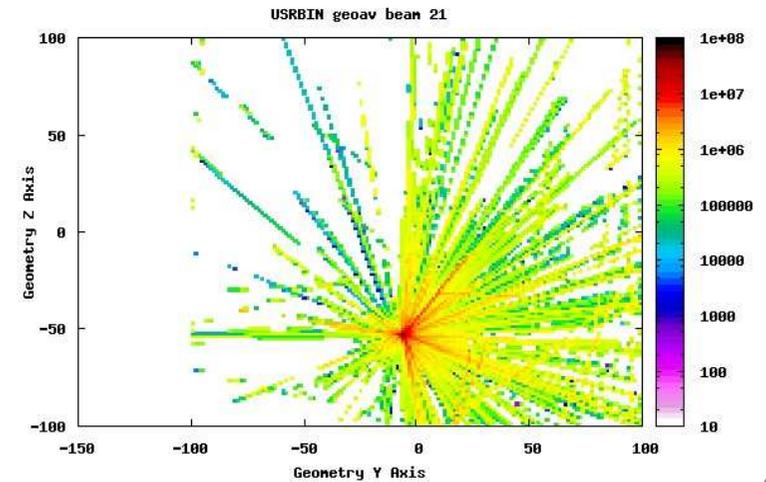
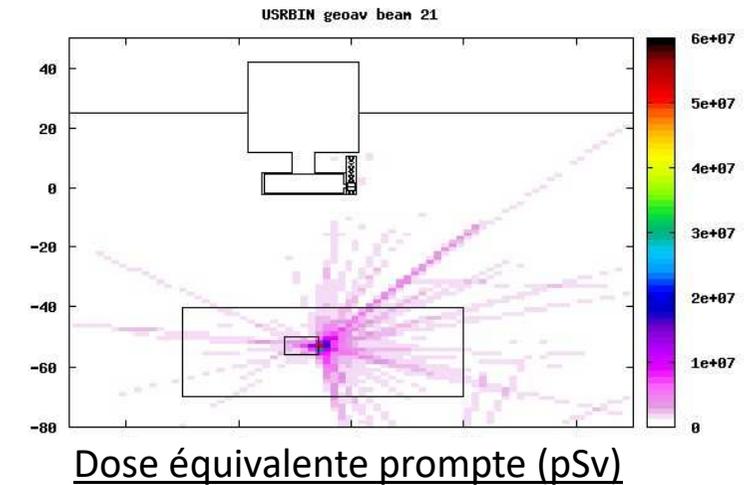
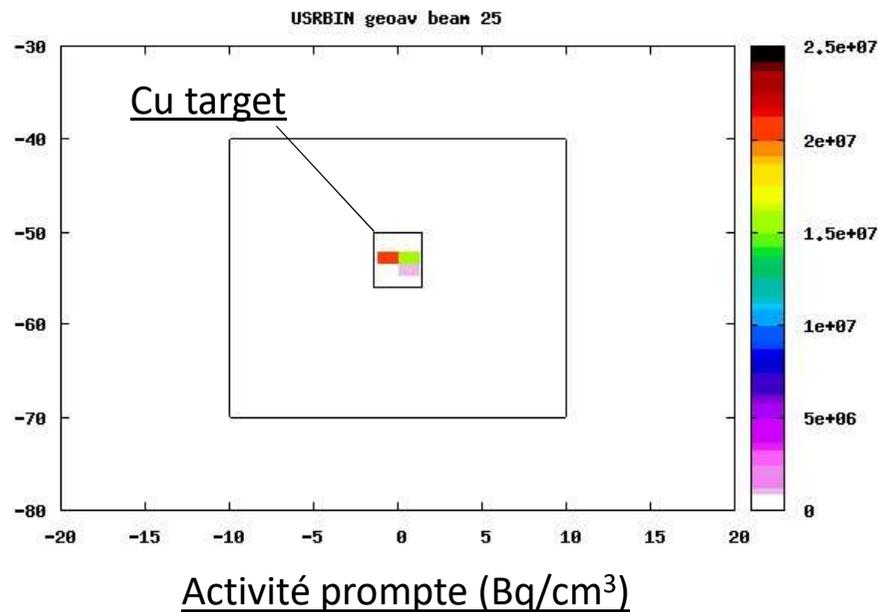


# Simulation: neutrons (1)

Dose équivalente prompt (pSv)

# Simulation: neutrons (2)

- Pas d'activité ni de dose au niveau de l'émittance-mètre



# Nombre d'évènements insuffisant

- Discussion avec Raushan Kabytayeva (JINR)
- Travaille avec 5 cycles de 100 000 000 events chacuns

