



## Radioprotection autour des accélérateurs de protons de haute énergie

Laurent BOURGOIS

CEA Saclay

Service de Protection contre les Rayonnements SPR/SRI/GRA

91191 Gif<sup>s</sup>/ Yvette Cedex

La radioprotection autour des accélérateurs de protons de haute énergie est un vaste domaine. Cet article n'a donc pas la prétention de décrire (et de résoudre) tous les problèmes de radioprotection posés par de telles machines.

Les accélérateurs sont des sources intenses de rayonnement, constituées d'abord par le faisceau lui-même (source primaire) mais aussi par les rayonnements secondaires très pénétrants résultant de l'interaction des particules accélérées avec les divers matériaux rencontrés.

En outre, les réactions induites par les particules primaires et les divers rayonnements secondaires donnent naissance à des produits radioactifs. Cela entraîne une activation des structures qui peut générer des débits de dose importants après l'arrêt de la machine.

Lors du fonctionnement de la machine, il est également possible d'observer une contamination atmosphérique à cause de l'interaction des particules avec l'air.

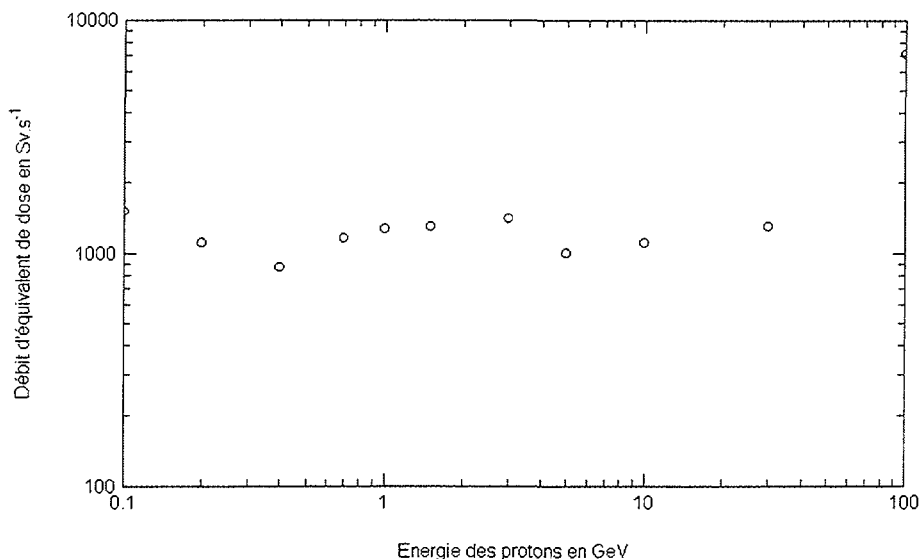
### **1 Evaluation de l'exposition externe lors du fonctionnement de la machine.**

En fonctionnement normal, ou par suite de défauts éventuels du champ de guidage ou du système d'accélération, un certain nombre de protons en cours d'accélération viennent se perdre dans les structures de la machine, où ils peuvent donner lieu à des réactions nucléaires de spallation qui engendrent des particules secondaires par les phénomènes de cascades nucléaires et d'évaporation.

Sur les aires d'expériences, outre les risques dus aux pertes du faisceau dans les structures ou sur une cible expérimentale, vient s'ajouter le risque d'irradiation par le faisceau primaire.

#### **1.1 Evaluation du risque dans le faisceau primaire**

La figure 1 donne d'après la CIPR 51 [1] le débit d'équivalent de dose en  $\text{Sv.s}^{-1}$  sous 10 mm de tissus vivants dans un faisceau de protons de  $1.10^{12}$  p.s<sup>-1</sup> de section de 1 cm<sup>2</sup>.

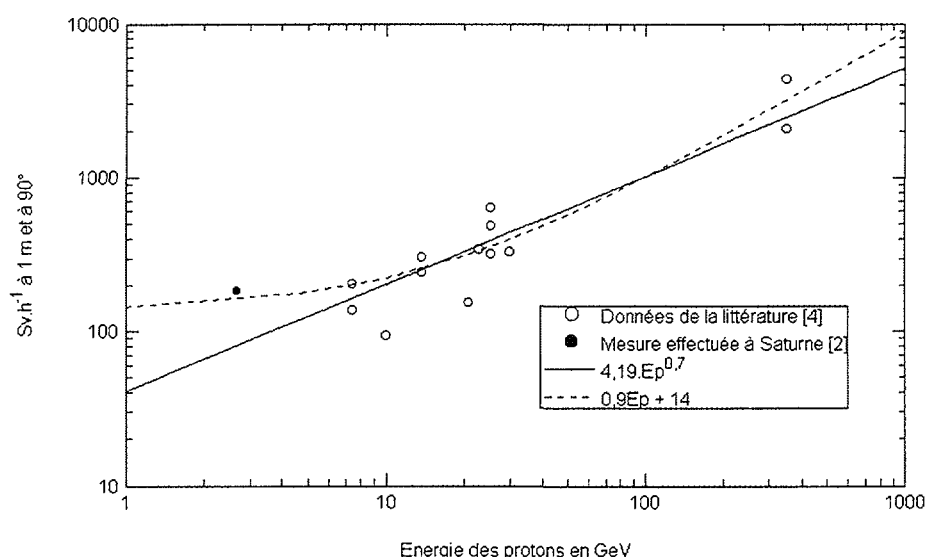


**Figure 1 : Débits d'équivalent de dose sous 10 mm de tissus vivant dans un faisceau de protons de  $1 \text{ cm}^2$  et d'intensité  $1.10^{12} \text{ p.s}^{-1}$  (d'après la CIPR 51 [1])**

Par exemple, un faisceau de 3 GeV d'intensité  $1.10^{12} \text{ p.s}^{-1}$  présente un débit d'équivalent de dose de  $1400 \text{ Sv.s}^{-1}$ . Rappelons pour mémoire que la dose létale 50 % (dose qui conduit au décès de 50 % de la population exposée) est de 4 à 5 Sv corps entier. De même, la dose annuelle maximale admissible pour un travailleur de catégorie A (Directement Affecté aux Travaux sous Rayonnements) est de 50 mSv par an.

## 1.2 Evaluation du risque dû au rayonnement secondaire

Pour le rayonnement secondaire, la figure 2 donne le débit d'équivalent de dose dû aux neutrons à 1 mètre et  $90^\circ$  d'une cible épaisse bombardée par un flux de protons de  $1.10^{12} \text{ p.s}^{-1}$ .



**Figure 2 : Débits d'équivalent de dose dus aux neutrons à 1 m et à  $90^\circ$  d'une cible épaisse bombardée par  $1.10^{12}$  protons par seconde [2]**

Par exemple, si un faisceau de  $3 \text{ GeV} \cdot 1.10^{12} \text{ p.s}^{-1}$  interagit avec une cible en fer de 30 cm, on estime [2] le débit d'équivalent de dose à un mètre dû aux neutrons à  $180 \text{ Sv.h}^{-1}$ .

Ces débits d'équivalents de dose sont extrêmement élevés, Il faut donc prévoir une protection biologique autour des points de perte du faisceau afin de les ramener à un niveau aussi bas qu'il est raisonnablement possible.

### 1.3 Evaluation du risque à l'extérieur des protections

Le modèle de Moyer est une méthode de calcul semi-empirique, validé de 7,4 à 350 GeV, généralement utilisé pour calculer les blindages latéraux des accélérateurs de haute énergie. Ce modèle a tout récemment été validé à 2,7 GeV par des mesures effectuées à Saturne [2].

Pour avoir une description détaillée de ce modèle le lecteur pourra se référer par exemple à la publication de Stevenson et al. (1982) [3] ou au livre de Thomas et Stevenson (1988) [4]. Tesch et Dinter (1986) [5] ont résumé les hypothèses simplificatrices du modèle et les conditions nécessaires pour valider celles-ci.

Avec ces hypothèses, l'équivalent de dose derrière la protection peut être exprimé par l'équation de Moyer :

$$H_{moy}(\theta) = \frac{N \cdot \Psi(E_p) \cdot \exp(-\beta\theta) \cdot \exp(-d(\theta)/\lambda)}{r^2}$$

avec (voir Fig. 3) :

- $H_{moy}(\theta)$  l'équivalent de dose derrière la protection au point d'observation (Sv),
  - $N$  le nombre de protons interagissant sur la cible ,
  - $\Psi(E_p)$  terme source ( $\text{Sv.m}^2$ ),
  - $E_p$  énergie des protons (GeV),
  - $\beta$  paramètre de relaxation angulaire ( $\text{radian}^{-1}$ ),  $\beta=2,3 \text{ rad}^{-1}$  [4],
  - $\lambda$  paramètre d'atténuation ( $\text{kg.m}^{-2}$ ),  $\lambda=1170 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le béton [4],
  - $\theta$  angle d'observation (radian),  $\pi/3 < \theta < 2\pi/3$ ,
  - $d$  épaisseur de la protection ( $\text{kg.m}^{-2}$ ),
  - $r$  distance au point d'observation (m).
- $\Psi(E_p) = [(4,19 \pm 1,4) \times 10^{-13}] \cdot E_p^{0,7 \pm 0,1}$  [2]

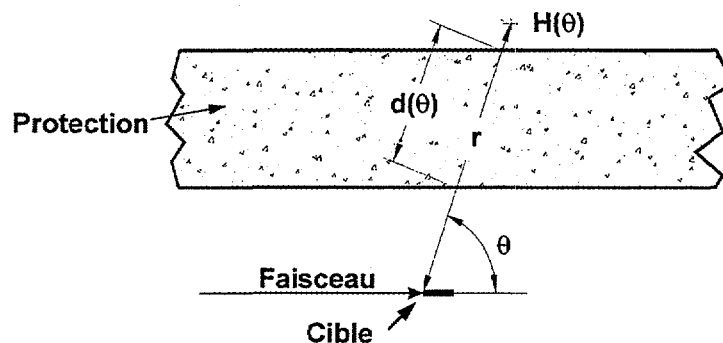


Figure 3 : schéma de la géométrie de blindage pour le modèle de Moyer

## 2 Evaluation de l'activation des structures

Lorsqu'un proton de haute énergie interagit avec un noyau, des neutrons, des protons et des fragments de noyaux peuvent être émis, transformant ainsi le noyau cible en un isotope différent ayant une grande probabilité d'être radioactif. De plus, certaines particules secondaires réémises lors de cette interaction peuvent être suffisamment énergétiques pour à leur tour, former des noyaux radioactifs par des réactions de spallation ou de captures.

Pour évaluer de façon qualitative les radionucléides produits à Saturne dans différents matériaux, des disques de cuivre, d'aluminium, de fer et d'inox ont été disposés près de l'extraction SD3 (point de perte important du faisceau) pendant toute une période de fonctionnement (soit environ 3000 heures). Les faisceaux accélérés durant cette période étaient des protons ou des deutons d'énergie moyenne 1 GeV et d'intensité  $1.10^{10}$  p.s<sup>-1</sup>. Chaque disque a été analysé par spectrométrie  $\gamma$  après 100 heures de décroissance. Les tableaux I à III résument les radionucléides trouvés ainsi que leur activité pour les différents matériaux irradiés.

Tableau I : Radionucléides décelés dans un disque de cuivre exposé pendant 3000 heures après 100 heures de décroissance

Radionucléide	Période radioactive	Activité en Bq/kg
<sup>46</sup> Sc	83.8 jours	5700
<sup>48</sup> V	16 jours	8300
<sup>51</sup> Cr	27.7 jours	40000
<sup>54</sup> Mn	312.2 jours	19000
<sup>59</sup> Fe	44.5 jours	9000
<sup>56</sup> Co	77.1 jours	18000
<sup>57</sup> Co	271.8 jours	33000
<sup>58</sup> Co	70.8 jours	120000
<sup>60</sup> Co	5.27 ans	4900
<sup>65</sup> Zn	243.9 jours	2400

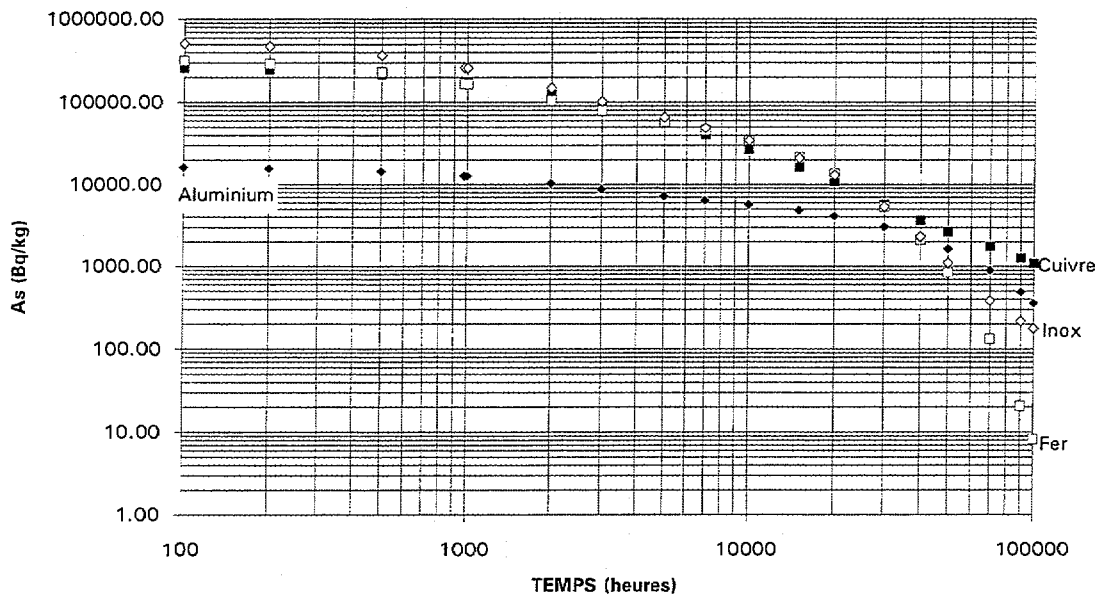
Tableau II : Radionucléides décelés dans un disque d'aluminium exposé pendant 3000 heures après 100 heures de décroissance

Radionucléide	Période radioactive	Activité en Bq/kg
<sup>54</sup> Mn	312.2 jours	160
<sup>22</sup> Na	2.6 ans	7500
<sup>7</sup> Be	53.2 jours	8500

Tableau III : Radionucléides décelés dans un disque d'inox exposé pendant 3000 heures après 100 heures de décroissance

Radionucléide	Période radioactive	Activité en Bq/kg
<sup>46</sup> Sc	83.8 jours	13500
<sup>48</sup> V	16 jours	53500
<sup>51</sup> Cr	27.7 jours	299000
<sup>54</sup> Mn	312.2 jours	65100
<sup>22</sup> Na	2.6 ans	140
<sup>56</sup> Co	77.1 jours	14000
<sup>57</sup> Co	271.8 jours	17600
<sup>58</sup> Co	70.8 jours	50000
<sup>60</sup> Co	5.27 ans	730

La figure 4 montre la décroissance radioactive de ces disques de 100 à 10000 heures.



*Figure 4 : Décroissance de l'activité massique totale dans les disques de cuivre, d'incox, de fer et d'aluminium pour 3000 heures d'irradiation*

Notons que les débits de dose en  $\beta$  et  $\gamma$ , mesurés au contact de certain équipement, juste après un arrêt de la machine peuvent être de l'ordre de  $10 \text{ mGy.h}^{-1}$ . Il faut donc attendre un certain temps avant de pénétrer ou de travailler dans certaines zones de l'accélérateur.

### 3 Activation de l'air

On peut observer dans les accélérateurs de haute énergie, dans certaines conditions, une activation de l'air.

Le tableau IV donne l'activation de l'air par des hadrons et des neutrons thermiques [6].

Tableau IV : Activation de l'air produit par un faisceau de  $10^{12}$  hadrons. $\text{s}^{-1}$  et des neutrons thermiques passant dans 1 mètre d'air (d'après [6])

Radionucléide	Période	production en $\text{kBq.s}^{-1}$	Activité à saturation MBq
$^{14}\text{O}$	1.2 min.	12	1.2
$^{15}\text{O}$	2.1 min.	250	45
$^{13}\text{N}$	10 min.	60	52
$^{11}\text{C}$	20 min.	30	48
$^7\text{Be}$	53 jours	$7.10^{-3}$	48
$^3\text{H}$	12.3 ans	$3.10^{-4}$	160
$^{41}\text{Ar}$	1.83 heures	1.9	13

Il faut toutefois noter que lors de mesures de contamination de l'air dans différents accélérateurs de protons -fonctionnant à environ  $10^{12}$  p.s<sup>-1</sup>-, seuls les éléments à période courte ont été observés. Notons cependant que pour des intensités de faisceau très supérieures, les éléments de plus longue périodes seraient quantifiable.

#### 4. Contrôle des Entrées/Sorties

Comme on l'a vu au paragraphe 1, lorsque l'accélérateur est en fonctionnement, des débits d'équivalent de dose importants règnent dans les locaux abritant l'accélérateur et les salles expérimentales. Ces locaux alors à accès interdit ; lorsque ces locaux sont accessibles, des dispositions matérielles doivent être prises pour ne pas envoyer le faisceau dans ces salles.

##### *Contrôle et verrouillage des accès*

Toutes les zones d'exclusion susceptibles de recevoir un faisceau de particules sont rendues matériellement inaccessibles sauf par des accès prévus et munis de systèmes de verrouillage et de contrôle. La fermeture effective de chaque accès est contrôlée par des circuits appropriés. Les procédures d'accès à ces zones d'exclusion sont résumées dans le tableau V.

##### *Détecteur de sécurité*

Dans chaque zone est implanté un détecteur dit « détecteur de sécurité ». Ce détecteur est inhibé après que la séquence sonore d'évacuation de la zone a été effectuée. Dès que la zone est rendue accessible, le détecteur de sécurité est mis en éveil ; il permet de détecter et de signaler toute augmentation intempestive des niveaux de rayonnements et entraîne la coupure de l'extraction ou de l'accélération, en cas de dépassement d'un seuil prédéterminé.

##### *Arrêt d'urgence*

Des boutons d'arrêt d'urgence sont disposés en différents emplacements des zones de Saturne, afin d'arrêter immédiatement les équipements de l'accélérateur. Toute personne se trouvant dans une zone au moment où retentit le signal d'évacuation doit sortir ou, en cas d'empêchement, actionner un arrêt d'urgence.

Tableau V : Accès aux zones d'exclusion (exemple de Saturne)

Nature de la zone et rappel des conditions de sécurité	Procédure d'accès après réalisation des conditions de sécurité	Procédure de sortie
Synchrotron :	A - Arrêt longue durée :	- Ronde SPR
a) fermeture de la Vanne	accès autorisé	
d'Injection Haute Energie	- Pour raison de service par le personnel habilité ;	
b) Coupure HF synchrotron	- Visiteurs accompagnés.	
	B - ouverture contrôlée :	
	a) Contrôle nominatif par le SPR	
	- Demande d'accès au Tableau de Contrôle des Rayonnements ;	- Contrôle nominatif par le SPR;
	- décliner son identité et le numéro de la porte d'accès.	
	b) Contrôle automatique des entrées	
	- demande d'accès au PCP	

Nature de la zone et rappel des conditions de sécurité	Procédure d'accès après réalisation des conditions de sécurité	Procédure de sortie
Zone expérimentale : Coupure de l'extraction et/ou fermeture d'un bloc d'arrêt et/ou autres dispositions	Suivant aire expérimentale	- Ronde d'évacuation -Enclenchement du rondier -fermeture de la porte -Remise en place des clés -Signal d'évacuation -Commande de mise de la casemate sous faisceau

## 5. Références

- [1] ICRP publication 51. Data for use in protection Against external Radiation. Pergamon Press, 1987.
- [2] Bourgois, L., Delacroix, D., Ferreux, L., Masson, L. Dose equivalent measurements at a 2.7 GeV proton accelerator and comparison with the Moyer model. Health Phys. 70(1):36-40, 1996.
- [3] Stevenson, G. R.; Liu Kuei-lin; Thomas, R. H. Determination of transverse shielding for proton accelerators using the Moyer model. Health Phys.43:13-29; 1982.
- [4] Thomas, R. H.; Stevenson, G. R. Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators: Technical Report Series N° 283, IAEA Vienna; 1988.
- [5] Tesch, K.; Dinter, H. Estimation of radiation fields at high energy proton accelerators. Radiation Protection Dosimetry 15 N° 2:89-107; 1986.
- [6] Sullivan, A. H. A guide to radiation and radioactivity levels near high energy particle accelerators: Nuclear Technology Publishing, Ashford, kent, TN23 1JW. England, 1992.