



Centre
de Lutte contre le Cancer
**François
Baclesse**

unicancer NORMANDIE - CAEN

Archade
ADVANCED RESOURCE CENTRE
FOR HADRON THERAPY IN EUROPE

Radioprotection d'une installation de protonthérapie - Le Centre Archade de Caen -

Alain BATALLA¹, Benjamin MENARD¹, Gilbert PIGREE²,
Thomas TESSONNIER¹, Anthony VELA¹
et Jean-Louis HABRAND¹

¹Centre François BACLESSE
3, avenue Général HARRIS – 14076 – CAEN
a.batalla@baclesse.unicancer.fr

²UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE
Esplanade de la Paix
14032 - CAEN

Protonthérapie et Carbonethérapie

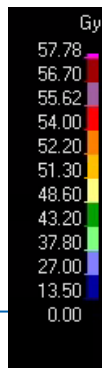
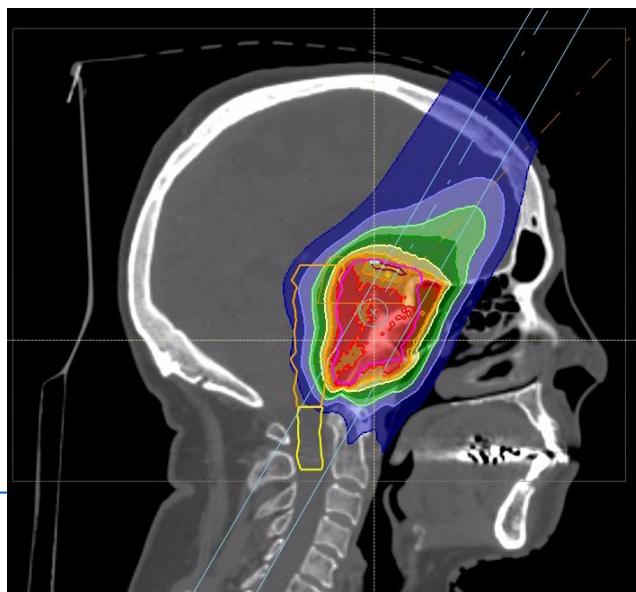
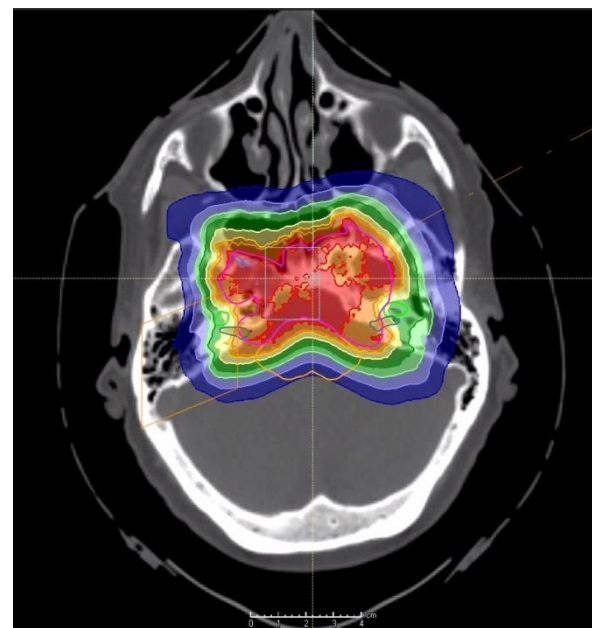
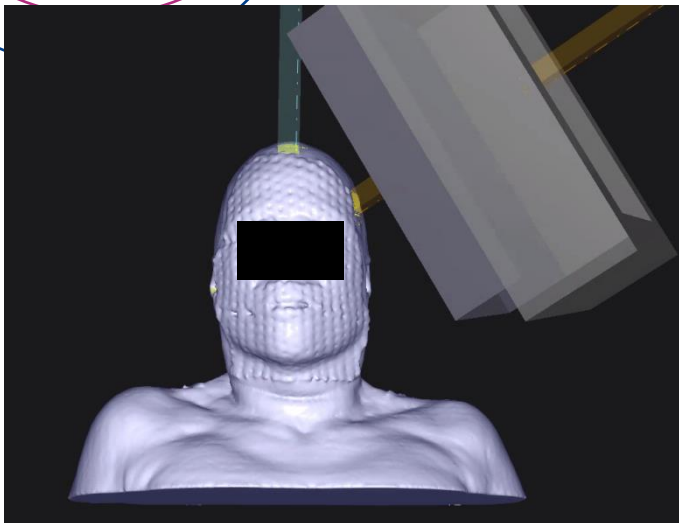
- La radiothérapie par protons (P) et par ions carbone (C), connaît un essor sans précédent à travers le monde
 - 82 centres sont opérationnels (dont 11 C)
 - 50 sont en construction
 - 25 en projet
- En France, 2 centres P sont opérationnels, depuis 1991
 - Institut Curie/Orsay (ICPO)
 - Centre Lacassagne Nice (IMPT)

} Données du
PTCOG
(oct 2018)

Principales indications

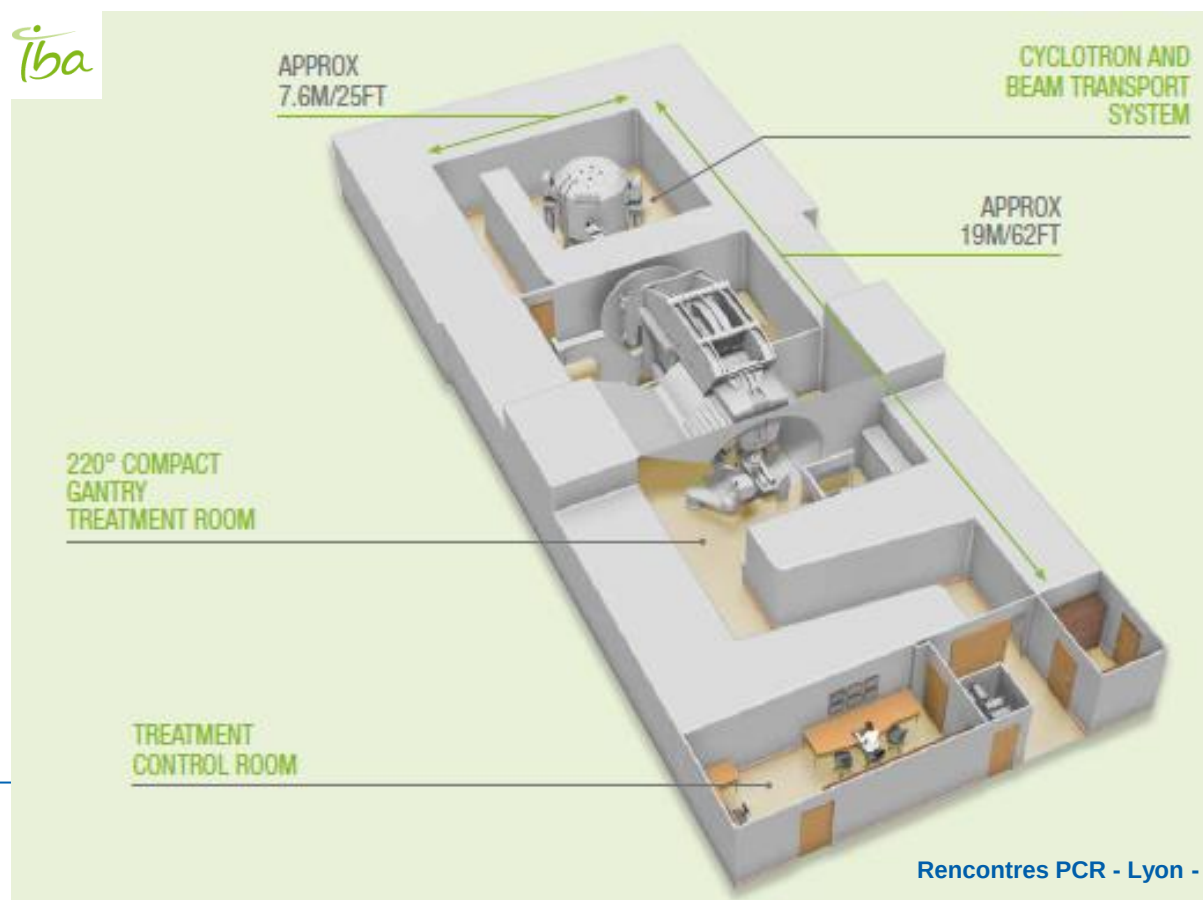
- Mélanomes oculaires (env. 400 cas/an, en Fr)
- Sarcomes de bas grade, Chordomes, Chondrosarcomes ..
 - Base du crâne (≤ 200 cas/an en Fr)
 - Rachis et para rachidiens
- Evolution depuis une dizaine d'année : élargissement des indications
 - Tumeurs du massif facial
 - Cylindromes, carcinomes des sinus de la face
 - Enveloppes du SNC
 - Méningiomes de la base, Ewing...
 - Prostate (US)

Exemple : Méningiome



Evolution technologique

- La technologie donne accès aujourd'hui à des installations plus compactes et dont le coût global est moins élevé



En France :

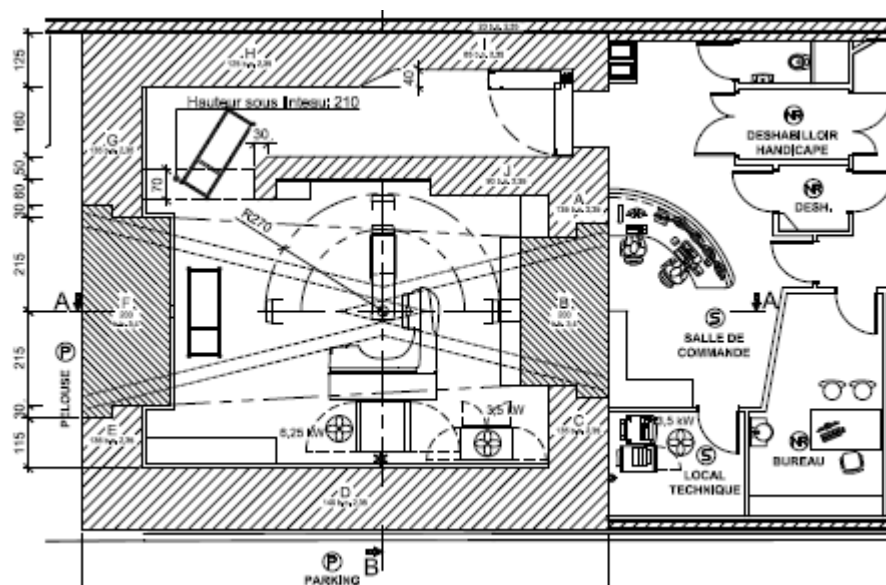
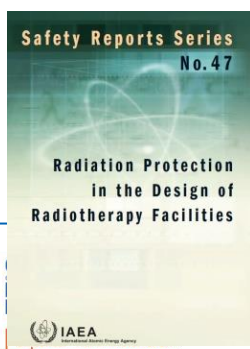
- L'évolution est plus modérée. Il y a de nombreux projets mais à l'heure actuelle, un seul nouveau site a démarré en 2018 → Centre Archade à Caen sur le site CyclHad
 - Proteus One (Superconducting synchrocyclotron « S2C2 » et bras isocentrique compacts) de la société IBA
 - Projet d'un cyclotron cryogénique pour les ions carbone (≈ 5 ans)
- Les freins au développement de l'hadronthérapie sont plus économiques que technologiques
 - Régime des autorisations sanitaires
 - Investissements importants
 - Equilibre économique fragile en fonctionnement

Protonthérapie et radioprotection

- La radioprotection en protonthérapie, c'est de la radioprotection en radiothérapie « *avec certaines particularités* »
 - Présence de neutrons secondaires → Dimensionnement des protections biologiques très complexe
 - Questionnement sur l'activation de l'air de la salle cyclotron et les rejets extérieurs
 - Questionnement sur l'activation des matériaux irradiés (et des patients)
 - Coactivité avec le personnel technique en permanence sur le site
 - Présence d'autres risques

Protonthérapie et radioprotection

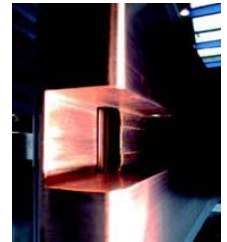
- Dimensionnement des protections biologiques en Radiothérapie photonique
 - En radiothérapie photonique, le dimensionnement des protections biologiques ne demande pas d'outils mathématiques et informatiques très élaborés
 - NCRP 151
 - AIEA 47
 - Iso 16645



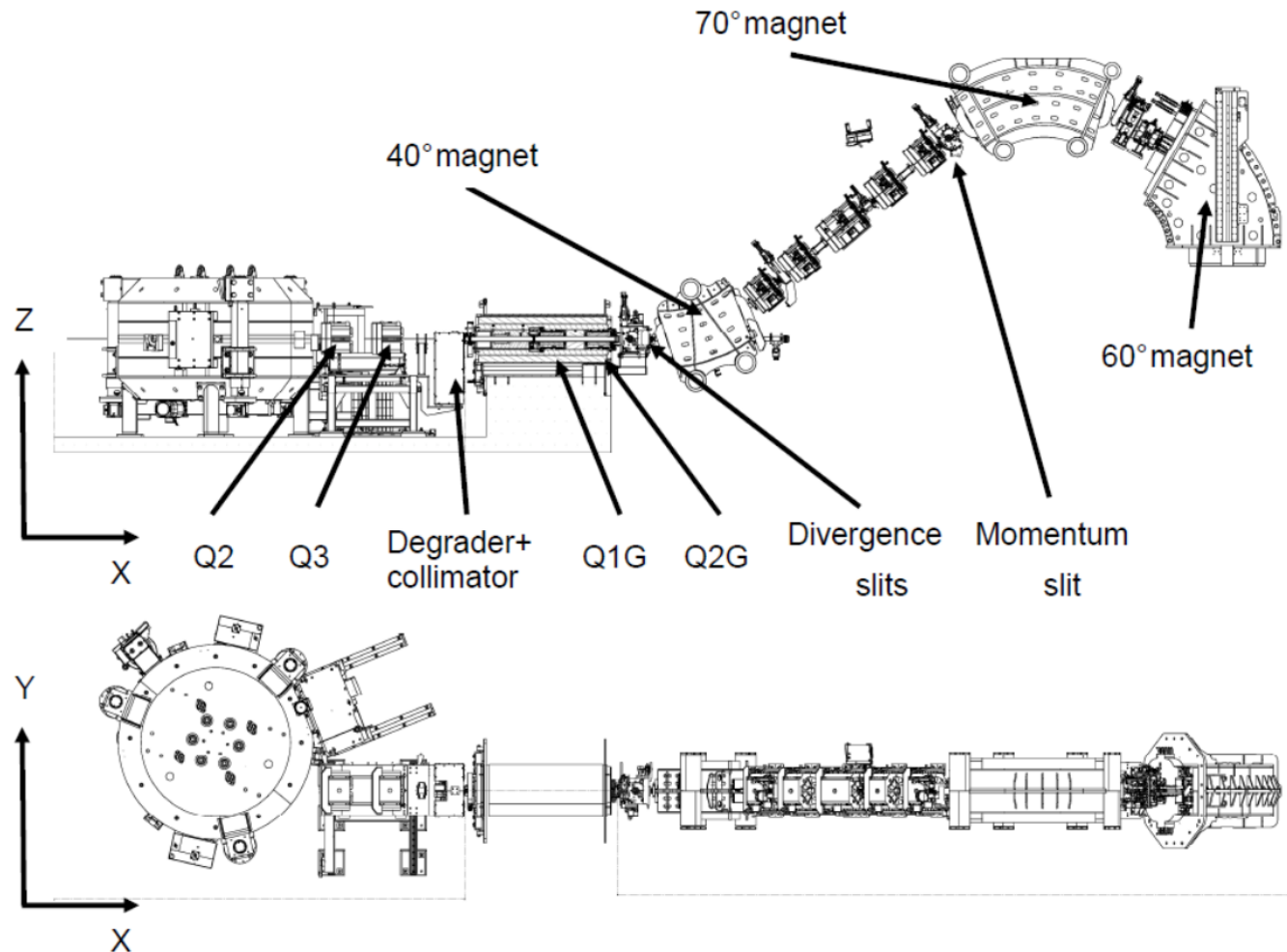
Protonthérapie et radioprotection

Dimensionnement des protections biologiques

- Dans le cas du S2C2, l'efficacité d'extraction à prendre en compte pour le calcul des épaisseurs des murs est de 30 %
 - 70 % du faisceau de proton est perdu dans le cyclotron
 - 25 % dans la circonférence du cyclotron
 - 45 % à l'entrée du septum électromagnétique d'extraction
- ➡ Le cyclotron est donc la principale source de neutrons
- Autres sources de neutrons :
 - Après l'extraction, les protons sont envoyés vers la ligne de faisceau
 - Adaptation d'énergie → Dégadeur. Situé dans le local cyclotron → moins de neutrons qui transitent dans la salle de traitement et qui atteignent le poste de commande
 - Focalisation et direction → Collimateur et quadripôles
 - Correction de divergence et filtration → Fentes (Divergence et momentum slits)
 - Sur les installations de type Proteus
 - Uniquement technique de balayage (PBS), pas de technique passive (double scattering) avec des collimateurs additionnels et des compensateurs générateurs de neutrons

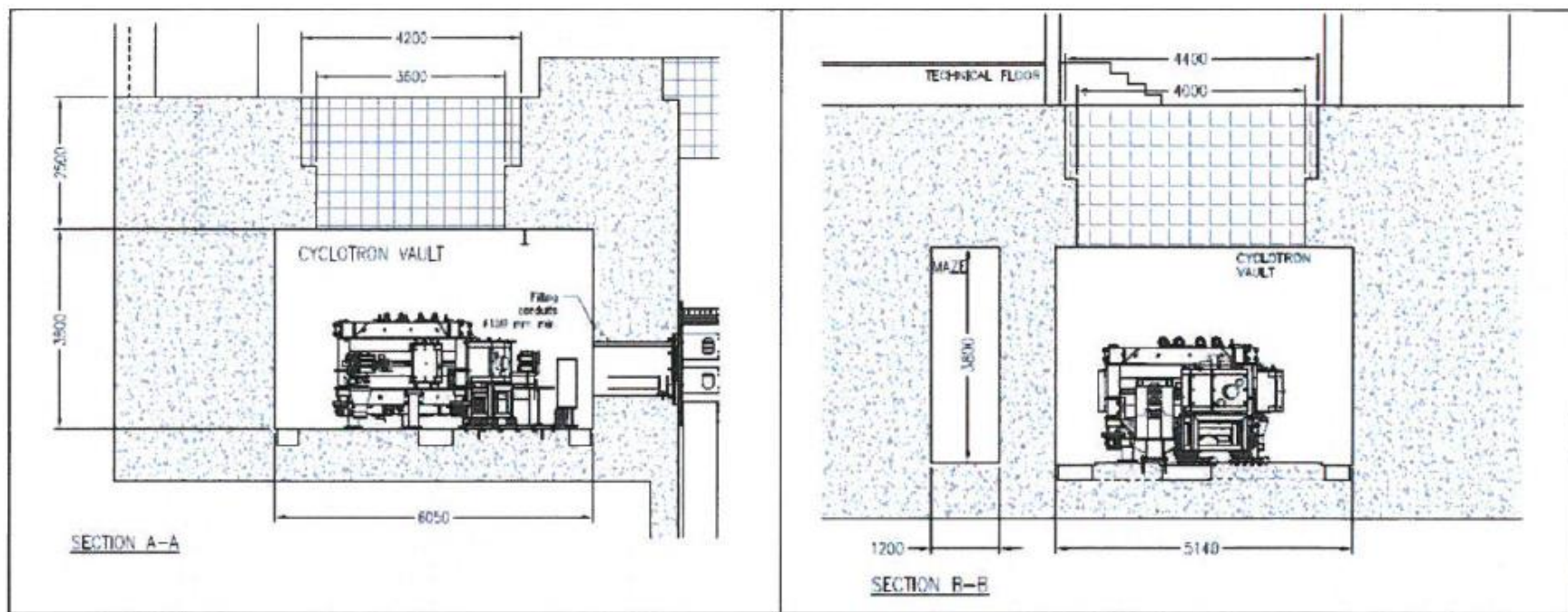


Protonthérapie et radioprotection



Global view of the CGTR.

Protonthérapie et radioprotection



Protonthérapie et radioprotection

● Dimensionnement des protections biologiques

● La multiplicité ...

- des sources de neutrons,
- des énergies,
- des matériaux qui interagissent avec le faisceau,
- des géométries,
- etc.

... rend les calculs très complexes → la maîtrise d'outils de simulation Monte Carlo (MCNP par ex.) est indispensable.

Le constructeur de la machine et le client (ou son prestataire) réalisent des calculs séparés, à partir de données d'entrée communes.

Ces calculs sont ensuite comparés et une note de convergence est rédigée, elle servira de base au maître d'œuvre du bâtiment.

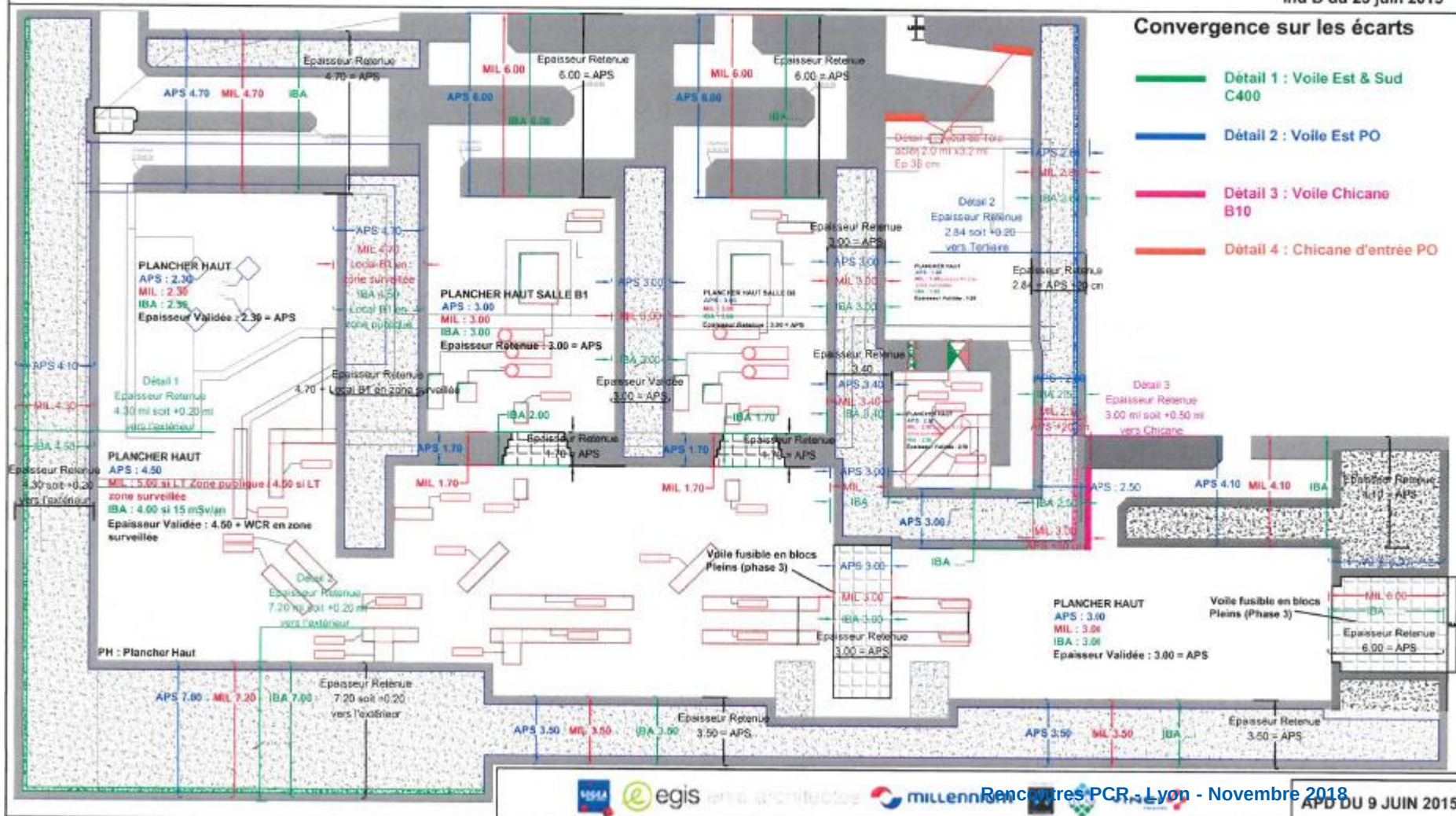
Protonthérapie et radioprotection

PLAN DE CONVERGENCE DES RESULTATS DES CALCULS DE RADIOPROTECTION

Ind B du 23 juin 2015

Convergence sur les écarts

- Détail 1 : Voile Est & Sud C400
- Détail 2 : Voile Est PO
- Détail 3 : Voile Chicane B10
- Détail 4 : Chicane d'entrée PO



Protonthérapie et radioprotection

● Activation de l'air

- Une étude a été menée par la société Millenium, par simulation Monte Carlo pour le cyclotron C400 qui produira des ions (Carbone, Hélium, p, etc. ...) ≈ 400 MeV/u
- Extrait de l'étude : *"A ces énergies, quand les ions traversent de la matière pondérable, il se produit des réactions nucléaires qui fragmentent les noyaux atomiques touchés et libèrent des quantités plus ou moins importantes de neutrons. Ces neutrons traversent l'air et les voiles en béton du génie civil pour y réaliser différentes réactions nucléaires dont notamment celles de basse énergie communément nommées activation. L'activation de l'air conduit à la production de noyaux radioactifs émetteurs β et γ de courtes périodes dont il s'agit de vérifier que leur transfert à l'environnement par l'intermédiaire du réseau de ventilation ne conduit pas à des doses délivrées aux populations cibles supérieures à la limite réglementaire."*
- Les outils utilisés :
 - Spectre de neutrons produits sur le dégradeur (PHITS)
 - Evolution temporelle de l'activité de l'air (FISPACT)
 - Estimation des débits de dose (MCNPX)
 - Coefficients de transferts atmosphériques (CTA)
 - DPUI

Protonthérapie et radioprotection

● Activation de l'air

● Cette étude a été réalisée en prenant des hypothèses très péjoratives :

- Faisceau de ^{12}C avec dégradation maximale de l'énergie (410 $\rightarrow$ 110 MeV/A) générant une production maximale de neutrons dans le local cyclotron
- Majoration du volume d'air activé (x4)
- Transit instantané entre la salle et l'exutoire
- Intensité de faisceau maximisé sur toute la période
- Nombre annuel de tirs majoré

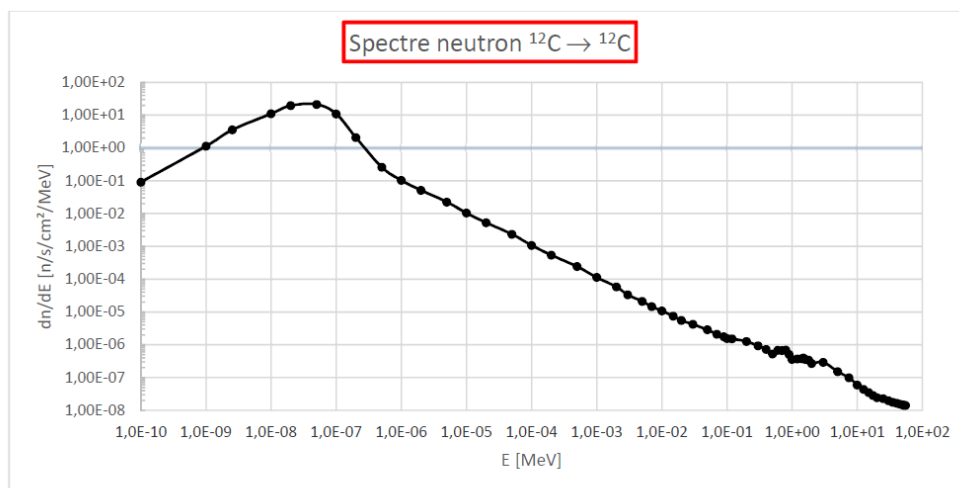


Figure 5 : Spectre neutron de l'air du bunker C400 [0 : 52] MeV – zone d'air numéro 2

Protonthérapie et radioprotection

● Activation de l'air

- L'étude analyse l'impact de la dispersion atmosphérique des radioéléments générés par activation de l'air sur le public en prenant en compte l'exposition externe et l'exposition interne.

- C'est essentiellement l' ^{15}O et ^{13}N qui dominent dans les premières minutes puis le ^{11}C et ^{41}Ar
- Pour l'exposition externe les résultats obtenus à distance du rejet sont :

	10 m	20 m	500 m
Débit de dose efficace ($\mu\text{Sv}/\text{mois}$)	11,2	2,5	$3,5 \cdot 10^{-3}$

- Pour l'exposition interne les résultats obtenus à distance du rejet sont :

	10 m	20 m	500 m
Débit de dose efficace ($\mu\text{Sv}/\text{mois}$)	5,5	1,7	$8,6 \cdot 10^{-2}$



- **L'étude conclue que, malgré les hypothèses très majorantes, il n'y a pas de nécessité de mettre en place des dispositions particulières autres que celles prévues (renouvellement de 3 volumes horaire, filtres à poussières pour l'air entrant)**
- Pour le S2C2 (protons)
 - L'étude a été menée sur le cyclotron C400 avec des ions C mais
 - Le S2C2 génèrera 3 à 10 fois moins de neutrons
 - **L'activation de l'air sera donc plus faible dans les mêmes proportions**

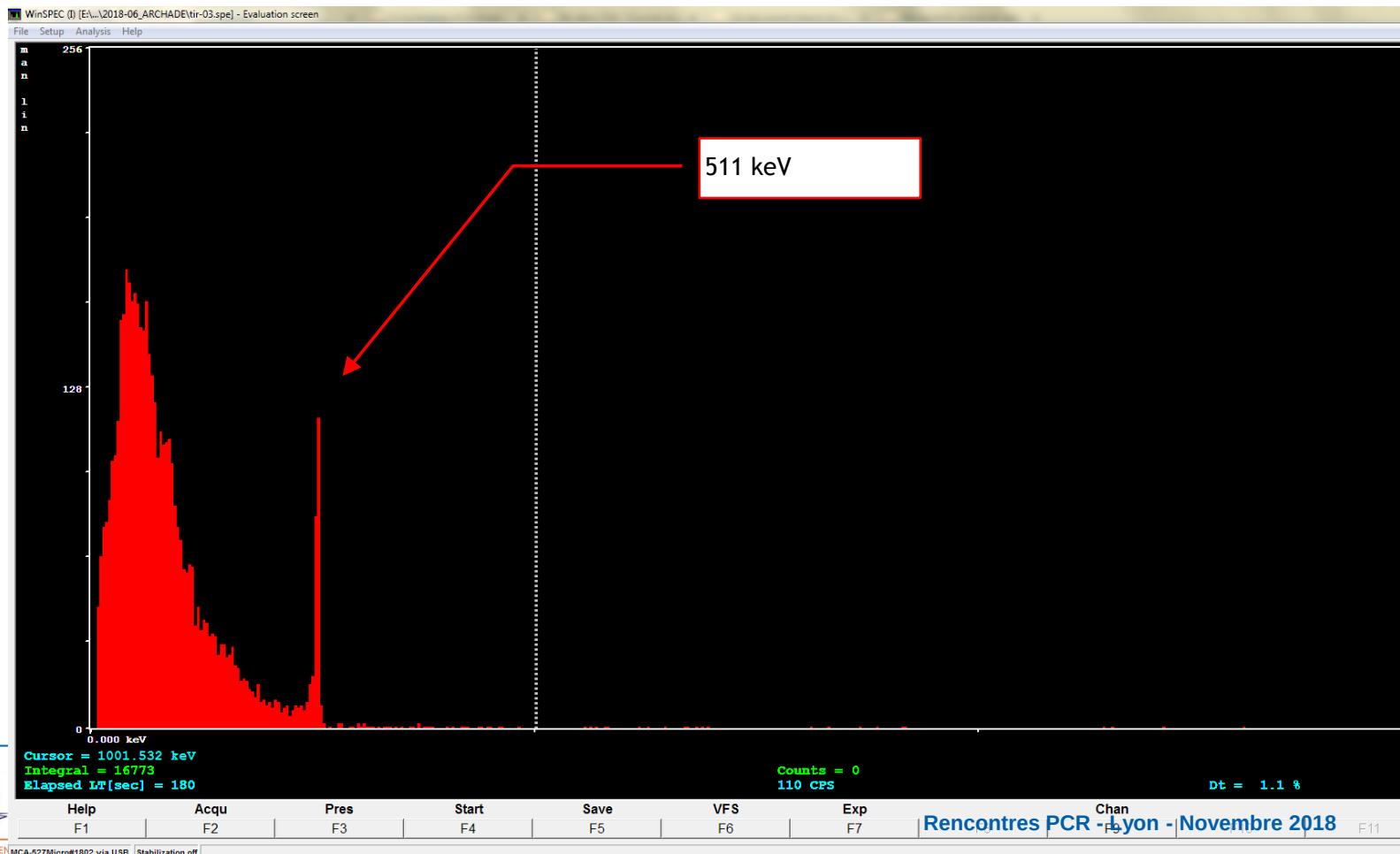
Activation des matériaux

- Les matériaux irradiés sont potentiellement activés (matériels de mesure, fantômes, objets-test, patients ...)
- Mesures
 - Collaboration avec l'équipe de P. Barbey et G. Pigrée (IMOGERE – UNICAEN)
 - Les premières mesures faites (20/06/2018) montrent :
 - A 30 cm @ 150 MeV, 100 UM, 14 cm de plaques RW3 → 2,5 $\mu\text{Sv/h}$
 - Au contact @ 650 UM, SOBP, 6x6x6 cm³ → 80 à 100 $\mu\text{Sv/h}$
 - Décroissance lente

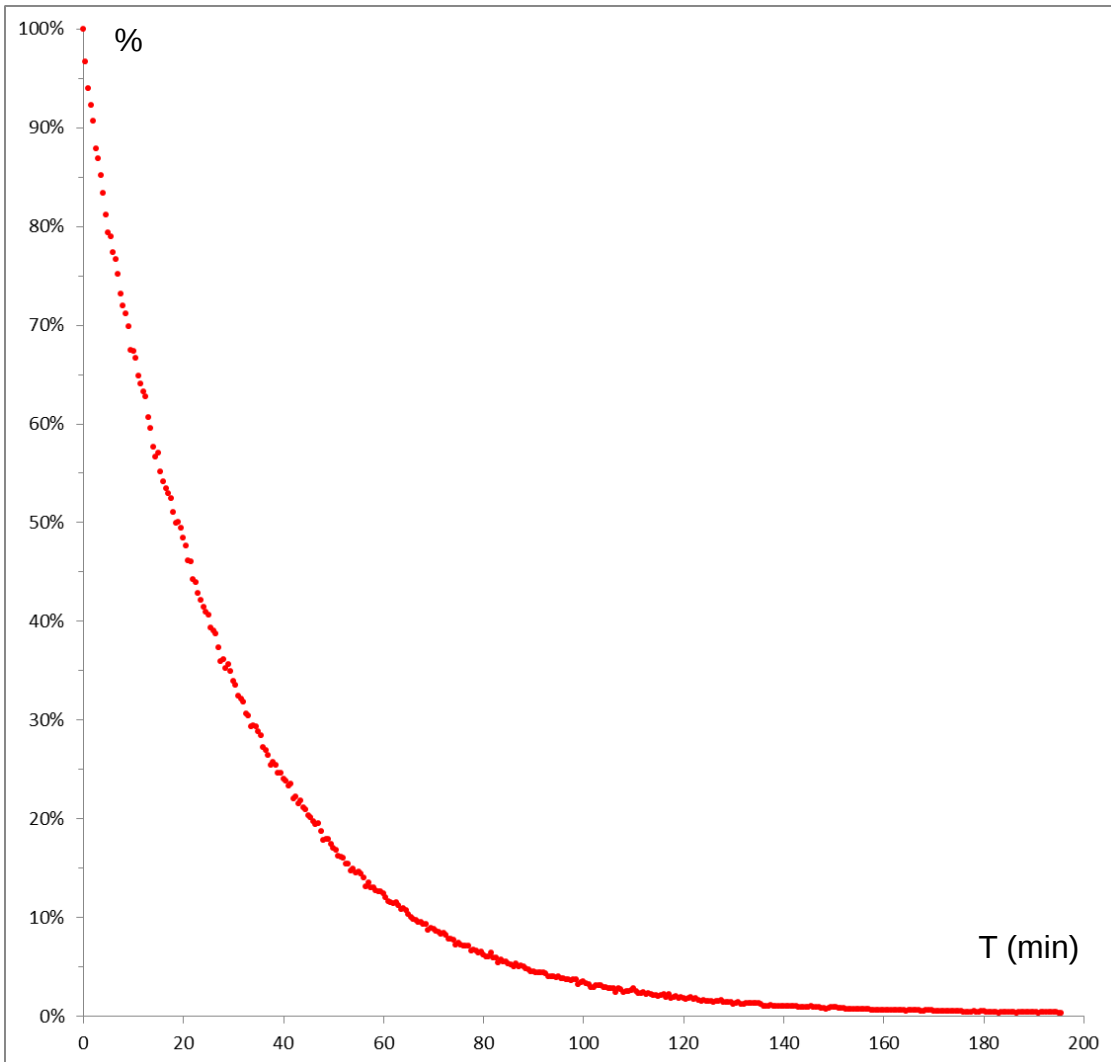


Spectrométrie (CZT)

Acquisition durant 180s avec CdZnTe Microspectrometer μ SPEC 500 de chez RITEC ; volume sensible dirigé vers le haut. Le gain est réglé pour couvrir la plage d'énergie 10 - 3000 keV. Mesure débutée env. 1 min après l'arrêt du faisceau.



Activation des matériaux



Evolution de l'activation de plaques de RW3 après une procédure d'irradiation pour un CQ

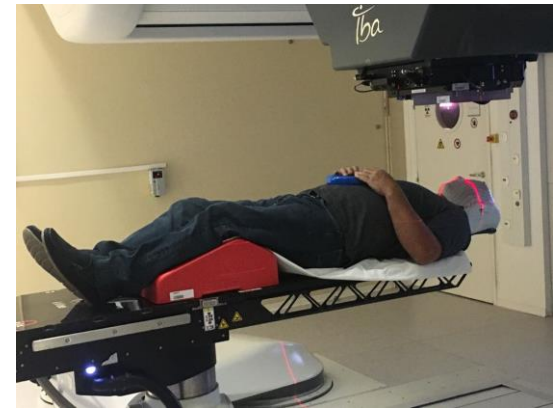
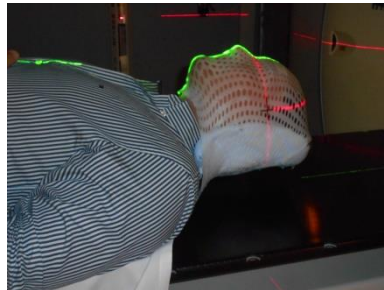
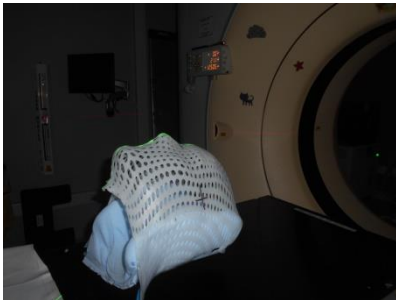
100% = 134 $\mu\text{Sv/h}$

Mesure : B20 au contact
Intégration 30s par point

T $\approx$ 22 min

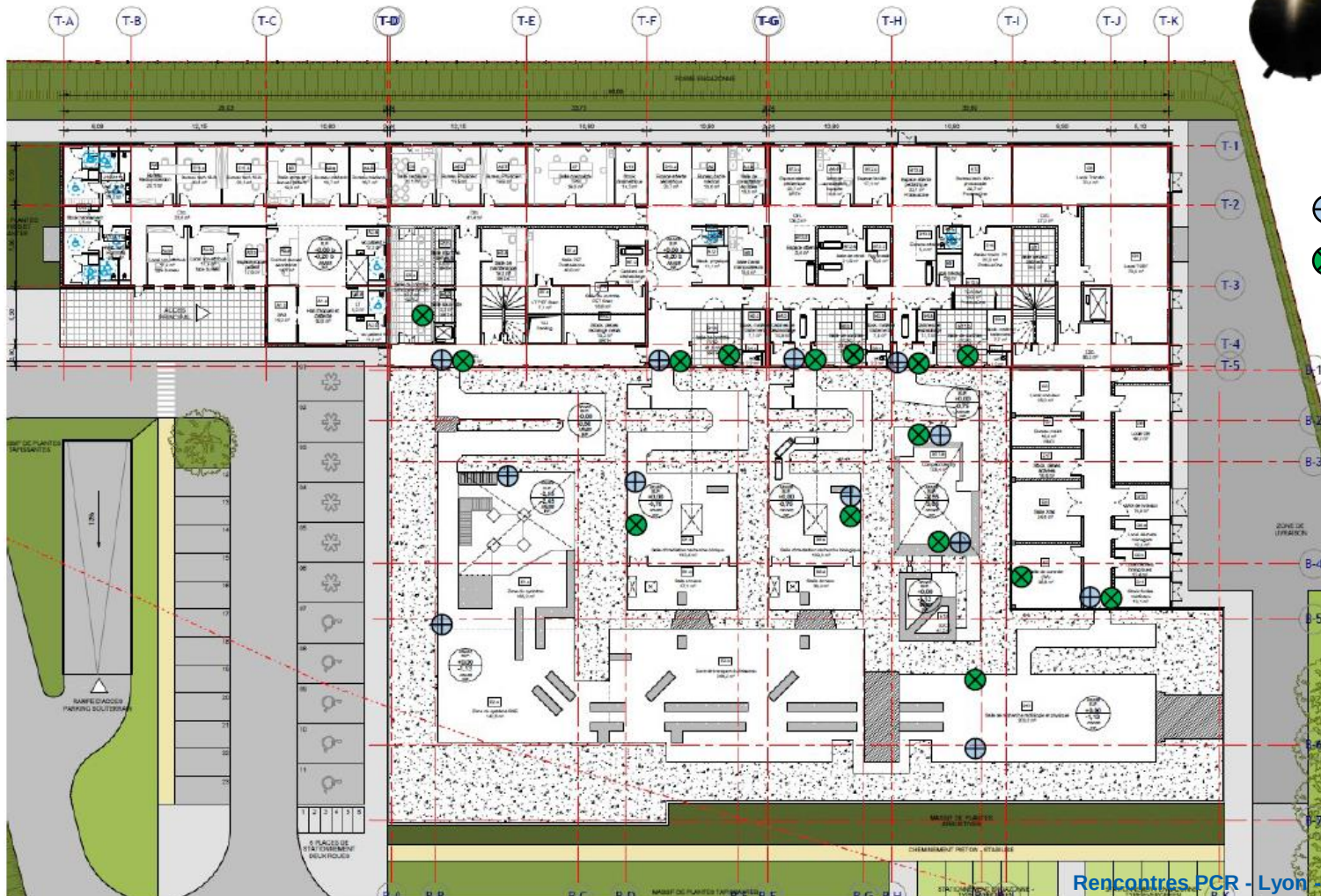
Activation des matériaux

- Masques thermoformés de contention des patients
 - Le même type de mesures a été réalisé pour les masques de contention thermoformés → 0,25 $\mu\text{Sv/h}$ max
 - Pas de précautions particulières



- Mesures à compléter
 - Influence du Range shifter
 - Suivi des doses individuelles (RAS à ce jour)
 - Bagues, pour la dose aux extrémités (Physiciens, manips)

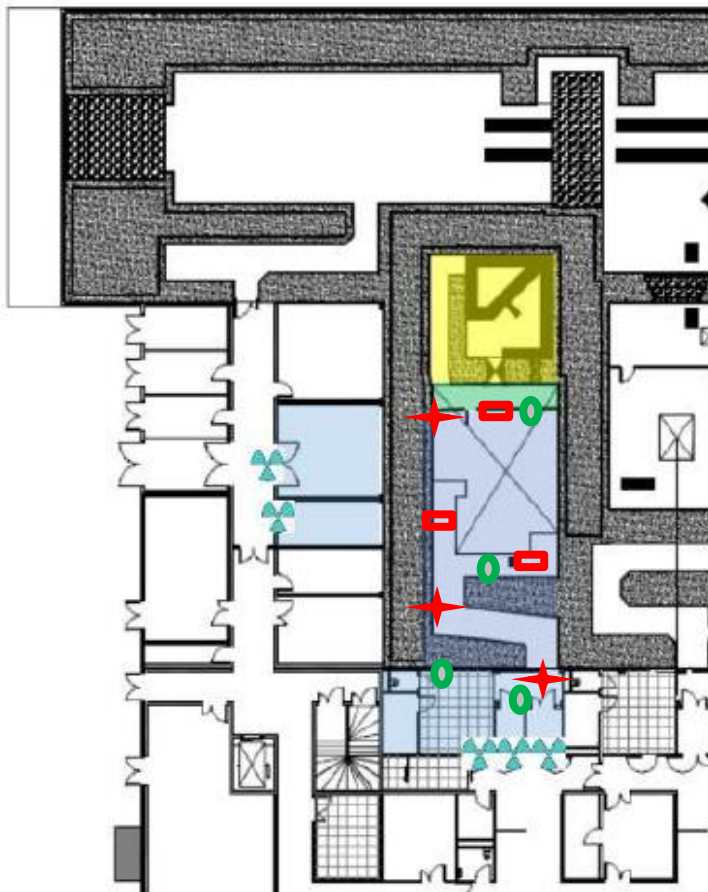
Balises gammas / n



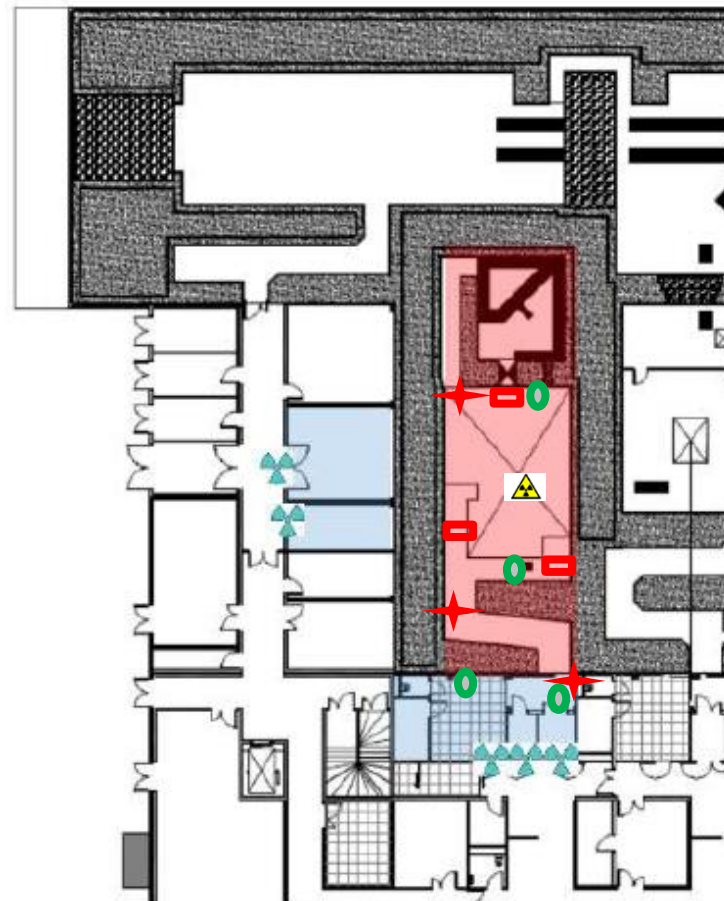
- ⊕ Balise Gammas
- ⊗ Balise Neutrons

Zonage Proteus One

ACCELERATEUR SOUS TENSION - PORTE OUVERTE



ACCELERATEUR SOUS TENSION - PORTE FERMÉE
IRRADIATION EN COURS



Marque: IBA
Modèle: PROTEUS ONE
Année: 2018

Zone Surveillée
Zone Contrôlée
Zone Contrôlée
Zone Interdite



Source de Rayonnement
Ionisant
Signalisation Lumineuse

Arret d'Urgence Accélérateur
Balise de Détection γ -n

Etude de poste prévisionnelle

- L'étude poste prévisionnelle montre
 - Que les niveaux de dose sont très inférieurs aux limites réglementaires
 - Légèrement supérieurs aux doses habituelles constatés au CFB en Radiothérapie
 - Très inférieurs aux doses reçues par les personnels d'autres services (MN)
 - Une modification du classement du personnel (B) n'est pas nécessaire
- Cette étude doit être confirmée
 - Par des mesures en conditions réelles (montée en charge)
 - Par la dosimétrie individuelle (Dosimètres passifs et opérationnels, γ et n)
 - Dosimétrie des extrémités (bagues)

Co-activité

- Une des particularités en protonthérapie par rapport à la radiothérapie photonique, c'est la présence d'un cyclotron ou d'un synchrocyclotron
 - Personnel technique du fournisseur (IBA), dédié, permanent, pour
 - "L'autorisation faisceau"
 - Les contrôles techniques quotidiens à l'allumage de la machine
 - Les maintenances en dehors des plages de traitement
 - Les pannes
 - Présence à la fois rassurante mais limitative dans l'utilisation de la machine en dehors des termes du contrat (CQ, développements, rattrapage de séances, recherche, etc. ...)
 - Nécessité d'une bonne coordination de la radioprotection
 - Quelles sont les responsabilités des différents employeurs et donc quel est le périmètre d'activité des différentes PCR
 - Gestion du personnel (formations, dosimétrie, suivi médicale, EDP etc. ...)
 - Gestion des pièces activées
 - Gestion des personnels extérieurs
 - Procédures de sécurité coordonnées entre les différents intervenants
 - Risque d'enfermement → Procédure de ronde

Autres risques

- Proximité d'un milieu « plus industriel »
 - Contamination (fluides de refroidissement)
 - Risque lié aux interférences électromagnétiques (matériel, patient, personnel)
 - Risque de collision, connu avec les linacs mais exacerbé avec une gantry de 80 t
 - Perte de servitudes (hélium, hydrogène, azote, air comprimé, ...)
 - Equipement sous pression

Document IBA

10.2. Risques non nucléaires d'origine interne.....	44
10.2.1. Risque d'incendie.....	44
10.2.1.1. Origine du risque.....	44
10.2.1.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	44
10.2.2. Risques liés à la manutention.....	45
10.2.2.1. Origine du risque.....	45
10.2.2.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	46
10.2.3. Risque d'explosion.....	46
10.2.4. Risque lié aux équipements sous pression (ESP).....	47
10.2.4.1. Origine du risque.....	47
10.2.4.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	47
10.2.5. Risque d'inondation interne.....	47
10.2.5.1. Origine du risque.....	47
10.2.5.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	48
10.2.6. Risques liés aux pertes d'utilités, fluides et énergies.....	48
10.2.6.1. Perte de la fourniture en énergie électrique.....	48
10.2.6.1.1. Origine du risque.....	48

10.2.6.1.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	48
10.2.6.2. Perte de la fourniture en eau de refroidissement.....	49
10.2.6.2.1. Origine du risque.....	49
10.2.6.2.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	49
10.2.6.3. Perte de la fourniture en air comprimé.....	50
10.2.6.4. Perte de la fourniture en hélium.....	50
10.2.6.5. Perte de la fourniture en hydrogène.....	51
10.2.6.6. Perte de la fourniture en azote.....	51
10.2.7. Risques liés à la perte du contrôle-commande.....	51
10.2.7.1. Origine du risque.....	51
10.2.7.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	51
10.2.8. Risques liés aux interférences électromagnétiques (Compatibilité ElectroMagnétique).....	52
10.2.8.1. Origine du risque.....	52
10.2.8.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	52
10.2.9. Risques liés aux Facteurs Organisationnels et Humains (FOH).....	52
10.2.9.1. Origine du risque.....	52
10.2.9.2. Dispositions de maîtrise du risque.....	52
10.3. Risques non nucléaires d'origine externe.....	53
10.3.1. Risque lié au séisme.....	53
10.3.3. Risque lié à la foudre.....	53
10.3.4. Risque d'intrusion.....	53

Conclusion

- L'activité de protonthérapie :
 - N'est pas une activité critique en termes de radioprotection (en fonctionnement normal) même si certaines spécificités doivent être prises en compte (présence de neutrons, potentielle activation des matériaux irradiés, risque d'enfermement ...)
 - Comporte de nombreux autres risques pour le personnel et pour les patients : Une analyse des risques a priori, la plus complète possible, est très utile pour anticiper les barrières à mettre en place, établir les protocoles, les procédures, les modes opératoires et adapter les formations (Démarche Qualité en amont du projet demandée par l'ASN)