

**Quelle est l'activité du TRM en protonthérapie ?  
Observation et analyse de la pratique au Centre de Proton  
Thérapie de l'Institut Paul Scherrer à Villigen**

**Travail de Bachelor**

**SCHMIDT KIM**

Matricule n° 10643427

**STÜCKELBERGER MICHEL**

Matricule n° 11588654

Directeurs:           BARADA Marin – TRM et chargé de cours à la HEDS Genève  
SEFERDJELI Laurence – Responsable de recherche HESGE

Membre du Jury:   NOUVEAU Olivier – TRM et praticien formateur en radio-oncologie  
aux Hôpitaux Universitaires de Genève

**Genève, septembre 2014**

## **AVERTISSEMENT**

La rédaction et les conclusions de ce travail n'engagent que la responsabilité des auteurs et en aucun cas celle de la Haute Ecole de Santé de Genève, du jury ou du Directeur du Travail de Bachelor.

Nous attestons avoir réalisé seuls le présent travail, sans avoir utilisé d'autres sources que celles indiquées dans la liste des références bibliographiques.

Genève, le 20 août 2014

Kim Schmidt & Michel Stückelberger

## REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Monsieur le Professeur WEBER, Médecin Chef et Directeur Médical du Centre de Proton Thérapie de Villigen, de nous avoir accueillis dans son service pour réaliser ce travail de recherche. Merci également aux techniciens en radiologie médicale, pour leurs conseils avisés, leur esprit de synthèse ainsi que pour leur disponibilité. D'une manière plus générale, merci à l'ensemble des employés du Centre de Proton Thérapie, pour leur accueil, leur bonne humeur et leur savoir-faire.

Notre profonde reconnaissance s'adresse également à notre directeur, Monsieur BARADA Marin, chargé de cours à la Haute Ecole de Santé de Genève, qui a su tout au long de nos recherches, nous guider avec finesse, à grand renfort de remarques constructives et de stimulations renouvelées.

Nous souhaitons ensuite exprimer notre profonde gratitude à Madame SEFERDJELI Laurence, référente de notre Travail de Bachelor, pour les cours qu'elle nous a dispensés, son encadrement ainsi que ses précieuses recommandations méthodologiques.

Merci à nos conjoints et à nos fidèles amis. Leur soutien et leur présence nous ont permis de surmonter les périodes d'incertitude et de doute. Une part importante de ce travail n'aurait certainement jamais vu le jour sans eux et sans leurs encouragements répétés.

Merci à Vincent de nous avoir donné les moyens de livrer le meilleur de nous-même en nous entraînant toujours « plus loin » sur le chemin du questionnement. Merci à Marc et à Gaby pour leurs talents de correcteurs, pour le temps qu'ils nous ont consacré, pour les très nombreux commentaires qui nous ont permis de tendre vers une pertinence rédactionnelle

Un grand merci également à tous ceux que nous aurions pu oublier. Chacun d'entre vous a, parfois même sans le savoir, nourri ce travail de Bachelor, qui par une réflexion pertinente, qui par une suggestion éclairée ou qui encore par un propos flatteur.

## RESUME

**BUT :** La présente étude cherche à connaître l'activité des techniciens en radiologie médicale en protonthérapie et à mettre en lumière ses différences par rapport à la radiothérapie conventionnelle. La radiothérapie représente un domaine d'activité important pour le TRM. Son rôle et ses responsabilités ont considérablement évolué au cours de ces dix dernières années. Exerçant un métier en constante mutation, le technicien devra, à l'avenir, s'adapter continuellement à la course aux radiothérapies innovantes, galvanisées par une croissance effrénée des avancées technologiques. La protonthérapie est la forme la plus sophistiquée de la radiothérapie. A ce titre, elle constitue une arme aboutie et précise pour traiter certains cancers. Cette technique de pointe demeure néanmoins peu répandue puisque, en Suisse, seul un centre en est équipé, à savoir Le Centre de Proton Thérapie de l'Institut Paul Scherrer.

**METHODOLOGIE :** Pour décrire l'activité du TRM en protonthérapie et dresser un portrait comparatif par rapport à la radiothérapie photonique, plusieurs méthodes qualitatives de recueil de données ont été retenues. L'observation directe et les entretiens semi-directifs ont été jugés probants. Les entretiens, en particulier, permettent, par l'interrogation du sujet, de se centrer sur son discours. L'observation directe, elle, en plus d'être conduite sur le terrain où se déroulent les activités étudiées, autorise un accès instantané aux actions telles qu'effectivement réalisées ainsi qu'aux gestes professionnels tels que concrètement effectués.

**RESULTATS :** Au vu des éléments recueillis et analysés, l'activité du TRM en protonthérapie semble être relativement identique à celle pratiquée en radiothérapie traditionnelle. Ceci dit, par l'intermédiaire de nos questionnements, de nos entretiens et de nos observations, il a tout de même été possible d'établir un inventaire composé d'une multitude de détails et de nuances rendant compte des spécificités et des particularités de cette activité.

**CONCLUSION :** Actuellement, les thérapies modernes traitant le cancer englobent plusieurs méthodes de traitement, dont la plus répandue est la chirurgie suivie de l'irradiation. Hors l'aspect purement physique, il s'est révélé particulièrement instructif et opportun de documenter ce domaine ultraspécialisé de l'irradiation des tumeurs, dans la mesure où aucune étude n'avait, jusqu'à ce jour, étudié la place centrale occupée par le TRM au sein de ce processus thérapeutique.

**MOTS CLES :** TRM, activité, protonthérapie, radiothérapie, cancer, tumeur, CPT, PSI



# SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>3</b>
<b>RESUME</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>9</b>
PROBLEMATIQUE	10
PERTINENCE PROFESSIONNELLE	12
<b>CADRE THEORIQUE</b>	<b>14</b>
Activité : le TRM dans son environnement	14
<i>Le radiodiagnostic</i>	16
<i>La médecine nucléaire</i>	16
<i>La radiothérapie</i>	16
<i>Travaux administratifs</i>	17
Activité spécifique du TRM en radiothérapie	18
<i>Relationnel - prise en charge du patient</i>	18
<i>Simulation virtuelle</i>	19
<i>Planification dosimétrique</i>	20
<i>Traitement</i>	22
L'Institut Paul Scherrer - PSI	23
<i>Le Centre de Proton Thérapie</i>	23
Utilisation de la protonthérapie à l'Institut Paul Scherrer	24
<i>Généralités</i>	24
<i>Prise en charge pécuniaire</i>	24
<i>Utilisation des protons</i>	25
<i>Accélérateur de protons au PSI</i>	29
<i>Applications et indications cliniques de la protonthérapie</i>	31

<b>METHODOLOGIE DE RECHERCHE</b>	<b>33</b>
Méthodes de récolte des données	33
<i>L'entretien semi-directif</i>	34
<i>L'observation non-participante</i>	34
Population cible	35
Prise de contact, enjeux éthiques, difficultés rencontrées et biais	35
<i>Prise de contact</i>	35
<i>Enjeux éthiques</i>	36
<i>Difficultés rencontrées</i>	37
<i>Biais</i>	37
Déroulement des entretiens et des observations	38
<i>Entretiens</i>	38
<i>Observations</i>	39
<b>TECHNIQUE ONCOLOGIQUE</b>	<b>41</b>
Généralités concernant la protonthérapie	41
<i>Historique</i>	41
<i>Répartition des centres de protonthérapie</i>	43
Eléments physiques concernant la technique oncologique	44
<i>Généralités concernant les radiations ionisantes</i>	44
<i>Interactions photons-matière</i>	46
<i>Le proton</i>	49
<i>Interactions protons-matière</i>	49
<i>L'intérêt du pic de Bragg en protonthérapie</i>	52
Composants d'un accélérateur de protons – PSI	54
<i>Extraction des protons</i>	55
<i>Cyclotron (Accélérateur de protons)</i>	55
<i>Beam Line (transport du faisceau de protons)</i>	56
<i>Gantry</i>	56
Techniques d'irradiation	57
<i>Passive Scattering (dispersion passive)</i>	57
<i>Scanned Beam</i>	59

<b>PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS</b>	<b>61</b>
Analyse des données recueillies	61
<i>Passage en revue de la littérature</i>	61
<i>Entretiens</i>	62
<i>Observation</i>	76
Activité du TRM en protonthérapie	77
<i>Capacités techniques</i>	78
<i>Préparation du traitement</i>	80
<i>Traitement</i>	81
<b>ACTIVITE DU TRM EN PROTONTHERAPIE VERSUS ACTIVITE DU TRM EN RADIOTHERAPIE</b>	<b>85</b>
Pratique du technicien en radiologie médicale	85
<i>Durée des actes</i>	86
<i>Précision accrue</i>	86
<i>Technique oncologique</i>	87
<i>Sollicitation des praticiens</i>	87
<i>Collaboration interprofessionnelle</i>	88
Patient	88
<i>Pathologie</i>	88
<i>Pédiatrie</i>	89
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>90</b>
Principaux résultats de la recherche	90
Retour sur les questions amorcées dans l'introduction	91
Positionnement personnel	92
<b>REFLEXIONS SUR LES PERSPECTIVES FUTURES</b>	<b>94</b>
Au niveau helvétique	94
<i>Centre en développement dans la région de Galgenen</i>	94
<i>Centre en Suisse romande</i>	95
<i>Gantry 3</i>	95
<i>Technique Gating</i>	96
Pistes d'action	97

<i>Gating respiratoire</i>	97
<i>Nouvelles indications</i>	97
<i>Evolution de la protonthérapie en Suisse</i>	97
<i>Utilisation de l'IRM en complément du CT pour la simulation</i>	98
<i>Activité du TRM en protonthérapie</i>	98

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES** **99**

---

Ouvrages	99
Articles	99
Sites internet	100
PDF en version électronique	101
Multimédias	102
Dictionnaire	102
Brochure	102
Communiqué de presse	103
Divers	103

## **ANNEXES** **104**

---

I - Radiosensibilité organique	104
II - Législations	105
III - Indications en radiothérapie vs protonthérapie	106
IV - Représentation du CPT du PSI	107
V - Guide d'entretien exploratoire	108
VI - Guide d'entretien semi-directif destiné aux TRM	112
VII - Statistiques de la PTCOG	116
VIII - Guide d'observation complété	118
IX - Echancier du travail de recherche	134

## INTRODUCTION

« La protonthérapie : avenir de la radiothérapie ? ». C'est sous ce titre qu'est publié en décembre 2010 un article dans le journal *Cancer/Radiothérapie*<sup>1</sup>. Les auteurs mettent en avant le fait que la protonthérapie s'est imposée comme la référence thérapeutique dans certaines tumeurs de l'adulte et décrivent l'importance de son essor dans le domaine des tumeurs pédiatriques. Ceci est en partie lié aux caractéristiques physiques des protons qui confèrent à cette technique sa supériorité balistique: trajectoire rectiligne avec faible dispersion latérale, pouvoir d'arrêt élevé, croissance de la densité des ionisations au long de la trajectoire dessinant le pic de Bragg<sup>2</sup>. Cette technique ne convient que pour certaines tumeurs. Néanmoins « d'adapter très précisément la dose de radiation à la forme de la tumeur, le plus souvent irrégulière, et de préserver nettement mieux le tissu sain qu'avec les techniques traditionnelles les plus modernes de radiothérapie. »<sup>3</sup>. En d'autres termes, il est possible, tout en détruisant de manière ciblée les tumeurs, de préserver quasi-intégralement les tissus sains environnants. « Actuellement la radiothérapie est impliquée dans le traitement d'environ 60% des patients atteints de cancer.<sup>4</sup> » Selon les chiffres datant de septembre 2011, 96'000 patients auraient déjà été traités par protons dans le monde et presque 10 % d'entre eux à l'Institut Paul Scherrer<sup>5</sup>. Ces constats permettent de mieux saisir l'immense intérêt que présente cette méthode de traitement des maladies cancéreuses lorsque les chiffres prédisent « qu'en Europe, une personne sur trois souffrira probablement d'un cancer au cours de son existence. »<sup>6</sup>.

---

<sup>1</sup> Bouyon-Monteau, A., Habrand, J.-L., Datchary, J., Alapetite, C., Bolle, S., Dendale, R., et al. *La protonthérapie : avenir de la radiothérapie ? Première partie : aspects cliniques*. *Cancer / Radiothérapie* [En ligne]. 2010 [consulté le 8 juin 2013]. Volume 14 – No 8 : p. 727-738. Disponible: <http://www.em-consulte.com/article/273737/article/la-protontherapie-avenir-de-la-radiotherapie-premi>

<sup>2</sup> Ces notions seront explicitées dans le chapitre *CADRE THEORIQUE* à la section *Utilisation de la protonthérapie à l'Institut Paul Scherrer*.

<sup>3</sup> Institut Paul Scherrer. *La Protonthérapie au PSI*. [En ligne]. [Consulté le 10 janvier 2014]. Disponible: <http://www.psi.ch/protontherapy/protontherapie>

<sup>4</sup> Mazon, J.-J., Maugis, A., Barret, C., Mornex, F. *Techniques d'irradiations des cancers*. Maloine 2011, p. 14

<sup>5</sup> JERMANN, M., & BAROKE, D. / PSI. *La protonthérapie à l'Institut Paul Scherrer*. [Brochure]. Villigen : Institut Paul Scherrer; septembre 2011. Le PSI est un laboratoire de recherche multidisciplinaire, situé en Suisse. Il regroupe de nombreux départements et domaines de recherche dont le CPT. Depuis 1984, un accélérateur de protons permet de traiter des patients, atteints de cancer au moyen d'un faisceau de protons.

<sup>6</sup> Ibid.

## PROBLEMATIQUE

Comme nous le rappelle Bécclère « Les rayons sont comme la lance d'Achille ; ils blessent et ils guérissent. » d'où l'importance pour le technicien en radiologie médicale<sup>7</sup> de manier avec précision et sûreté ces outils dangereux.

Notre réflexion initiale se fonde sur le constat que le TRM exerce un métier en constante mutation, ce qui est particulièrement vrai dans le domaine des traitements des tumeurs par radiations ionisantes. Une discipline où la frontière technologique est sans cesse repoussée ; conformation, modulation d'intensité, CyberKnife, tomothérapie, stéréotaxie.

Si la radiothérapie conventionnelle représente un des champs d'activité importants du TRM, la thérapie par proton, qui en est sa forme la plus sophistiquée, fait également partie, bien que de manière beaucoup plus marginale en Suisse, de son champ d'activité professionnel.

Ces 10 dernières années, en radiothérapie conventionnelle, le rôle, les tâches, les responsabilités et l'activité du TRM, au sens large du terme, ont énormément évolués. Pourtant, ceux-ci, sont non seulement parfaitement balisés dans la pratique professionnelle courante mais également rigoureusement codifiés aux travers de la préparation et de la réalisation des protocoles du plan de traitement.

Mais au Centre de Proton Thérapie<sup>8</sup> au PSI à Villigen, qu'en est-il ? Quelles sont les étapes par lesquelles chemine le TRM pour aboutir à la réalisation du plan de traitement ? Quel est le cahier des charges d'un TRM<sup>9</sup> ? En quoi les activités de préparation d'un traitement, du processus dosimétrique ou du traitement à proprement parler diffèrent-elles de celles réalisées en radiothérapie conventionnelle ? Quelle tumeur pourrait présenter l'avantage de servir de comparatif à ce qui se fait actuellement en radiothérapie traditionnelle ? Quels sont les moyens qui permettent d'adapter très précisément la dose de radiation à la forme de la tumeur ?

Autant de questions qui viennent nourrir l'interrogation cardinale de notre travail : et si l'innovation thérapeutique en oncologie, ce qui paraissait impossible hier, devient

---

<sup>7</sup> Dorénavant l'abréviation TRM sera utilisée pour désigner le technicien en radiologie médicale indépendamment qu'il s'agisse d'un homme ou d'une femme.

<sup>8</sup> Dorénavant l'abréviation CPT sera utilisée pour désigner le Centre de Proton Thérapie.

<sup>9</sup> Dorénavant l'abréviation PSI sera utilisée pour désigner l'Institut Paul Scherrer.

maintenant possible, devrait demain aussi bien profiter aux patients traités que constituer un nouvel environnement professionnel pour le TRM ? Autrement dit, et si ce qui paraissait, il y a quelques années encore impossible, pourrait demain, grâce aux constants progrès de la technique oncologique, se généraliser et impacter sur la pratique professionnelle des futurs TRM ?

La confrontation de deux protocoles au travers d'un cas clinique, l'un élaboré en radiothérapie et l'autre réalisé en protonthérapie nous semble être la méthode la plus appropriée pour décrire l'activité du TRM et documenter notre question de recherche. Un phénomène d'étude qui semble aujourd'hui marginal, puisque seulement 9 TRM travaillent au PSI, mais dont le potentiel technologique futur, est suffisamment extraordinaire pour qu'on s'y intéresse de près.

Pour corroborer notre enthousiasme à réfléchir à ce domaine de niche en lien avec notre profession, Yves Jongen, un des pères de la protonthérapie, fait partie des trois nominés pour le Prix de l'inventeur européen 2014<sup>10</sup>. Enfin, après une année à éplucher la littérature, aucun écrit en langue française n'a jamais été consacré à la thématique et au questionnement concernant l'activité du TRM en protonthérapie.

Notre travail s'est attaché à montrer quelques éclairages sur certains aspects de l'activité du TRM en protonthérapie. En d'autres termes, il n'a jamais été question de rendre compte de manière exhaustive de toutes ces activités et de donner un aspect définitif à la question. Toutefois, nous nous sommes efforcés d'en dresser un aperçu le plus complet possible et de poser quelques éléments de réflexion.

---

<sup>10</sup> BATTISTELLI, B. / Office européen des brevets. *Ensemble de la carrière : Yves Jongen*. [En ligne]. 2013 [consulté le 22 janvier 2014]. Disponible: [http://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2013\\_fr.html](http://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2013_fr.html)

## *PERTINENCE PROFESSIONNELLE*

L'idée de réaliser un travail de recherche sur la protonthérapie s'est, rapidement, au cours de notre formation, imposée comme une évidence. Tous deux fascinés par « ces rayons qui guérissent », nous avons vécu nos deux stages respectifs, dans le domaine de la radiothérapie, comme une révélation ! Notre motivation personnelle à traiter ce sujet réside principalement dans la contribution qu'il amène à enrichir les connaissances de la profession sur un pan méconnu et ultra spécialisé de la radiothérapie.

Les rayons sont capables, en détruisant les cellules cancéreuses, de sauver tous les jours des milliers de malades. L'utilité de poursuivre et la nécessité d'accentuer la lutte contre le cancer représentent un véritable défi sanitaire s'inscrivant dans une réflexion et une action de longue haleine. A ce sujet, l'Organisation Mondiale de la Santé<sup>11</sup> communique des statistiques de 2013 qui font état de 14,1 millions de nouveaux cas recensés en 2012 dans le monde.

Selon une estimation réalisée par GLOBOCAN 2012 et publiée par l'OMS en février 2014<sup>12</sup>, « le nombre de cas de cancer par an devrait augmenter de 14 millions en 2012 à 22 millions au cours des deux prochaines décennies ».

C'est sur ces chiffres et ces différents constats que le TRM devra, à l'avenir, composer avec d'importantes avancées dans les traitements radiothérapeutiques en s'adaptant à une technologie de plus en plus pointue. D'autant plus qu'il faut s'attendre, dans le futur, à ce que une personne sur trois soit atteinte, dans sa vie, par un cancer<sup>13</sup>. Actuellement l'efficacité de cette thérapie, dans le traitement de certaines tumeurs fréquentes, (cancer de la prostate, du poumon, de l'œsophage, gliome, etc.) n'est plus à démontrer.

---

<sup>11</sup> Organisation Mondiale de la Santé / Centre International de Recherche sur le Cancer. *Dernières statistiques mondiales sur le cancer*. [En ligne]. 2013 [consulté le 9 mars 2014]. Disponible: [http://www.iarc.fr/fr/mediacentre/pr/2013/pdfs/pr223\\_F.pdf](http://www.iarc.fr/fr/mediacentre/pr/2013/pdfs/pr223_F.pdf)

<sup>12</sup> Organisation Mondiale de la Santé / Centre des médias. *Cancer*. [En ligne]. 2014 [consulté le 9 mars 2014]. Disponible: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs297/fr/>

<sup>13</sup> Euronews. *L'espoir de la protonthérapie*. [Vidéo en ligne]. Louvain-la-Neuve ; 2014 [consulté le 13 mars 2014]. Disponible: <http://fr.euronews.com/2013/05/14/l-espoir-de-la-protontherapie/>



Une chaîne d'arguments qui n'occulte en rien le fait que le futur ne s'argumente pas et que seule la démonstration d'un avantage médical substantiel, au travers de la validation d'essais cliniques, permettra, ainsi que d'autres facteurs, l'expansion de la protonthérapie. Le TRM devra, à l'avenir, constamment s'adapter aux avancées technologiques grandissantes puisque dans un futur proche, de nouvelles méthodes d'irradiation des tumeurs pourraient faire leur apparition comme en témoignent les projets baptisés BioLEIR<sup>14</sup> et SAPHIR<sup>15</sup>.

Le but final étant de faire bénéficier le patient de ces nouvelles formes d'irradiation car comme l'explique le Professeur Weber, il n'y a pas de guérison du cancer sans contrôle locorégional de la structure cancéreuse.

Pour y parvenir, rappelons ici qu'une meilleure radiothérapie est définissable par un certain nombre de critères précis<sup>16</sup> :

- Une adaptation plus précise de la dose à la tumeur.
- Une dose de radiation plus élevée dans le volume cible.
- Une diminution de l'exposition des structures organiques saines aux rayons.
- Un meilleur pronostic grâce à des chances de guérison durable plus importantes.
- Des effets secondaires présentant un impact limité.
- Une meilleure qualité de vie.
- Des coûts de traitement raisonnables.

---

<sup>14</sup> HAMISH, J. / Institute of Physics. *CERN creates new office for medical research*. [En ligne]. 2014 [consulté le 28 février 2014]. Disponible: <http://blog.physicsworld.com/2014/02/25/cern-creates-new-office-for-medical-research/>

<sup>15</sup> France Info. *La protonthérapie en pleine évolution*. [Podcast audio]. Paris : 2012 [consulté le 28 février 2014]. Disponible: <http://www.franceinfo.fr/sciences-sante/info-sciences/la-protontherapie-en-pleine-evolution-538275-2012-02-24>

<sup>16</sup> JERMANN, M., & BAROKE, D. / PSI. *La protonthérapie à l'Institut Paul Scherrer*. [Brochure]. Villigen: Institut Paul Scherrer; septembre 2011

## CADRE THEORIQUE

Ce chapitre sera consacré à définir les différents éléments qui composent notre question de recherche. Rappelons ici que ladite interrogation de recherche de ce travail vise à déterminer et à mettre en lumière les activités effectuées par le TRM en protonthérapie.

Dans un premier temps, nous nous attarderons à définir ce que l'on entend par "activités" réalisées dans le domaine technique de la radiologie médicale et, en particulier, celles effectuées par le TRM en radiothérapie. Dans un deuxième temps, nous réaliserons un bref historique du PSI ainsi qu'un descriptif succinct du CPT qui permettra de mieux situer le cadre dans lequel a lieu le phénomène étudié ainsi que la récolte de données en rapport avec notre recherche.

Nous décrirons ensuite ce à quoi fait référence aujourd'hui la protonthérapie en définissant son utilisation à l'Institut Paul Scherrer. Ce que cette technique recouvre et en quoi elle se différencie de la radiothérapie classique.

Et enfin, dans un dernier temps, nous chercherons à montrer dans quelle mesure le traitement à partir de cette méthode est validé ou, à contrario, ne l'est pas pour certaines indications cliniques.

### *Activité : le TRM dans son environnement*

D'après Dadoy<sup>17</sup>, le concept d'activité désigne en sociologie du travail "l'ensemble des actes concrets, des gestes précis, des mouvements, des opérations mentales, des prises d'information, des raisonnements et des décisions qui constituent l'intervention d'un opérateur, d'un travailleur, dans une tâche, un poste de travail, une fonction, un emploi [...]".

---

<sup>17</sup> AKOUN, A., & ANSART, P. Directeurs. *Dictionnaire de sociologie*. Paris: Le Robert; 1999. Partenariat; p. 9

Autrement dit, sont considérées comme étant des activités toutes les actions et manœuvres intellectuelles et physiques qui sont exercées par un individu dans un environnement de travail.

L'activité du TRM consiste en grande partie en la réalisation et le post-traitement "d'images du corps humain au moyen de différentes méthodes, pour transmettre aux médecins les informations nécessaires à l'établissement d'un diagnostic<sup>18</sup>". Il agit sur mandat médical et peut également être amené à appliquer des actes thérapeutiques. Dans une perspective plus large, l'activité du TRM s'articule autour de deux aspects principaux. Comme le mettent en évidence Da Costa et Guney<sup>19</sup>, il "est à la fois un[e] technicien[ne] et un[e] soignant[e]". En d'autres termes, le TRM s'appuie dans sa profession sur ses compétences techniques et ses capacités relationnelles et humaines pour fournir au médecin des images médicales à visée diagnostique et/ou thérapeutique.

Selon la Haute Ecole de Santé, le technicien en radiologie médicale exerce, en plus des aspects médicotехniques propres à sa profession, trois activités principales :

1. Le TRM "documente et procure aux médecins les informations nécessaires pour établir un diagnostic (images, acquisitions de données anatomo-physiologiques diverses)<sup>20</sup>".
2. Le TRM réalise seul ou avec le médecin les "examens et les traitements en [...] radio-oncologie et en radiologie interventionnelle<sup>21</sup>".
3. Enfin, le TRM doit être capable de "s'adapter aux diverses situations (urgences, radioprotection, milieu stérile, pédiatrie, etc.) afin de réaliser les examens et les traitements dans les meilleures conditions possibles (délai parfois très court)<sup>22</sup>".

Les activités, détaillées ci-dessus, sont réalisées par le TRM et s'opèrent dans un environnement composé de trois domaines d'activités professionnels variés et précis.

---

<sup>18</sup> SDBB | CSFO - orientation.ch. *Technicien en radiologie médicale HES / Technicienne en radiologie médicale HES*. [En ligne]. Editeur : N° Swissdoc: 0.723.48.0; 2014 [mis à jour le 11 octobre 2013]. [Consulté le 12 mars 2014]. Disponible: <http://www.orientation.ch/dyn/1109.aspx?id=258>

<sup>19</sup> HEDS de Genève. Bachelor : *Technique en radiologie médicale*. [En ligne]. Genève ; 2014 [consulté le 10 mars 2014]. Disponible: [http://www.heds-ge.ch/portail/welcome.nsf/pages/technique en radiologie medicaleF](http://www.heds-ge.ch/portail/welcome.nsf/pages/technique%20en%20radiologie%20medicaleF)

<sup>20</sup> Ibid.

<sup>21</sup> Ibid.

<sup>22</sup> Ibid.

## Le radiodiagnostic

Le radiodiagnostic se définit comme un vaste champ d'interventions qui inclut « de nombreuses méthodes et appareils d'investigation [...] issus de technologies récentes pouvant associer et appliquer plusieurs découvertes en physique : rayons x (radiographie et Scanner CT), radiofréquences et magnétisme (IRM), ultrasons (échographie). Ils permettent de réaliser des images du corps humain de différentes manières : par transparence, dans différents plans, en temps réel et en dynamique. »<sup>23</sup>. En d'autres termes, on peut définir le radiodiagnostic comme une discipline incluant plusieurs modalités différentes, dont chacune d'entre elles utilise des propriétés physiques particulières, visant à établir un diagnostic précis.

La radiologie interventionnelle fait partie intégrante du radiodiagnostic dans le sens où toutes les procédures, qu'elles soient réalisées dans un objectif diagnostique ou thérapeutique, sont effectuées sous le contrôle d'une méthode d'imagerie.

## La médecine nucléaire

La médecine nucléaire se définit par l'utilisation des radio-isotopes dans une perspective de diagnostic ou de thérapie. Selon Brault<sup>24</sup>, il s'agit d'administrer au patient « des substances radioactives [...] en petite quantité [et qui] permettent de savoir comment fonctionne un organe et comment il se présente (notion de métabolisme<sup>25</sup>) ». L'auteur précise encore que des connaissances théoriques particulières sont nécessaires « en anatomie, physiopathologie et radiopharmacie » afin de réaliser des « examens de médecine nucléaire aussi bien fonctionnels que morphologiques ».

## La radiothérapie

Selon Dillenseger et Moerschel<sup>26</sup>, la radiothérapie est définie comme « une spécialité médicale utilisant les radiations ionisantes en tant qu'agent de traitement avec l'objectif de guérir ou de soulager les malades » atteints de maladie cancéreuse. Chaque traitement est

---

<sup>23</sup> Santé et changement démographique. *Les défis du vieillissement*. [En ligne]. [Consulté le 9 mars 2014].

Disponible: [http://www.chru-strasbourg.fr/Hus/HTML/cooperation/docs/HDC\\_rapport\\_final\\_cliquable.pdf](http://www.chru-strasbourg.fr/Hus/HTML/cooperation/docs/HDC_rapport_final_cliquable.pdf)

<sup>24</sup> BRAULT, D. *Contrôle de qualité en Médecine Nucléaire*. [Cours de formation du module 3108]. Genève : Haute Ecole de Santé; BSc 3, 2014.

<sup>25</sup> Le terme métabolisme désigne l'ensemble des réactions chimiques se produisant au sein de l'organisme.

<sup>26</sup> DILLENSEGER, J.-P., & MOERSCHEL, E. *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie*. Paris : Masson ; 2009. p. 247

individualisé en fonction de la spécificité de la tumeur et du profil présenté par le patient. Pour garantir des standards de qualité de traitement élevés, une étroite collaboration entre les différents acteurs médicaux est indispensable. En vue de l'application des traitements "soit à but palliatif, soit à but curatif"<sup>27</sup>, leurs mises au point doivent présenter une grande rigueur d'exécution. La nature du rayonnement peut être soit des particules (électrons et protons), soit des ondes électromagnétiques constituées de photons de hautes énergies (rayons X et rayon gamma)<sup>28</sup>.

## Travaux administratifs

Les travaux administratifs sont des activités transversales aux trois précédents champs professionnels. D'après le descriptif fait de la profession par le site internet hébergé par le canton de Genève<sup>29</sup>, il est possible de relever quatre principaux groupes d'activité administrative :

- Traiter les documents numériques obtenus, à l'aide d'outils informatiques et gérer leur archivage.
- Etablir des protocoles d'examens, présenter des statistiques de diagnostic et de traitement.
- Assumer le respect et l'application des mesures de protection du patient et des collaborateurs contre les radiations ionisantes.
- Entretien des appareils, commander du matériel.

Comme nous nous sommes efforcés de le démontrer tout au long de cette partie, le concept d'activité dans la radiologie médicale englobe des tâches, des actes, des gestes, des mouvements, en somme des actions et des manœuvres précises qui font appel à des connaissances et des compétences à la fois techniques et humaines.

---

<sup>27</sup> HEdS Genève. *Filière : Technique en radiologie médicale*. [En ligne]. Genève : HEdS ; 2014 [consulté le 10 mars 2014]. Disponible: [http://www.heds-ge.ch/portail/welcome.nsf/pages/technique\\_en\\_radiologie\\_medicaleF](http://www.heds-ge.ch/portail/welcome.nsf/pages/technique_en_radiologie_medicaleF)

<sup>28</sup> DILLENSEGER, J.-P., & MOERSCHEL, E. *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie*. Paris : Masson ; 2009. p. 247

<sup>29</sup> République et Canton de Genève. *Formation*. [En ligne]. Genève. [Consulté le 12 mars 2014]. Disponible: <http://ge.ch/formation/metier/technicien-en-radiologie-medicale-hes-technicienne-en-radiologie-medicale-hes>

Elles s'exercent dans trois domaines particuliers, le radiodiagnostic, la médecine nucléaire et la radiothérapie. Conjointement à chacun des domaines d'activité, on retrouve les travaux administratifs, pierre angulaire effectuant le lien entre le praticien, l'examen réalisé et l'administration .

### *Activité spécifique du TRM en radiothérapie*

L'activité qui sera décrite ci-dessous porte sur les observations que nous avons pu réaliser lors de nos formations pratiques respectives dans le cadre de notre cursus d'études. Ainsi les propos qui suivent sont basés d'une part sur les connaissances issues des aspects théoriques enseignés à la Haute Ecole de la Santé de Genève ainsi que les éléments qui ont pu être observés lors de la pratique acquise sur le terrain durant les formations pratiques qui ont pu être effectuées.

Le but est de décrire l'essentiel de l'activité du technicien en radiothérapie de façon à créer, un socle solide à partir duquel il nous a été possible d'élaborer, d'une part les guides d'entretiens et de l'autre, les grilles d'observations. Il sera ainsi possible de recueillir les données du terrain aussi bien en fonction de leur pertinence ainsi que de nos connaissances propres dans le domaine du traitement du cancer.

En clair, dans ce chapitre, nous nous consacrerons à décrire les activités du TRM en radiothérapie conventionnelle. Celle-ci permettra, en vue de l'analyse future, de dresser un comparatif entre la radiothérapie conventionnelle et la protonthérapie de manière à renseigner et documenter la question initiale du sujet de recherche. Dans ce contexte, l'activité du TRM en radiothérapie se divise en quatre principaux chapitres.

#### **Relationnel - prise en charge du patient**

La relation qui lie le patient et le praticien en radiothérapie est particulière, dans le sens que le TRM effectue un lien invisible entre le malade, l'appareil de traitement et le médecin radiothérapeute. En ayant ce rôle de passerelle, les responsabilités pesant sur les épaules du TRM n'en sont qu'amplifiées. En effet, il est de son devoir d'informer

convenablement le patient tout au long de son cursus de thérapie ainsi que d'être une oreille attentive aux craintes, aux désirs et aux états du malade.

Au cours du processus thérapeutique, comprenant la simulation virtuelle, la mise en place du plan de traitement ainsi que le traitement à proprement parler, le TRM se doit de conserver une saine relation de confiance avec le patient. Ceci dans le but de pouvoir mettre en place une collaboration améliorée mais également pour que le malade se sente suffisamment rassuré pour qu'il puisse communiquer activement avec l'équipe médico-technique.

Dans la relation liant le patient, le médecin radiothérapeute et la machine, le TRM officie tel un filtre dans le sens qu'il communique les éléments notables, que le patient lui a donnés au cours des séances (dires du patient, perception du TRM, gestuelle, suivi, compliance au traitement, etc.), au médecin radiothérapeute. Concernant l'appareillage, le technicien adapte le plan de traitement aux besoins du malade (simulation virtuelle, planification dosimétrique et traitement).

## **Simulation virtuelle**

La simulation virtuelle consiste en une série de manipulations, effectuées par le TRM, des aides et le médecin radiothérapeute lors de la mise en place du traitement. Ces manipulations ont pour finalité de mettre le patient dans une position reproductible, confortable et la plus adéquate possible pour une balistique de traitement adaptée. Cette opération fait partie d'une série d'éléments intrinsèquement liés à la bonne réalisation du traitement oncologique. En effet, la position étant ré-exécutée à chaque séance, elle doit être optimale mais également avoir une grande aptitude à la reproductibilité, dans le sens que si le patient n'est pas confortablement installé, il risque de bouger et/ou mal supporter ses séances de rayons. Le malade doit se sentir en toute confiance avec les praticiens qui l'entourent, dans le sens que sa collaboration active va le mener à communiquer avec les TRM sur son confort, ses besoins, ses craintes et ses désirs.

Au cours de la simulation virtuelle, le patient va être mis en place dans une position référencée par des contentions lui étant spécifiques et adaptées à la localisation du volume à irradier. Un grand nombre de ces fixateurs existent et ils sont, pour la plupart, adaptables à la morphologie du patient ainsi qu'à son confort. Certains d'entre eux (tels les masques thermoformables) présentent l'inconvénient que leur mise en place est souvent anxiogène pour le

malade. Ainsi la collaboration entre le patient et le TRM est primordiale dans la mise en place de la position du traitement.

Une fois en place, des repères cutanés sont placés et une image tomodensitométrique est réalisée. Pour ce faire, le patient doit être capable de rester absolument immobile, le cas échéant, l'équipe médicale doit trouver une solution, telle le repositionnement. Cette étape peut être, dans certains cas, couplée à une imagerie morphologique. Une fois l'image radiologique effectuée, le médecin radiothérapeute va mettre en évidence les GTV<sup>30</sup> et PTV<sup>31</sup> sur les coupes tomodensitométriques, ainsi que les organes à risques<sup>32</sup>. Ceci dans le but de déterminer une balistique prévisionnelle ainsi que l'isocentre de la tumeur. Ce dernier va ensuite être modélisé, ceci à l'aide de lasers mobiles (latéraux, supérieurs et antérieurs), sur le corps du patient.

## Planification dosimétrique

La planification dosimétrique est une étape charnière dans la mise en place du traitement utilisant des radiations ionisantes. En effet, au cours de ce processus sont acquis les données balistiques permettant à l'équipe médico-technique de mettre en place le traitement le plus adéquat, ceci en tenant compte des spécificités morphologiques du patient ainsi qu'aux contraintes techniques. Il existe plusieurs techniques dosimétriques, les plus utilisées<sup>33</sup> sont la 3D-CRT<sup>34</sup>, l'IMRT<sup>35</sup> et le VMAT<sup>36</sup>.

La mise en place de la balistique de traitement est possible grâce à des systèmes de planification de traitement appelés TPS. Ce logiciel informatique utilise comme base les

---

<sup>30</sup> Acronyme anglais signifiant Gross Tumor Volume : ce volume inclut « l'ensemble des lésions mesurables, palpables ou visibles avec les moyens actuels d'imagerie. Il correspond à ce qu'on appelait « la tumeur » en première approche, révélant une concentration élevée de cellules tumorales dans les tissus. ». Source : Mazon, J.-J., Maugis, A., Barret, C., Mornex, F. *Techniques d'irradiations des cancers*. Paris: Maloine 2011, p. 54

<sup>31</sup> Acronyme anglais signifiant Planning Tumor Volume : c'est le « volume cible prévisionnel, volume le plus large, tenant compte de toutes les incertitudes, et sur lequel s'effectue l'étude dosimétrique permettant de définir le plan de traitement. ». Source : Mazon J.-J., Maugis A., Barret C., Mornex F. *Loc. Cit.*, p. 420

<sup>32</sup> Les organes à risques sont des volumes qui présentent une radiosensibilité propre, voir annexe I.

<sup>33</sup> BARADA, M. *Simulation virtuelle, notions de base*. [Cours de formation du module 3107]. Genève : Haute Ecole de Santé; BSc 3, 2014.

<sup>34</sup> Acronyme anglais signifiant Three-Dimensional Conformal Radiation Therapy. Traduit en français, ce terme correspond à une Radiothérapie Conformationnelle Tridimensionnelle.

<sup>35</sup> Acronyme anglais signifiant Intensity-Modulated Radiation Therapy. Traduit en français, ce terme correspond à une Radiothérapie par Modulation d'Intensité.

<sup>36</sup> Acronyme anglais signifiant Volumetric Modulated Arc Therapy. Traduit en français ce terme correspond à une irradiation avec Modulation d'intensité Volumétrique par Arc Thérapie.



images tomodensitométriques, fusionnées ou non, acquises lors de la simulation virtuelle. Cette étape est jalonnée par un certain nombre de processus distincts, tout d'abord la délinéation, puis le choix des valeurs seuils concernant la dose à appliquer ou non aux volumes concernés, la balistique générale, le calcul informatique, le calcul de la dose reçue par les différents structures/organes et pour terminer, l'acceptation du dossier technique ainsi que les contrôles qualités de la conformité du plan de traitement.

### ***La délinéation***

Selon le CNRTL<sup>37</sup> la délinéation est l'action de « représenter un objet sous toutes ses formes et avec la précision qu'il requiert ». Les structures à mettre en évidence sont le(s) PTV(s), qui correspond(ent) au volume tumoral total à irradier, ainsi que les organes à risques, qui sont les volumes sains qu'il est nécessaire d'épargner. Ces volumes sont spécifiques à la localisation du volume tumoral.

### ***Valeurs seuils***

Les techniques d'irradiations avancées, telles l'IMRT et le VMAT, ont la particularité, dans leur planification dosimétrique, de bénéficier d'un système de contrôle de la dose. La planification inverse<sup>38</sup> va calculer la balistique optimale en fonction des valeurs déterminées pour chacun des volumes présents. Les valeurs seuils sont dépendantes de la radiosensibilité intrinsèque de chaque organe. L'annexe I en parle plus précisément.

### ***Balistique***

La balistique est la clé de tout traitement utilisant les radiations ionisantes. En effet, elle tient compte des caractéristiques volumiques des organes segmentés, des éléments externes ainsi que de la radiosensibilité des organes.

### ***Calcul de la dose***

Une fois que la balistique primaire, les organes délinées, l'énergie et la pondération des faisceaux sont déterminés, il est possible de générer le calcul de la dose. Le temps de calcul est fonction de la complexité du plan de traitement ainsi que du nombre de faisceaux utilisés pour le traitement. Il peut être d'une heure ou deux pour des cas simples, nécessitant

---

<sup>37</sup> CNRTL / Ortolang. *Lexicographie délinéation*. [En ligne]. Nancy – France : 2012 [consulté le 20 juin 2014]. Disponible: <http://www.cnrtl.fr/lexicographie/délinéation>

<sup>38</sup> Aussi appelé ITP. Ce dernier est un acronyme anglais signifiant *Inverse Treatment Planning*.

un nombre de champ limité, et supérieur à une dizaine d'heures pour les cas nécessitant d'importantes ressources informatiques, notamment lorsque la balistique présente des complexités ou lorsque les contraintes de dose liés aux volumes critiques sont très importantes.

### ***Acceptation du dossier technique et contrôles de la conformité***

Pour que le plan de traitement soit validé et mis en fonction, il doit être accepté et confirmé par le technicien en charge du dossier, le médecin radiothérapeute ainsi que le physicien médical. Avant que les séances de rayons ne commencent, il est nécessaire que le plan de traitement soit éprouvé théoriquement (au niveau informatique, des modélisations sont élaborées) soit directement (un fantôme doté de capteurs est irradié et les données recueillies sont étudiées). A la suite des résultats obtenus de ces contrôles de la conformité et de la qualité du plan de traitement, la décision d'adopter ledit plan est acceptée. Le cas échéant, une nouvelle balistique doit être soumise au consortium de professionnels.

### **Traitement**

L'étape de traitement commence réellement avant la première irradiation, le patient est convié à venir découvrir les locaux ainsi que le personnel qu'il va côtoyer pour le temps de son traitement. Cette étape est essentielle car le patient se voit rassuré, écouté et comprend comment vont se dérouler ses irradiations thérapeutiques.

Le positionnement du patient est strictement pareil à celui élaboré lors de la simulation. Ses mensurations sont prises hebdomadairement, ceci pour effectuer un suivi morphologique

Une fois en place, le patient reste dans la salle de traitement, pendant que les TRM vont effectuer l'irradiation, sous contrôle de moniteurs vidéo et de microphones. Avant chaque irradiation, des images de contrôle sont effectuées pour vérifier la bonne position du patient grâce à des vues modélisées par rapport au Scanner CT de simulation. Au cours de l'irradiation, le TRM garde d'une part un œil sur le patient et d'autre part sur les Unités Moniteurs, la quantité d'énergie qui est administrée au patient.

Une fois le traitement journalier terminé, le TRM s'entretient avec le patient concernant la séance du lendemain.

## *L'Institut Paul Scherrer - PSI*

En employant 1900 personnes, le PSI est le plus grand centre de recherche en Suisse. Il se situe dans le canton d'Argovie et a été créé en 1988 après la fusion de deux centres de recherche se situant de part et d'autre de l'Aar. Outre l'exploitation de la seule installation de Suisse permettant le traitement des tumeurs par faisceau de protons, l'institut est actif dans de nombreuses disciplines en passant par la recherche fondamentale et la recherche appliquée. Des travaux de pointe sont réalisés aussi bien dans les domaines de la matière et des matériaux, de l'énergie et de l'environnement que dans ceux de l'homme et de la santé. Sans la mise à disposition de leurs installations, aux chercheurs et aux différentes industries, certaines expériences ne pourraient tout simplement pas avoir lieu. Hormis le fait que le PSI construit et exploite des grandes installations scientifiques, il se charge également, le plus souvent, de leur conception ainsi que de leur développement. Un « Home Made » qui est, à n'en point douter, une des raisons de la solide et prestigieuse notoriété dont bénéficie l'Institut Paul Scherrer au niveau mondial.

### **Le Centre de Proton Thérapie**

Le Centre de Proton Thérapie au sein du PSI utilisa la première Gantry compacte (1996), dotée d'un système de balayage de faisceau, dans le cadre de la thérapie utilisant des protons pour des localisations tumorales en profondeur. La technique du Spot-Scanning<sup>39</sup> a été principalement développée au PSI et permet de cibler avec précision les tumeurs les plus complexes tout en épargnant les tissus sains avoisinants.

Dès 1984, l'appareil OPTIS<sup>40</sup>, doté d'un faisceau horizontal, a été utilisé pour les traitements des tumeurs de l'œil. A ce sujet, et selon Professeur Weber, le CPT concentre en son sein la plus grande base de données mondiale, du traitement des tumeurs ophtalmiques. Les chiffres de 2010 publiés par le PSI<sup>41</sup>, font état de 5'500 de ces tumeurs ayant été traitées par irradiation sur OPTIS.

---

<sup>39</sup> Ce dispositif, mis au point par le PSI, sera explicité dans le chapitre *TECHNIQUE ONCOLOGIQUE* à la section *Techniques d'irradiation*.

<sup>40</sup> Acronyme anglais signifiant Ocular Proton Therapy Irradiation System

<sup>41</sup> Institut Paul Scherrer. *L'histoire du PSI*. [En ligne]. Villigen : PSI; [consulté le 15 mai 2014]. Disponible: [www.psi.ch/histoire-du-psi](http://www.psi.ch/histoire-du-psi)

Au CPT, dès 2004, des enfants en bas âge ont pu avoir accès à des traitements utilisant des techniques de pointe. Ces traitements sont effectués complémentaires à une anesthésie ou tout du moins une sédation dans le but d'assurer une position optimale lors de l'irradiation.

C'est après cette période, autour de 2010 qu'une seconde Gantry, appelée Gantry 2, a vu le jour et a été, après sa phase de test, mise en fonction à la fin de l'année 2013.

## *Utilisation de la protonthérapie à l'Institut Paul Scherrer*

### **Généralités**

« La protonthérapie consiste à traiter des tumeurs avec des protons accélérés. Cette technique de pointe est réservée aux cas où les tumeurs se trouvent à proximité d'organes critiques et sensibles aux radiations, quand les méthodes classiques deviennent dangereuses ou peu efficaces. »<sup>42</sup>

Dans la partie introductive, différentes caractéristiques balistiques ont permis de décrire les avantages de cette radiothérapie de précision qui utilise des noyaux d'hydrogène chargés positivement. Cette partie va expliciter les différentes notions précédemment évoquées afin de mieux comprendre les caractéristiques balistiques propres à cette technique.

### **Prise en charge pécuniaire**

L'ordonnance, datant du 29 septembre 1995<sup>43</sup>, sur les prestations de l'assurance des soins est régie par le Département Fédéral de l'Intérieur<sup>44</sup>. Il y est stipulé<sup>45</sup> que l'irradiation thérapeutique par faisceau de protons est prise en charge pour les cas et les conditions suivantes :

---

<sup>42</sup> LEDEN et EDP Sciences. *Protonthérapies*. [En ligne]. 2001 [mis à jour le 20 juin 2007]. [Consulté le 10 mars 2014]. Disponible: <http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/protontherapies.htm>

<sup>43</sup> Etat au 1 janvier 2014

<sup>44</sup> Département Fédérale de l'Intérieure. *Ordonnance du DFI sur les prestations dans l'assurance obligatoire des soins en cas de maladie OPAS 832.112.31*. [En ligne]. 1995 [consulté le 20 juin 2014]. Disponible: <http://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19950275/201401010000/832.112.31.pdf>

<sup>45</sup> Annexe III

- Mélanomes intraoculaires.
- Prise en charge seulement si l'assureur a donné préalablement une garantie spéciale et avec l'autorisation expresse du médecin-conseil.
- Lorsqu'il n'est pas possible de procéder à une irradiation suffisante par faisceau de photon du fait d'une trop grande proximité d'organes sensibles au rayonnement ou du besoin de protection spécifique de l'organisme des enfants et des jeunes.
- Exécution des traitements exclusivement à l'Institut Paul Scherrer à Villigen.

Les indications actuellement prises en charges financièrement par l'assurance obligatoire des soins sont :

- Tumeurs du crâne (chordomes ; chondrosarcomes ; carcinomes épidermoïdes ; adénocarcinomes ; carcinomes adénoïdes kystiques ; lymphoépithéliomes ; carcinomes mucoépidermoïdes ; esthésioneuroblastomes ; sarcomes des parties molles et ostéosarcomes, carcinomes non différenciés, tumeurs rares telles que les paragangliomes).
- Tumeurs du cerveau et des méninges (gliome de bas grade, 1 ou 2 ; méningiomes).
- Tumeurs extra-crâniennes au niveau de la colonne vertébrale, du tronc et des extrémités (sarcomes des tissus mous et de l'os).
- Tumeurs de l'enfant et de l'adolescent.

D'autres indications sont en cours d'évaluation (verdict en juin 2015) et actuellement pratiquées dans le cadre de l'étude pilote au PSI:

- Radiothérapies post-opératoires de carcinomes mammaires envahissants.

### **Utilisation des protons**

Il y a une différence fondamentale entre le traitement du cancer par radiothérapie, qui utilise des rayons X et la thérapie par des protons. En donnant une dose suffisante, la thérapie par rayons X va contrôler la majeure partie des volumes tumoraux, mais à cause de l'impossibilité actuelle de la planification dosimétrique à conformationner parfaitement la dose au volume cible à proprement parler, les tissus sains voisins vont recevoir une partie de la dose et peuvent être endommagés. Avec l'utilisation des protons, la répartition de la dose

est tout à fait différente. Selon H. Breuer et D.J. Smit<sup>46</sup>, en effet, de par leurs caractéristiques intrinsèques (particule lourde et chargée électriquement), et de leurs balistiques propres (pic de Bragg), ces particules présentent l'avantage de ne pas diverger sur leur trajet et par conséquent la dose ponctuelle est homogène.

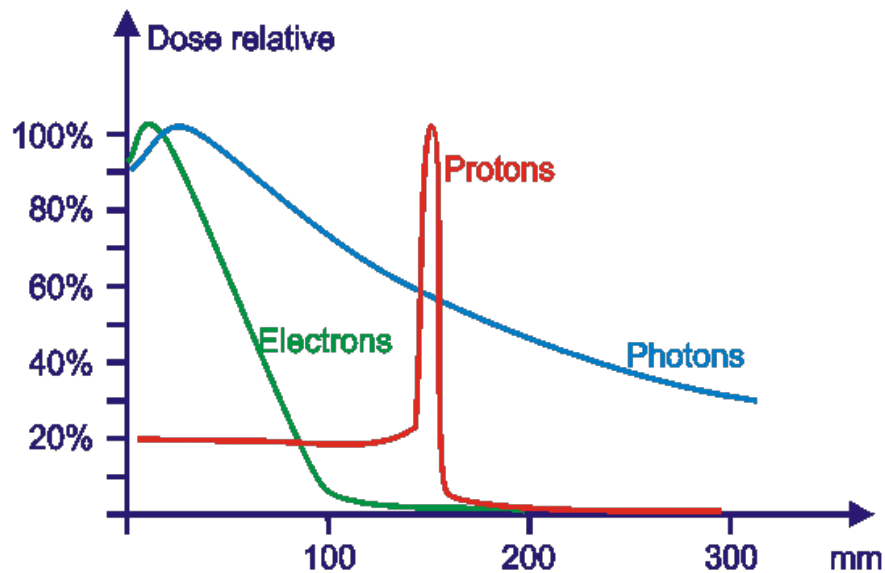


Figure 1 - Dose relative selon le type de rayonnement / particule en fonction de la profondeur

Le diagramme de la figure 1<sup>47</sup> illustre la dose relative en fonction de la profondeur du faisceau dans les tissus pour les électrons, les protons et les photons. On se rend compte qu'en faible profondeur, la peau par exemple, la dose délivrée par les protons est cinq fois moins importante que celle induite par les électrons et les photons. La courbe représentant les protons illustre la courbe de Bragg qui sera explicitée plus loin. Ainsi les protons présentent l'avantage de délivrer le maximum de leur dose en une profondeur précise qui est fonction de l'énergie du faisceau incident.

En 1946, Robert Wilson (un physicien américain, qui sera considéré par la suite comme étant le père de la protonthérapie telle que nous la connaissons) suggéra que :

- Les protons peuvent être utilisés pour la clinique, ils peuvent être utilisés à but thérapeutique.

<sup>46</sup> BREUER, H., & SMIT, B.J. *Proton Therapy and Radiosurgery*. Germany: Springer 2011, p. 7

<sup>47</sup> Figure 1 : HERON, J-F. *Irradiations par d'autres particules*. [En ligne]. 2014 [mis à jour le 28 mai 2011]. [Consulté le 20 mai 2014]. Disponible: [http://www.oncoprof.net/Generale2000/g08\\_Radiotherapie/g08\\_rt25.php](http://www.oncoprof.net/Generale2000/g08_Radiotherapie/g08_rt25.php)

- Le maximum de la dose peut être placé au sein du volume tumoral.
- La thérapie par faisceau de protons épargne les tissus sains.

Mais ce n'est qu'en 1954 que le premier traitement par faisceau de protons sera effectué au Berkley Radiation Laboratory dans le cadre d'une étude comparative entre la technique classique et celle utilisant des particules lourdes.

## ***Caractéristiques du proton***

Le proton est une particule subatomique (qui est contenue dans le noyau et qui peut en être extrait par une réaction électromagnétique ou par fission nucléaire), stable et chargée positivement ( $p^+$  ; ainsi elle est influençable et par conséquent déplaçable par un champ magnétique adapté).

C'est une particule lourde, environ  $1900^{48}$  fois la masse de l'électron, ainsi présentant une telle différence de masse, elle va générer plus de dégâts au niveau de la chaîne d'ADN que l'électron. Lorsqu'un faisceau de protons traverse des tissus, il présente une très faible dispersion latérale (grâce à la masse élevée du proton et sa vitesse incidente importante) et se déplace d'une manière tout à fait droite et régulière. Ainsi hors d'un champ magnétique, la trajectoire d'un faisceau de proton est rectiligne et sans dispersion latérale.

Comme dit précédemment, le proton est une particule, qui dit particule dit quantité de matière aussi faible soit-elle, ainsi contrairement aux photons qui, eux, sont des ondes électromagnétiques. Les protons ont une vitesse d'entrée et vont la voir diminuer jusqu'à s'arrêter complètement en déposant en leur lieu d'arrêt le maximum de leur énergie. La courbe de croissance du dépôt d'énergie en fonction de la profondeur détermine la courbe de Bragg qui en son terme dessine une trajectoire en forme de pic.

## ***Avantage du faisceau de protons pour le traitement***

Actuellement, un certain nombre d'études, menées par le groupe de recherche de MD. Anderson Cancer Center (Université du Texas), sont en cours de réalisation pour déterminer techniquement, physiquement et cliniquement quelle technique de traitement de cancer utilisant des radiations ionisante est la plus adaptée.

Les résultats d'études récemment menées<sup>49</sup>, par des groupes de recherche américains, mettent en évidence les éléments suivants qui pourraient faire pencher la balance pour la protonthérapie :

---

<sup>48</sup> La masse de l'électron est de  $9.1 \times 10^{-31}$  kg et celle du proton est de  $1.67 \times 10^{-27}$  kg. Source : Commissions romandes de mathématique de physique et de chimie. Formulaires et tables. G d'Encre mai 2010, p. 157

<sup>49</sup> JAMES, D. COX. M.D. / The University of Texas MD. *Anderson Cancer Center*. [En ligne]. 2014 [consulté le 2 juin 2014]. Disponible: <http://www.mdanderson.org/education-and-research/research-at-md-anderson/early-detection-and-treatment/centers/proton-therapy-center/index.html>



- Le nombre de champs utilisés (et par conséquent le temps total de traitement) est inférieur en protonthérapie (2 à 3) qu'en radiothérapie (5 à 9). De plus, le nombre important de champs d'entrée augmente considérablement la surface cutanée irradiée et proportionnellement les effets toxiques.
- L'absence de dose à la suite du pic est indéniablement la caractéristique amenant la protonthérapie devant la radiothérapie techniquement parlant.
- La pénombre du faisceau de protons dépend de la conception du système et de la configuration des paramètres, ainsi l'optimisation des caractères intrinsèques de l'appareillage permet de contrôler cette caractéristique.

Néanmoins, l'avantage notable que la protonthérapie dispose par rapport à la radiothérapie est le fait d'épargner remarquablement les tissus sains qui n'ont pas à être irradiés.

### Accélérateur de protons au PSI

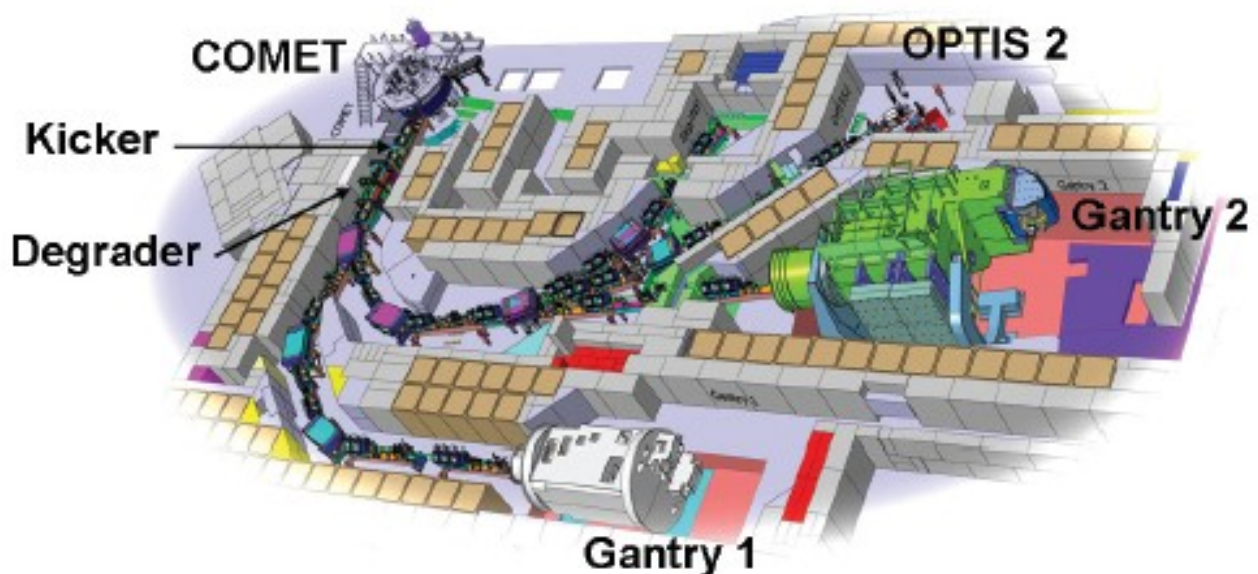


Figure 2 - Représentation schématique du Centre de Protonthérapie du PSI<sup>50</sup>

<sup>50</sup> SAFAI, S., BULA, C., MEER, D., PEDRONI, E. Translational Cancer Research. *Improving the precision and performance of proton pencil beam scanning*. [En ligne]. 2012 [consulté le 10 mai 2014]. Disponible: <http://www.theter.org/article/view/599/html>

La modélisation schématique ci-dessus, ainsi que celle présentée dans l'annexe IV<sup>51</sup>, mettent en évidence la représentation actuelle du PSI et les lignes de faisceaux de protons qui sont les siennes. Le cyclotron qui accélère les protons pour toutes les salles de traitement produit une énergie maximale de 250 MeV.

Pour être dans la possibilité d'utiliser des protons comme particule pour le traitement du cancer, il faut dans un premier temps une source (dans le cas du CPT, une source d'hydrogène est utilisée) qui, une fois activée va délivrer des protons. Ces protons vont ensuite être accélérés dans le cyclotron à une vitesse très importante (environ 60% de la vitesse de la lumière<sup>52</sup>). Ainsi, ils vont acquérir une énergie cinétique potentielle<sup>53</sup> très grande et qui va présenter l'avantage d'être exploitable.

Une fois accélérés, ils vont être dirigés dans des systèmes conducteurs<sup>54</sup>, pour ensuite se diriger vers l'appareil de traitement à proprement parler pour que le faisceau qu'ils forment soit modulé.

### **OPTIS**



**Figure 3 – OPTIS (CPT, PSI)**

Cet appareil est dédié au traitement du cancer de l'œil. Il dispose d'un rayon horizontal d'énergie fixe de 250 MeV (donc une portée potentielle de 34 cm). La portée réelle est modulée par un ou plusieurs compensateur(s).

La technique utilisée pour cette installation est le Passive Scattering.

<sup>51</sup> ROHRER, U. / PSI. *Proscan Area Layout*. [En ligne]. Villigen: 2006 [mis à jour le 10 août 2007]. [Consulté le 9 mai 2014]. Disponible: [http://aea.web.psi.ch/Urs\\_Rohrer/MyWeb/proscan.htm](http://aea.web.psi.ch/Urs_Rohrer/MyWeb/proscan.htm)

<sup>52</sup> Chiffre fourni par l'équipe de TRM du CPT du PSI.

<sup>53</sup> On parle ici d'énergie cinétique potentielle, car elle est intrinsèque à la particule et est fonction de sa masse et de sa vitesse. Cette énergie peut être calculée grâce à la relation découverte par A. Einstein en 1905 ( $E = mc^2$ ).

<sup>54</sup> Des tuyaux, pourvus d'aimants, vont permettre de diriger le faisceau de protons qui est chargé positivement.

## Gantries

Le Centre de Proton Thérapie de l'Institut Paul Scherrer est actuellement doté de deux Gantries. Leurs faisceaux sont déplaçables et leur énergie maximale est également de 250 MeV. Toutes deux utilisent le système de balayage de faisceau.



Figure 4 - Gantry 1 (CPT, PSI)

Gantry 1 : elle est dotée d'un système non isocentrique où l'appareil et le patient se déplacent sur le schéma du carrousel. Pour moduler la portée réelle, un système de Plates (cales en polycarbonate) mobiles est utilisé et pour les déplacements latéraux du faisceau, la table et le patient sont déplacés.



Figure 5 - Gantry 2 (CPT, PSI)

Gantry 2 : elle est de type isocentrique, la Gantry et la table sont mobiles indépendamment. Pour la portée, l'utilisation d'un système électromagnétique oscillant est préconisé, pour les déplacements latéraux, un système d'aimants permet d'incliner le faisceau.

## Applications et indications cliniques de la protonthérapie

Dans leur article A. Bouyon-Monteau et al.<sup>55</sup> mettent en avant le fait que la protonthérapie est devenue le traitement de référence des tumeurs nécessitant des doses d'irradiations élevées. C'est grâce à la conformation de haute précision qu'il est possible de traiter des tumeurs dites radiorésistantes nécessitant des hauts niveaux de dose<sup>56</sup>.

<sup>55</sup> Bouyon-Monteau, A., Habrand, J.-L., Datchary, J., Alapetite, C., Bolle, S., Dendale, R. et al. *La protonthérapie : avenir de la radiothérapie ? Première partie : aspects cliniques*. Cancer / Radiothérapie [En ligne]. 2010 [consulté le 9 mai 2014]. Volume 14 – No 8 : P. 727-738. Disponible: <http://www.em-consulte.com/article/273737/article/la-protontherapie-avenir-de-la-radiotherapie-premi>

<sup>56</sup> Dans ce cas, on parlera « d'escalade de dose ». Plus la dose délivrée à la tumeur est importante, meilleur sera son contrôle local et meilleur sera le devenir du patient. Ce qui revient à dire qu'un patient n'est jamais guéri du cancer tant qu'il n'y a pas de contrôle local de sa tumeur.

Le fort gradient de dose qu'il est possible d'appliquer entre le volume cible tumoral et les structures à risque adjacentes, permet d'augmenter la dose au volume cible tout en limitant celle délivrée aux organes critiques qui se trouvent au contact ou à proximité. Autrement dit, ce sont principalement les cas pédiatriques, les tumeurs profondes et semi-profondes, qui nécessitent un meilleur contrôle local, ainsi que les tumeurs mal placées qui présentent le plus grand intérêt à bénéficier de cette technique. La principale motivation de son utilisation chez l'enfant est la réduction de l'apparition d'une seconde localisation tumorale<sup>57</sup>.

L'objectif recherché étant d'obtenir un meilleur contrôle local tout en préservant les tissus sains radiosensibles environnants. Selon Professeur Weber, « tout cancer proche d'organes critiques radiosensibles, pour lesquels une irradiation minimale est recherchée, a des indications potentielles pour les protons. »<sup>58</sup>.

Bien que les indications cliniques à un traitement par protonthérapie se soient nettement élargies ces dernières années, il est possible d'énumérer ici, sans pour autant trop rentrer dans les détails, les principales, actuellement, traitées au PSI:

Les tumeurs de l'œil, les sarcomes de la base du crâne et du rachis cervical, certaines tumeurs profondes de l'adulte<sup>59</sup>, les tumeurs crânio-spinales, les tumeurs pédiatriques, les tumeurs de la sphère ORL<sup>60</sup>, les méningiomes, les sarcomes, les chondrosarcomes et les chondromes.

---

<sup>57</sup> Aussi appelé « cancer radio-induit ». Ceux-ci sont susceptibles d'apparaître tardivement après une exposition aux rayonnements ionisants.

<sup>58</sup> WEBER, D.C., MIRIMANOFF, R.-O., MIRALBELL, R. *La radiothérapie par faisceaux de protons : bases physiques, indications et expérience suisse*. Bulletin du Cancer [en ligne]. 2007 [consulté le 10 mai 2014]. Volume 94 – No 9 : P. 807-815. Disponible: <http://www.jle.com/fr/revues/medecine/pnv/e-docs/00/04/34/B6/resume.phtml>

<sup>59</sup> Les sarcomes paraspinaux, les carcinomes du poumon non à petites cellules de stade I à III *chez de patients non opérables ou refusant d'être opérés*, les carcinomes de la prostate, les tumeurs de la tête et du cou, et du système central, les tumeurs digestives, les tumeurs du sein, les tumeurs du col de l'utérus et de la vessie.

<sup>60</sup> Acronyme français signifiant Oto-Rhino-Laryngologie.

## METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre est consacré au cadre méthodologique de notre travail de Bachelor. Il est articulé autour de cinq sections. Dans la première, les méthodes visant à la récolte des données seront décrites. Nous expliquerons notamment la raison qui nous a poussé à mettre sur pied une deuxième méthode de récolte de données. La deuxième section portera sur la population ciblée. La prise des contacts et les enjeux éthiques seront détaillés dans la quatrième partie. Dans cette partie, nous reviendrons également sur les difficultés rencontrées ainsi que sur les biais et leurs possibles influences sur les résultats de la recherche.

Enfin, au terme de ce chapitre, nous terminerons par une description du déroulement des entretiens et des observations réalisées.

### *Méthodes de récolte des données*

Le dispositif méthodologique auquel nous avons fait appel se base sur les méthodes qualitatives de recherche. Nous avons, dans un premier temps, envisagé de nous centrer essentiellement sur les entretiens.

Toutefois, il s'est avéré que le nombre de personnes susceptibles de nous livrer un entretien était très limité. La raison principale étant que ces TRM exercent dans un domaine de niche et ne concernant qu'un minuscule échantillon de tous ceux qui sont professionnellement actifs. Pour pallier à cette difficulté, nous avons alors également opté pour une méthode d'observation non-participante.

## L'entretien semi-directif

Selon Van Campenhoudt<sup>61</sup>, ce type d'entretien est dit « semi-directif » en ce sens qu'il n'est ni entièrement ouvert, ni canalisé par un grand nombre de questions précises. Van Campenhoudt<sup>62</sup> poursuit que le chercheur, autant que faire se peut, « laissera venir l'interviewé afin que celui-ci puisse parler ouvertement, dans les mots qu'il souhaite et dans l'ordre qui lui convient ». Cette méthode nous a paru particulièrement adaptée à notre recherche car elle a offert aux personnes interviewées un espace de description de leur pratique afin qu'ils puissent retranscrire et expliciter avec précision leurs activités et le sens qu'ils en donnaient.

Le guide d'entretien, destinée aux TRM, consistait en une série de questions ouvertes qui allaient constituer la trame de nos interviews, et qui nous a permis, tout au long des conversations, de ne pas trop nous éloigner du questionnement central. Au cours de l'entretien, enregistré sur support audio, nous avons laissé la discussion, suscitée par les interrogations qu'étaient les nôtres, s'engager avec les intervenants.

Les grilles d'entretiens destinées au Professeur D.C. Weber ainsi que celle pour les techniciens en radiologie médicale sont consultables aux annexes I et II.

## L'observation non-participante

Comme exposé précédemment, le manque de personnes dans la possibilité de nous accorder un entretien nous a poussé à imaginer une autre solution en vue d'obtenir du matériel issu du terrain et susceptible d'être analysé. Nous nous sommes donc tournés vers la méthode d'observation non-participante. Elle nous est apparue appropriée car elle permet, selon Van Campenhoudt<sup>63</sup> d'approcher et d'examiner au plus près les « comportements des acteurs en tant qu'ils manifestent des systèmes de relations sociales ». Autrement dit, cette technique permet de rendre compte des actes, des gestes, des décisions, des mouvements et des propos d'une personne qui agit dans un environnement donné. Cela nous a permis de nous immiscer

---

<sup>61</sup> VAN CAMPENHOUDT, L., QUIVY, R. *Manuel de recherche en sciences sociales*. Paris : Dunod 2011; 4<sup>ème</sup> édition. p. 171

<sup>62</sup> Ibid.

<sup>63</sup> Ibid.

au plus près de « l'agir » des TRM dans le domaine de la protonthérapie afin d'en apprécier très concrètement l'activité.

Nous avons donc, à la vue du nombre limité d'entretiens que nous avons eu la possibilité de réaliser, pris la décision d'effectuer des périodes d'observations, dotés de grilles nous permettant de structurer nos idées et nos recherches. Un fil conducteur qui nous a permis de ne pas omettre des éléments qui seraient nécessaires, sinon indispensables, à la bonne réalisation de ce travail de recherche.

La grille d'observation, complétée à la suite des périodes d'observations effectuées, est jointe à l'annexe VIII.

### *Population cible*

La population cible se constitue de technicien en radiologie médicale. Il s'agit de personnes au bénéfice d'un Bachelor en technique radio-médicale ou équivalent. Nous avons effectué 3 entretiens, dont un exploratoire ainsi que 2 comptes rendus d'observation. Toutes les personnes avec lesquelles nous nous sommes entretenues et que nous avons observées constituaient des sujets adaptés à notre recherche car chacune d'entre elles exerçaient leur profession de TRM auprès de l'Institut Paul Scherrer.

### *Prise de contact, enjeux éthiques, difficultés rencontrées et biais*

#### **Prise de contact**

En ce qui concerne la prise de contact, nous avons décidé, une fois le sujet de notre recherche définitivement choisi, d'agir avec beaucoup de recul pour garder précieusement nos contacts les plus importants. Ce choix a été décisif dans la mesure où il allait avoir un impact important sur la faisabilité de l'ensemble du travail à réaliser.

Dans un premier temps, au cours de nos recherches, il a été décidé d'activer, par des courriers électroniques, un premier réseau composé d'une association<sup>64</sup> ainsi que d'un physicien médical<sup>65</sup>. Par la suite et comme toutes les réponses que nous avons reçues de leur part étaient peu concluantes, une approche plus directe, par des appels téléphoniques, a été effectuée pour entrer en lien avec le personnel du PSI.

Malheureusement, cette démarche s'est également révélée infructueuse. Au final, c'est le Professeur Weber<sup>66</sup>, Médecin Chef et Directeur Médical du Centre de Proton Thérapie de Villigen<sup>67</sup>, qui nous a ouvert grand les portes de son service. Cela nous a, en plus de nous conforter dans la décision de traiter un tel sujet, permis d'entreprendre les démarches pour pouvoir tout simplement le réaliser. Sans sa précieuse aide, il aurait été difficile voire même improbable de trouver une crédibilité suffisante auprès du PSI pour effectuer les recherches nécessaires à la réalisation de notre travail. En effet, sans lui, toute notre meilleure volonté n'aurait pas été suffisante puisque le CPT représente l'unique centre en Suisse et qu'il aurait dès lors fallu effectuer des démarches similaires à l'étranger et par voie de conséquence réaliser un travail à l'image de l'activité du TRM hors de Suisse.

Nous avons reçu de sa part une aide inestimable ainsi qu'une formidable disponibilité. Après qu'il nous ait mis en relation avec son équipe de TRM, il nous a été possible de nous rendre sur place et ainsi progresser dans nos recherches.

## Enjeux éthiques

Nous tenons à souligner que l'échantillon relevé dans ce travail ne prétend pas du tout être représentatif ni exhaustif des activités effectuées par tous les TRM en protonthérapie. Il convient donc de ne pas généraliser les actions et processus décrits à l'ensemble des praticiens exerçant dans ce domaine professionnel.

---

<sup>64</sup> Cet échange a eu lieu fin 2013 avec Mme la Dresse. Stéphanie Buvelot Frei, soutien scientifique, de la Ligue Suisse contre le cancer.

<sup>65</sup> Ce contact a de solides connaissances sur la protonthérapie et travaille dans un service de radio-oncologie.

<sup>66</sup> Monsieur Damien, Charles Weber est également intervenant à la HEdS pour les cours d'oncologie clinique.

<sup>67</sup> WEBER Damien, Charles. *Curriculum vitae*. [En ligne]. 2013 [consulté le 17 juin 2014]. Disponible: [http://www.sarkomzentrum.ch/media/filer\\_public/2013/12/09/cv-english\\_prof\\_damien\\_charles\\_weber\\_dez\\_2013\\_031213.pdf](http://www.sarkomzentrum.ch/media/filer_public/2013/12/09/cv-english_prof_damien_charles_weber_dez_2013_031213.pdf)



## Difficultés rencontrées

Une fois le sujet choisi et accepté, nous nous sommes rapidement heurtés aux premières difficultés. Celles-ci se sont révélées être aussi diverses qu'inattendues. Citons parmi elles la langue<sup>68</sup>, qui aurait pu, se révéler être un problème majeur et aurait pu mettre en péril l'entier de notre Travail de Bachelor. La plus grande majorité de nos questions et de nos entretiens ont été possibles par nos bilinguismes respectifs ainsi qu'à ceux des interviewés et des intervenants dans leur ensemble. Une deuxième grande difficulté, a été celle de réaliser un travail sur un échantillon de personnes aussi réduit, cela nous a obligé à nous rendre à de maintes reprises à Villigen. Troisièmement, durant toute la période qu'a duré la recherche préliminaire, il nous a fallu nous familiariser et assimiler la terminologie ainsi que le fonctionnement de cette approche thérapeutique. Cette (sur)charge de travail réalisée dans un premier temps nous a, par la suite, permis de comprendre nos interlocuteurs sur les différentes techniques qui font de la protonthérapie une discipline ultra précise et extrêmement pointue.

Et enfin, une quatrième difficulté s'est posée à nous lors de la rédaction de ce présent travail. Comment conserver la pertinence de notre sujet de recherche sans s'égarer dans le développement d'éléments qui n'auraient pas permis de la « nourrir » ? Dans un esprit de clarté et de cohérence, nous nous sommes continuellement questionnés, de la première à la dernière ligne de notre travail, sur l'aspect oscillant entre : l'inutilité d'aborder certaines notions et l'impérative nécessité d'en développer et d'en approfondir d'autres.

Pourtant, il faut bien le dire, à chacune des difficultés qui se sont présentées, nous avons su y répondre avec recul, pondération et parfois aussi avec un brin de saine naïveté !

## Biais

Toute recherche scientifique implique inmanquablement des biais qui impacteront à la fois sur la récolte des données et sur les analyses. A la lecture de différents ouvrages traitant des limites de la recherche scientifique, il nous a paru important de nous pencher sur ces aspects de distorsions. Les biais peuvent être compris comme des éléments perturbateurs, non désirés, qui peuvent influencer et altérer la qualité des résultats obtenus. Pierre Ansart les

---

<sup>68</sup> L'entier du personnel du CPT parle soit le français, soit l'allemand ou soit encore l'anglais.

définit comme des artefacts<sup>69</sup> qui sont une “altération non intentionnelle de résultats d’enquête engendrée par les procédures<sup>70</sup>”.

Le premier biais, identifié, se révèle être en lien avec les aspects linguistiques des échanges et des interviews. En effet, pour tous les sujets interrogés, leur langue maternelle n’était pas le français, bien qu’ils soient parvenus à s’exprimer dans cette langue. Ceci a clairement contribué à limiter l’approfondissement de certaines de leurs réflexions.

En second lieu, à l’écoute des entretiens, nous nous sommes aperçus que nous avons tendance à interrompre parfois les sujets dans les explications qu’ils apportaient. Cela a très probablement eu comme conséquence d’amoindrir la quantité et la profondeur des données récoltées.

Il est évident que notre manque de pratique dans la conduite des entretiens peut expliquer cette limite. Cela nécessiterait, lors d’une éventuelle prochaine recherche, une amélioration des techniques liées à la méthode de récolte de données.

## *Déroulement des entretiens et des observations*

### **Entretiens**

En tout, 3 entretiens, dont un exploratoire ont été effectués, enregistrés puis retranscrits. Ils se sont tous déroulés à l’Institut Paul Scherrer dans le service de protonthérapie. Ceux-ci ont eu lieu soit dans une salle, au calme, qui est réservée au personnel, soit dans un bureau. Leur durée était variable : de 60 minutes à 85 minutes environ. Les entretiens ont tous été extrêmement riches pour le développement de notre question de recherche.

Nous avons eu dans un premier temps, un rendez-vous exploratoire avec le Professeur D.C. Weber qui a pu nous accorder une entrevue d’une heure environ au cours de laquelle nous

---

<sup>69</sup> Terme emprunté à l’anglais, d’abord en médecine, et désignant toute altération de la chose observée facilitant son examen et risquant d’en fausser le résultat. D’où le sens de « notion créée ad hoc ».

<sup>70</sup> AKOUN, A., & ANSART, P. Directeurs. *Dictionnaire de sociologie*. Paris: Seuil; 1999. p. 38

avons pu explorer ensemble le vaste champ qu'est celui de la protonthérapie, son implication en Suisse ainsi que de l'activité des TRM y travaillant.

Ce premier entretien nous a apporté une base très solide compte tenu de l'immense expérience qu'est celle de notre interlocuteur. Cet entretien nous a permis de confirmer d'une part la réalisabilité et la pertinence de notre travail de recherche (si l'activité du TRM en protonthérapie présente un réel intérêt pour la communauté médico-technique) et d'autre part que la protonthérapie est une technique de traitement du cancer de « niche ». En son statut de domaine ultra spécialisé, elle nécessite des infrastructures et du personnel adapté. Au cours de cet entretien, exploratoire, nous nous sommes rendus compte que le nombre, important, de questions que nous avons décidé de poser, était surévalué. Nous n'avons pas pu exposer toutes nos questions au Professeur Weber. Nous avons particulièrement apprécié qu'il ait pu nous consacrer une partie de son temps et être très enclin à partager avec nous son savoir qui nous a été très précieux pour la rédaction de ce travail de mémoire.

Par la suite, nous avons eu l'occasion de procéder à un entretien semi-directif avec une technicienne en radiologie médicale exerçant depuis une période de plusieurs années au sein du CPT. De plus nous avons pu nous entretenir avec plusieurs TRM auxquels nous avons pu à tout moment exposer nos questions les plus diverses.

Nous avons, dans ces contextes, eu l'occasion de discuter sur les différents aspects de la pratique du TRM en protonthérapie, question de recherche de notre travail. Nous nous sommes toujours retrouvés confrontés à des interlocuteurs très compétents avec un désir non-dissimulé de communiquer leur savoir et de faire connaître leur profession aussi particulière puisse-t-elle être. Ces entretiens, formels ou non, nous ont permis d'avoir une base solide, composée de l'expérience propre des TRM exerçants au Centre de Proton Thérapie du PSI. Nous avons eu un immense plaisir à découvrir de nouvelles pratiques et à approfondir nos acquis aux côtés de ceux, pour qui, une telle pratique est devenue courante.

## **Observations**

En plus des entretiens effectués, nous avons pris le temps d'accomplir des périodes d'observations, celles-ci se sont toutes déroulées au CPT de Villigen. Nous avons procédé à 2 journées d'observations.

Au cours de ces périodes, nous avons mis un accent particulier à observer l'activité générale et spécifique qu'a le TRM en protonthérapie. Nous avons basé nos grilles d'observations sur nos connaissances propres en radiothérapie par faisceau de photons.

Nous avons ainsi eu l'occasion d'observer un nombre important de mise en place (positionnement) pour la séance de rayons. Nous avons pu comprendre la nécessité absolue (dans le cas du traitement par rayon de protons bien plus encore que dans celui utilisant des photons) de la reproductibilité et de la précision de cette mise en place. Les conseils, ainsi que les explications, que les TRM nous ont communiqués au fil des observations nous ont permis de déterminer quels aspects théoriques (éléments de physique des particules, éléments de biologie humaine), techniques (manipulation des appareils, connaissances en mécanique) ou encore humaines (relation avec le patient, avec son entourage) étaient d'après eux les plus importants et les plus essentiels.

# TECHNIQUE ONCOLOGIQUE

## *Généralités concernant la protonthérapie*

### **Historique**

En 1896, Wilhelm Röntgen (Allemagne, 1845-1923) fit l'extraordinaire découverte de rayons qui présentent la caractéristique de traverser les tissus du corps humain et d'en redonner, à la sortie, une image. Ils vont prendre le nom de rayons X. Très rapidement, ils trouvèrent une utilité dans la médecine et notamment dans la visualisation des densités du corps humain.

Ainsi, dans un premier temps, ils furent exclusivement utilisés pour la visualisation du corps humain dans le cadre de la radiologie. Dès le premier tiers du XX<sup>e</sup> siècle, il fut établi que les radiations ionisantes, à doses contrôlées, avaient un effet positif sur les structures tumorales. Des sources radioactives de <sup>88</sup>Radium furent alors utilisées pour traiter des nodules. Dans ces applications précises, l'utilisation de photons de faible énergie fut privilégiée.

En 1946, Robert R. Wilson (Harvard University, Radiation Laboratory of Ernest O. Lawrence at the University of California Berkeley) proposa d'utiliser, cette fois-ci, des protons de haute énergie pour la radiothérapie<sup>71</sup>. Il exposa ce postulat après avoir décrit précisément la distribution en profondeur de doses de protons fortement énergétiques dans le corps humain. Considéré comme le père de la protonthérapie<sup>72</sup>, il échafauda un modèle expliquant l'évolution de la diminution de la dose des protons dans le corps : la courbe de Bragg. Malheureusement, ses constatations n'eurent pas de débouchés directs. Il fallut attendre 1950 et la création du premier cyclotron capable d'accélérer les protons, les

---

<sup>71</sup> BREUER, H., & SMIT, B.J. *Proton Therapy and Radiosurgery*. Germany: Springer 2011, p. 3

<sup>72</sup> The National Association for Proton Therapy. *Proton News*. [En ligne]. 2014 [consulté le 25 mai 2014]. Disponible: <http://www.proton-therapy.org/pr10.htm>

deutérons et les particules alpha. Les premiers traitements utilisant des rayons X virent le jour suite à cette innovation. C'est alors seulement que le traitement par particules lourdes fut envisageable.

En 1976, Constable & al.<sup>73</sup> présentèrent la première utilisation thérapeutique du faisceau de protons dans le cas d'un mélanome uvéal, grâce à un cyclotron créé par l'université d'Harvard.

A partir de 1980, divers centres, capables de proposer des programmes de traitement utilisant des faisceaux de protons virent le jour dans le monde entier. En Suisse, au centre de recherche fondamentale de l'Institut Paul Scherrer, fut créée une entité (le Center for Proton Therapy) consacrée à l'utilisation d'un faisceau de protons pour le traitement de cancers spéciaux. Trois Gantries différentes y virent progressivement le jour<sup>74</sup> :

- De 1984 à 2010, OPTIS : utilisation d'un faisceau direct de 72 MeV, puis de 250 MeV pour OPTIS 2, qui est à l'heure actuelle toujours en activité pour les traitements de mélanomes oculaires. Au cours de cette seule période, 5458 patients furent traités.
- Dès 1996, Gantry 1 (construction en carrousel) : utilisation d'un faisceau de 200 MeV pour une multitude de traitements différents. Depuis 1996, 772 patients ont pu bénéficier d'un tel traitement.
- Dès 2011, Gantry 2 (gantry isocentrique) : utilisation d'un faisceau de 250 MeV. Encore en phase de test.

---

<sup>73</sup> BREUER, H., & SMIT, B.J. *Proton Therapy and Radiosurgery*. Germany: Springer 2011, p. 3

<sup>74</sup> BREUER, H., & SMIT, B.J. *Proton Therapy and Radiosurgery*. *Loc. Cit.*, p. 5

## Répartition des centres de protonthérapie<sup>75</sup>



Figure 6 - Répartition mondiale des centres de protonthérapie

Comme l'expose la mappemonde dans la figure 6, on se rend compte que le nombre de ces centres est passablement restreint. Dans l'annexe VII, figure la liste complète des centres de protonthérapie actif prévus et en construction.

Comme explicité dans l'annexe VII, de nombreux sites (27 au total) sont actuellement en cours de construction. Partant de ce constat, dans le courant de l'année 2016, on devrait compter pas moins d'une septantaine de sites de traitement par ions lourds (protons ou ions de carbone) de par le monde. A ces sites, s'en rajoutent encore 11 en planification, dont un en Suisse<sup>76</sup> : le PTC Zürichersee à Galgenen. Ce centre utilisant les protons prévoit d'accueillir son premier patient en 2018 et sera doté d'un cyclotron pouvant délivrer une énergie maximale de 230 MeV pour un total de 4 Gantries et 1 faisceau horizontal fixe.

Forts de ces constatations, nous réalisons l'impact que ce nombre de nouveaux centres de traitements aura sur la pratique du technicien en radiologie médicale. En effet, cette croissance active va indubitablement entrainer un appel de praticiens dans ce domaine bien précis et, par conséquent aussi, élargir le champ de formation, voire même en engendrer de nouveaux.

<sup>75</sup> PROTON THERAPY CENTER. [En ligne]. [Consulté le 2 mai 2014]. Disponible: <http://www.proton-cancer-treatment.com/proton-therapy/proton-therapy-around-the-world/operating-clinical-proton-centres/>

<sup>76</sup> PTCOG. *Particle therapy facilities in a planning stage*. [En ligne]. 2013 [consulté le 12 mai 2014]. Disponible: <http://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-planning-stage>

## *Eléments physiques concernant la technique oncologique*

### **Généralités concernant les radiations ionisantes**

En faisant appel à des radiations ionisantes, il est possible de traiter la plupart des types de cancer. En effet, en utilisant de l'énergie (sous forme d'ondes ionisantes, ou d'énergie cinétique dans le cas de l'utilisation de particules) on peut, après avoir modulé le faisceau de protons incident, détruire les cellules cancéreuses.

Les particules hautement énergétiques induisent un dommage à la cellule en altérant son ADN. L'électron ainsi excité par l'interaction avec le proton va par la suite ioniser les enzymes qui vont réparer les dommages causés. Dans l'exemple de cellules cancéreuses, ces dernières se réparent lentement. Avec la surimpression de dose<sup>77</sup>, les cellules tumorales vont voir leur nombre diminuer significativement.

Le but, dans tous les systèmes de traitement du cancer par radiations ionisantes, est de délivrer le maximum de la distribution de la dose dans le volume souhaité et le minimum en dehors de ce dernier.

Le schéma suivant (figure 7) montre que les ondes et/ou les particules utilisables, lorsqu'elles ont été préalablement déposées dans la matière, contiennent une énergie suffisante pour produire des ions. De fait, dans le traitement du cancer, seule une faible partie de l'ensemble du spectre des radiations est utilisée :

---

<sup>77</sup> La surimpression de la dose est le fait d'appliquer une dose, en un volume donné, un grand nombre de fois ; cela permet de cumuler la dose.



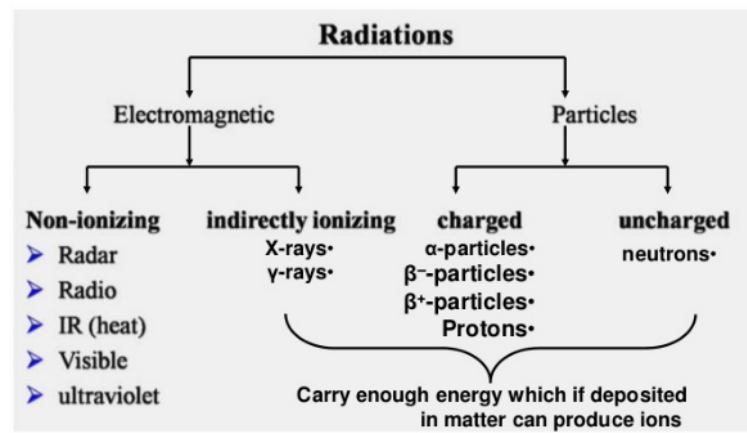


Figure 7 - Classification des radiations ionisantes

Parmi les ondes électromagnétiques capables d'ioniser indirectement la matière, on recense :

- Les rayons X (les photons X), couramment utilisés en radiothérapie conventionnelle ainsi que dans les méthodes particulières tels la tomothérapie ou le CyberKnife. Ces radiations sont également employées pour la radiographie par projection.
- Les rayons  $\gamma$  (les photons  $\gamma$ ), essentiellement utilisés dans la thérapie très spécialisée mais néanmoins largement répandue en Europe, du GammaKnife.

De surcroît, les rayonnements directs ne vont pas s'arrêter dans la matière (sauf si celle-ci est suffisamment dense comme par exemple dans le cas de certains métaux). C'est sur cette propriété particulière que la radiologie conventionnelle se base pour obtenir une image.

Le diagramme ci-dessus illustre également le fait que certaines radiations peuvent être émises indirectement, par l'interaction entre une particule et la matière (ce qui ionise la matière). Parmi les particules utilisables, on dénombre :

- Les particules  $\alpha^{78}$ , qui, pour l'instant, ne sont pratiquement pas utilisées ; pour l'un à cause de la difficulté à les extraire et pour l'autre à cause de leur portée quasi nulle dans les tissus. En revanche, elles sont parfois exploitées cliniquement à des fins très particulières de radiothérapie métabolique<sup>79</sup> utilisant du radium.

<sup>78</sup> La particule alpha correspond, chimiquement, à un atome d' $\text{He}^2$ .

<sup>79</sup> PAPAZYAN, J.-P. *Traitements oncologiques*. [Cours de formation du module 3106]. Genève : Haute Ecole de Santé; BSc 3, 2014.

- Les électrons/positrons ( $\beta^-$  ou  $\beta^+$ ) qui sont actuellement employés pour l'imagerie médicale physiologique (les examens de médecine nucléaire), la brachythérapie (l'irradiation interne) et la radiothérapie externe de contact.
- Les protons ( $p^+$ ) qui sont des particules chargées positivement et, par conséquent, de par leur nature magnétique, facilement attirables par un aimant. Elles sont, à l'heure actuelle, utilisées exclusivement pour la protonthérapie.
- Les neutrons ( $n$ ) qui sont des particules non chargées. Pour le moment difficilement extractibles et non stables, elles ne sont donc pas employées cliniquement. Elles sont par contre mises à profit en recherche fondamentale (notamment au PSI, sur les lignes d'expérimentation).

De manière générale, les particules perdent très rapidement leur énergie (cinétique) par excitation, ionisation et formation de rayonnement de freinage pour finalement s'arrêter.

Le résultat des interactions avec la matière, en cas de rayonnement des particules, est un transfert d'énergie (partiel ou total) du rayonnement ou des particules incident(es) vers le noyau ou le cortège électronique de la matière traversée.

## Interactions photons-matière

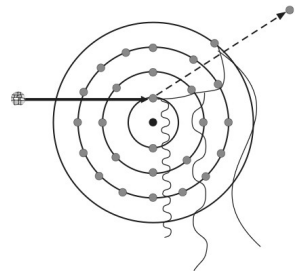
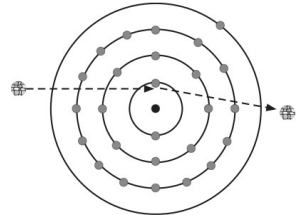
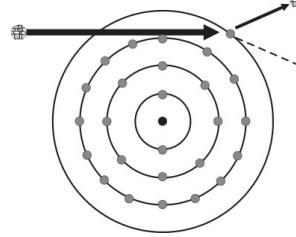
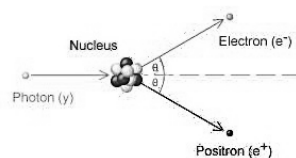
Pour bien comprendre les phénomènes qui régissent les interactions<sup>80</sup> entre les particules, nous allons tout d'abord nous intéresser à celles entre les photons et la matière (respectivement les actions d'ionisation de la matière face à des rayons X ou  $\gamma$ ).

En effet, ces réactions ne sont pas tout à fait les mêmes lorsque l'on est en présence de particules, de protons, ou de rayonnement ionisant, les rayons X. Le cas particulier des électrons peut être assimilé aux interactions résidants entre les photons et la matière.

---

<sup>80</sup> PAGANETTI, H. *Proton Therapy Physics*. Broken Sound Parkway NW: CRC Press 2012, p. 4, p. 77 & p. 79

Tableau 1 - Les interactions principales des photons avec la matière

	Principe	Illustration
<b>Effet photo-électrique</b>	<p>Au cours de l'effet photoélectrique, le rayonnement est absorbé par un électron qui est alors éjecté hors de l'atome.</p> <p>Il est prépondérant aux faibles énergies du rayonnement <math>\gamma</math> et lors d'interactions avec des matériaux absorbants de numéro atomique élevé.</p>	
<b>Diffusion cohérente (Thomson-Rayleigh)</b>	<p>La diffusion cohérente des photons par la matière n'a pas d'effet direct sur cette dernière, puisqu'elle ne s'accompagne d'aucun transfert d'énergie du rayonnement incident vers les molécules touchées.</p>	
<b>Effet Compton</b>	<p>Durant l'effet Compton, le photon est diffusé inélastiquement sur un électron auquel il cède une partie de son énergie. L'électron est éjecté hors du nuage électronique gravitant autour de l'atome.</p> <p>Cet effet est prépondérant aux énergies et aux matériaux dotés de numéros atomiques moyens.</p>	
<b>Créations de paires (électron-positron)</b>	<p>Au cours de la production de paires, le photon est absorbé dans le champ électrique du noyau et une paire électron-positron est formée.</p> <p>Cette production est importante pour les hautes énergies et les matériaux avec numéro atomique élevé.</p>	

A la faveur de ces interactions entre onde ionisante et matière, il est possible de retracer le dépôt d'énergie de cette réaction sous la forme d'un graphique. La courbe obtenue en présence d'ondes ionisantes, des photons, et celle obtenue en présence d'électrons sont sensiblement identiques, à la différence près que les valeurs de portée sont nettement

inférieures en ce qui concerne les électrons. Ceci est dû à leur faible pouvoir d'arrêt ce qui va leur conférer une distance d'arrêt nettement inférieure.

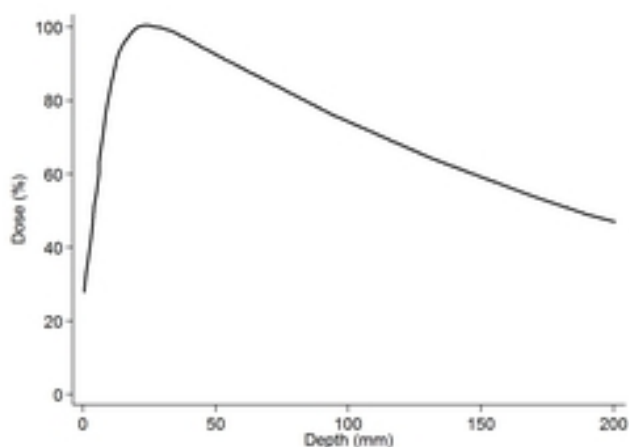


Figure 8 - Répartition de la dose en profondeur pour des photons de 8 MeV

Dans le prolongement du tableau précédent et de la figure (8)<sup>81</sup> récapitulative de la répartition de la dose en fonction de la profondeur, il est intéressant de s'intéresser au devenir d'un faisceau de photons qui pénètre dans la matière :

- Son énergie diminue exponentiellement<sup>82</sup>.
- De même, le nombre de photons diminue avec la profondeur.
- Concomitamment à cette diminution, la dose déposée par ces photons diminue elle aussi et de manière proportionnelle.

Le corollaire logique est que la majeure partie de la dose est déposée dans les tissus sains antérieurs et postérieurs au volume à traiter. Et c'est là que le bât blesse puisque sont exposées des zones ne nécessitant pas d'irradiation.

Rappelons encore, à ce stade de la progression, que le proton est bel et bien une particule. De ce fait, l'action qu'il a sur la matière est différente de celle opérée par les photons ou les électrons.

<sup>81</sup> TRIKALINOS, T., TERASAWA, T., IP, S., RAMAN, G., LAU, J., TUFTS EPC / AHRQ. *Technical Brief on Particle Beam Radiotherapies for the Treatment of Cancer*. [En ligne]. 2010 [consulté le 1<sup>er</sup> mai 2014]. Disponible: <http://www.ahrq.gov/news/events/conference/2010/trikalinos/>

<sup>82</sup> Cela s'explique par la formule de la loi de la décroissance  $E=E_0\exp^{-mx}$

## Le proton

Le proton, symbolisé par  $p^+$  ou  $H^+$ , est une particule élémentaire chargée positivement et fait partie intégrante du noyau de l'atome d'hydrogène (d'où il est extrait). Au demeurant, il compose, avec le neutron, le noyau de tout atome. Il fut découvert dans les années 1920 par E. Rutherford.

Comme mentionné précédemment, le proton porte une charge électrique positive élémentaire et possède une masse de  $1.67 \times 10^{-27}$  kg (ce qui lui confère une énergie potentielle de 938 MeV<sup>83</sup>). De par sa masse, le proton est 1836 fois plus lourd que l'électron.

Pour isoler le proton, il faut séparer l'atome d'hydrogène de son électron ( $H^+ + e^-$ ). Afin d'effectuer une telle manipulation, il est nécessaire de lui apporter une énergie minimale de 13.5 eV<sup>84</sup>. Toutefois, suite à cela, le proton va rapidement retrouver une position stable sous la forme d'un atome d'hydrogène par capture électronique des électrons voisins. Précisons encore que des protons de haute énergie apparaissent naturellement dans les radiations cosmiques.

En vue d'en obtenir dans le cadre du traitement de cancers, il s'avère indispensable de recourir à certaines réactions nucléaires. Globalement, le principe est le suivant : il faut tout d'abord disposer d'hydrogène (H) sous forme de gaz qui va ensuite être chauffé à de très hautes températures jusqu'à atteindre l'état instable de plasma (gaz chaud électriquement chargé<sup>85</sup>). Puis, à ce stade, des champs magnétiques négatifs vont être appliqués pour séparer les protons des électrons résiduels. Ce faisant, les protons se retrouvent isolés et potentiellement manipulables.

## Interactions protons-matière

Les protons interagissent avec la matière de trois manières distinctes. Primo, ils peuvent être ralentis par d'innombrables réactions de collision avec les électrons du cortège électronique des atomes composant la matière. Deuzio, ils peuvent être déviés par des collisions avec le noyau des atomes. Et, tertio, ils peuvent parfois entrer en collision frontale avec des noyaux atomiques.

<sup>83</sup> Obtenu avec l'équation d'Einstein ( $E=mc^2$ )

<sup>84</sup> BREUER, H., & SMIT, B.J. *Proton Therapy and Radiosurgery*. Germany: Springer 2011, p. 7

<sup>85</sup> ITER. [En ligne]. 2014 [consulté le 3 mai 2014]. Disponible: <http://www.iter.org/fr/sci/whatisfusion>

Ces interactions sont, respectivement, appelées *Stopping* (arrêt), *Scattering* (dispersion, diffusion) et *Nuclear Interaction* (réaction nucléaire). L'énergie que le proton va perdre dans la matière, quant à elle, peut être décrite par le biais des interactions survenant entre les particules chargées et les matériaux.

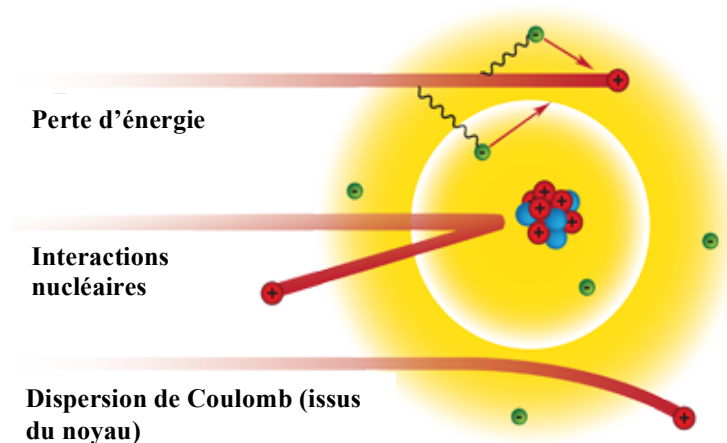


Figure 9 - Principales interactions entre le proton et la matière amenant le pic de Bragg

L'arrêt et la dispersion ont lieu grâce aux interactions électromagnétiques<sup>86</sup> entre la charge (positive) du proton et la charge (négative) des électrons atomiques ou celles des atomes de la matière.

### ***Stopping – Perte d'énergie***

La théorie de l'arrêt fut développée dans les années 1930<sup>87</sup>. L'élément primordial réside dans le fait que le proton s'arrête réellement dans la matière liquide ou solide et, qu'après ce point d'arrêt, la dose résiduelle est tout à fait négligeable. Pour rappel, la portée du proton est proportionnelle à son énergie cinétique. Ainsi, si le faisceau de protons incident est monoénergétique, c'est-à-dire doté d'une seule énergie fixe, tous les protons s'arrêteront à la même profondeur.

Le taux de perte d'énergie du proton augmente proportionnellement à la diminution de sa vitesse puisque, lors de collisions entre les protons et les électrons atomiques des atomes

<sup>86</sup> Los Alamos National Laboratory. *Contrast and Resolution*. [En ligne]. U.S.: 2014 [consulté le 24 avril 2014]. Disponible: <http://www.lanl.gov/science/1663/january2012/story4a.shtml>

<sup>87</sup> PAGANETTI, H. *Proton Therapy Physics*. Broken Sound Parkway NW: CRC Press 2012, p. 22

composant la matière, une partie du moment cinétique du proton est transférée aux électrons. Par voie de conséquence, la quantité d'énergie perdue ou, en d'autres termes, le pouvoir d'arrêt dépend de l'énergie même du proton ainsi que de la masse volumique ( $Z$ , densité particulaire) du matériau traversé.

### ***Multiple Coulomb Scattering – Dispersion selon Coulomb***

La théorie de la diffusion fut développée et communément acceptée dans les années 1950<sup>88</sup>. A l'exception de quelques rares cas, la déviation du proton par un atome est extrêmement faible. Partant, l'angle de dispersion observé d'un faisceau de protons heurtant un matériau est principalement dû à des combinaisons de déviations aléatoires. A cause de ce dernier élément et en reprenant les interactions proton-électron, la dispersion fut décrite par les dispersions selon Coulomb<sup>89</sup>. Ainsi, dans le cas de figure où un faisceau de protons traverse un matériau en étant ensuite dispersé, puis recueilli sur un détecteur, sa distribution spatiale protonique peut être exprimée sous la forme d'une courbe de Gauss. C'est aussi ce qui confère au faisceau de protons une de ses caractéristiques, à savoir sa faible dispersion latérale (une proportion très limitée de particules présente une déviation du faisceau central).

### ***Nuclear Interaction – Interactions nucléaires***

L'énergie perdue par le proton peut être due à des interactions nucléaires<sup>90</sup> élastiques ou inélastiques.

Pour ce qui a trait à l'interaction élastique entre un proton incident et un noyau atomique, il se produit un transfert d'énergie au noyau ainsi qu'une déviation dans la trajectoire du proton. Une interaction inélastique, quant à elle, conduit à une excitation du noyau ainsi qu'à la création d'une structure éjectée du noyau initial. En résulte la diminution de l'énergie du proton ainsi que l'émission d'une particule secondaire induite, à savoir un autre proton, un neutron ou toute autre particule élémentaire.

---

<sup>88</sup> PAGANETTI, H. *Proton Therapy Physics*. Broken Sound Parkway NW: CRC Press 2012, p. 22

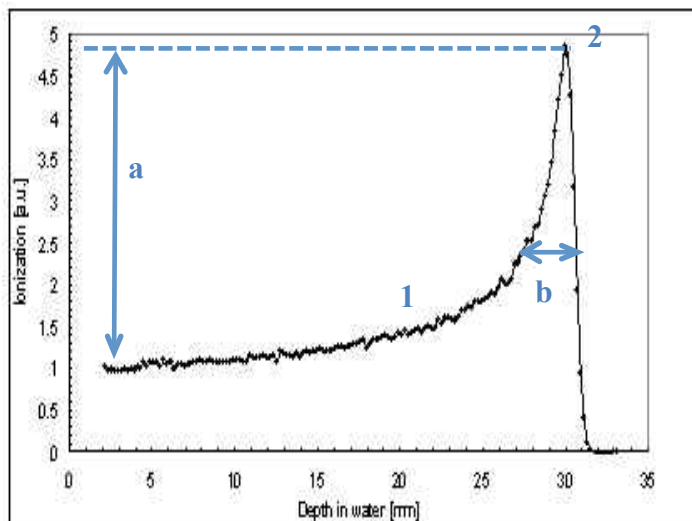
<sup>89</sup> Les interactions de Coulomb consistent en une notion reprenant les interactions décrites par les algorithmes de Monte-Carlo et pouvant se résumer en une cascade de collisions menant à des réactions nucléaires.

<sup>90</sup> BREUER, H., & SMIT, B.J. *Proton Therapy and Radiosurgery*. Germany: Springer 2011, p. 24

## L'intérêt du pic de Bragg en protonthérapie

Les trois interactions décrites précédemment (diminution de la vitesse due à des collisions avec des électrons, déviations par le biais de collisions avec des noyaux atomiques et interactions nucléaires au travers de chocs frontaux produisant des particules induites) vont déterminer la forme de la courbe de Bragg. Une partie importante de la technique de la protonthérapie repose sur la manipulation du pic de Bragg. Il en va ainsi de l'étalement du pic de Bragg (Spread-Out Bragg Peak) en vue de couvrir la cible et épargner autant que faire se peut les tissus sains.

### Représentation du Pic de Bragg



- 1 : Plateau de dose où la vitesse est importante.
- 2 : Pic de dose où les protons sont ralentis et s'arrêtent.
- a : Ratio (pic-plateau) de 4-5 (dépendant de l'épaisseur du spectre d'énergie).
- b : Épaisseur du pic dépendant de la profondeur d'éparpillement moyen comme de l'énergie du spectre initial.

Figure 10 - Représentation de la courbe de Bragg pour des protons de 62 MeV

Avant toute chose, il est nécessaire de rappeler que le pic de Bragg correspond, quantitativement, à l'ionisation de tous les protons et que la courbe éponyme représente la distribution du dépôt de l'énergie en fonction de l'épaisseur de matériel traversé. Du graphique ci-dessus découle le constat suivant : la dose est concentrée dans un très faible volume, c'est-à-dire le pic de Bragg. Ce constat est notable dans le sens où il ne peut pas être utilisé seul pour traiter un volume donné. Par conséquent, pour rendre les protons utiles cliniquement, il est absolument indispensable de disperser la dose (Spread Out) latéralement et dans la direction du faisceau.



Les protons pénétrant dans la matière ont la capacité de perdre seulement une faible fraction de leur énergie. Or, ils déposent de plus en plus de dose à mesure que leur vitesse diminue jusqu'à finalement déposer une importante quantité (la majorité même) de dose à leur arrêt.

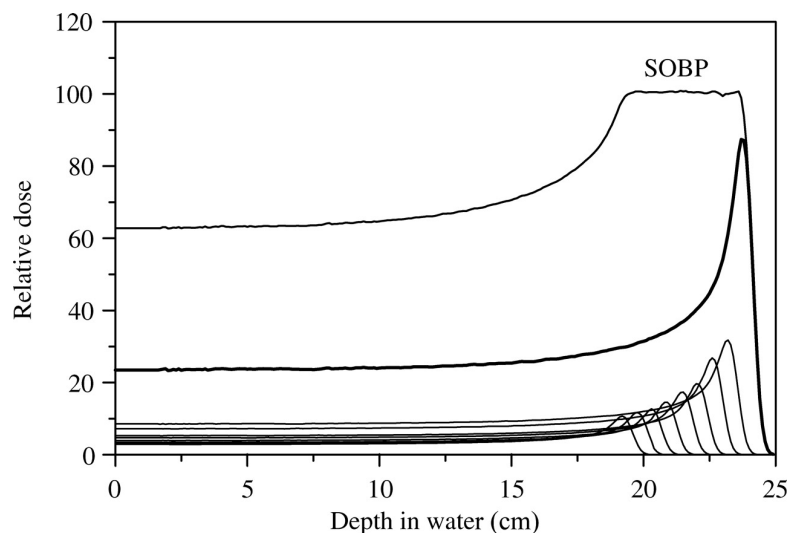
Eu égard à ce qui précède, il apparaît évident que les protons présentent un avantage certain par rapport aux photons et à leur non immobilisation dans les tissus.

Le pic de Bragg (et donc la portée, distance entre la surface d'entrée et le point de dépôt maximal de dose) est directement proportionnel à l'énergie du faisceau de protons à l'entrée de la structure.

De ce fait, le pic de Bragg équivaut à l'endroit précis où les protons déposent la majeure partie de leur énergie. Cette action se produit au terme du parcours des protons. En variant quelque peu l'énergie du faisceau, il est possible de disperser ce pic pour qu'il épouse au plus près les contours de la tumeur et n'interfère pas avec les organes à protéger.

### ***Spread Out Bragg Peak***

Cette technique permet d'étendre la dose dans la profondeur. On parle alors de SOBP<sup>91</sup>. Le diagramme ci-après représente<sup>92</sup> le SOBP :



**Figure 11 - Représentation du SOBP pour une énergie modulée en fonction de la profondeur**

<sup>91</sup> Acronyme anglais signifiant Spread Out Bragg Peak. Ce terme correspond au Pic de Bragg étalé.

<sup>92</sup> OXFORD JOURNALS / *Journal Of The ICRU*. SOBP. [En ligne]. Février 2011 [consulté le 19 février 2014]. Disponible: <http://jicru.oxfordjournals.org/content/7/2/11/F4.large.jpg>

Au niveau de la technique, l'extension de la dose en profondeur est réalisée grâce à une structure appelée Range Shifter Wheel (une roue modulatrice de la profondeur). Cette roue (en mouvements rotatifs) présente des épaisseurs variables. En outre, une extension latérale est également possible par le truchement d'un système de collimateurs ou d'aimants permettant d'incurver le faisceau (Gantry 2 uniquement).

Au niveau du principe, étendre la dose en profondeur se fait grâce à un faisceau de protons délivrant, pas uniquement un, mais plusieurs pics de Bragg successifs avec des portées différentes.

### *Composants d'un accélérateur de protons – PSI*

Les protons injectés dans les accélérateurs sont obtenus par extraction du noyau de l'atome d'hydrogène (constitué lui-même, rappelons-le, d'un seul proton). Ces protons libres sont accélérés grâce à des champs électriques jusqu'à l'obtention de l'énergie désirée (énergie cinétique, principe de la relativité d'Einstein).

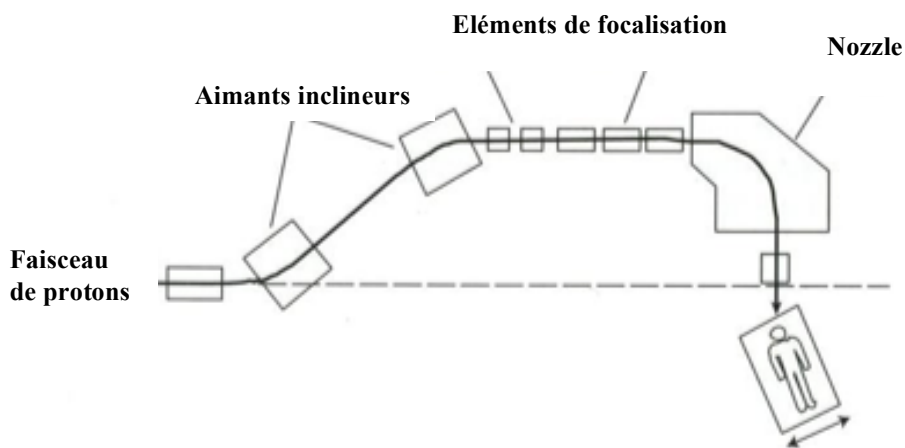


Figure 12 - Coupe axiale de la Gantry 1 PSI<sup>93</sup>

<sup>93</sup> BREUER, H., & SMIT, B.J. *Proton Therapy and Radiosurgery*. Germany: Springer 2011, p. 13

## Extraction des protons

L'extraction des protons issus des atomes d'hydrogène est un phénomène physique et magnétique. Préalablement, il est nécessaire que l'hydrogène ( $H_2^{94}$ ) se présente sous forme gazeuse. L'énergie thermique (la température) va être progressivement élevée jusqu'à ce que le gaz atteigne un état instable nommé plasma. Dans cet état, les forces nucléaires reliant les nucléons diminuent et il est ainsi plus aisé de séparer ses composants.

Un champ magnétique sous forme d'onde de radiofréquence négative est appliqué au plasma d'hydrogène, ce qui va, par magnétisme, séparer, respectivement attirer les protons qui vont peu après être conduits vers un circuit composé d'électroaimants. Ce dernier mènera ensuite le flux protonique directement au cyclotron où il sera finalement accéléré.

## Cyclotron (Accélérateur de protons)

Les protons sont injectés au cœur du cyclotron afin qu'ils se déplacent entre les pôles d'un dipôle magnétique disposant d'un champ magnétique constant. Cet aimant circulaire est séparé en deux parties, une supérieure et une inférieure. L'accélération a lieu lorsqu'une différence d'intensité (infime) du champ magnétique entre les deux demi-aimants est provoquée. Le proton va gagner de l'énergie, et ce deux fois plus pour chaque révolution complète (tour complet du cyclotron). De cette façon, les particules accélérées se déplacent en une trajectoire prenant les traits d'une spirale logarithmique<sup>95</sup> jusqu'à ce qu'elles aient atteint une énergie maximale.

Le principe peut être résumé comme suit :

- Un champ électrique (RF) accélère les protons.
- Des champs magnétiques incurvent le faisceau de protons (selon la force de Lorentz qui veut que le diamètre du cercle induit est proportionnel au moment cinétique).
- Une énergie fixe est définie à sa sortie par la taille du cyclotron.

---

<sup>94</sup> Un atome d'hydrogène est composé d'un proton et d'un électron.

<sup>95</sup> FERREOL, R. *Spirale Logarithmique*. [En ligne]. Editeur; MANDONNET Jacques 2012; [consulté le 15 avril 2014]. Disponible: <http://www.mathcurve.com/courbes2d/logarithmic/logarithmic.shtml>

## Beam Line (transport du faisceau de protons)

Des tubes dépourvus d'air vont guider le faisceau jusqu'à sa destination finale. Ils maintiennent l'énergie, la concentration et l'homogénéité du faisceau de protons. Grâce à des aimants spécifiques, il devient possible de transporter le faisceau depuis le cyclotron jusqu'à la salle de traitement. Chaque champ d'irradiation dispose de sa propre énergie en protons.

Pour déplacer les paquets de protons, il faut que :

- Des aimants magnétiques permettant d'incurver, de guider et de concentrer le faisceau soient utilisés.
- Le champ magnétique (induit par un courant magnétique) soit proportionnel au moment énergétique du proton.

## Gantry

Cette section permet de déplacer l'axe du faisceau dans la position désirée. Cet axe peut être horizontal, dans le cas d'OPTIS, ou isocentrique, dans le cas des Gantries. L'appareil est composé de plusieurs structures distinctes utiles dans le traitement par protons. Parmi ces structures, on peut citer le nozzle qui correspondrait peu ou prou à la tête de l'accélérateur en radiothérapie classique. En son sein, se trouvent tous les éléments nécessaires à la modulation de la dose ainsi qu'à sa dispersion.

Qui dit traitement, dit également imagerie de positionnement. Sur les Gantries, il est possible d'utiliser un système ressemblant à l'imagerie embarquée typique du Linac, le Kv-Kv, mais uniquement lors de la première irradiation. L'image ainsi obtenue n'a pas une définition suffisante pour être utilisable en l'état.

## Nozzle

On parle aussi de banc optique<sup>96</sup>. Son but est de maîtriser et de contrôler le faisceau de protons en vue de le conformer au volume à irradier. Dans cette section, se situent les systèmes de modulation de l'intensité du faisceau ainsi que des filtres permettant de dégrader l'énergie.

---

<sup>96</sup> DELACROIX, S., DE OLIVEIRA, A. / Institut Curie. *Mise en œuvre de la démarche ALARA au centre de protonthérapie de l'Institut Curie*. [En ligne]. Paris/Orsay: 2010 [consulté le 26 mai 2014]. Disponible: <http://www.sfrp.asso.fr/IMG/pdf/18-SDelacroix.pdf>

---

## *Techniques d'irradiation*

### **Passive Scattering (dispersion passive)**

#### ***Principe***

Le Passive Scattering est une technique d'irradiation dans laquelle les matériaux de dispersion et de modulation de la portée diffusent le faisceau de protons. Après que les protons aient été accélérés par le cyclotron, ils sont transportés dans la salle de traitement à travers la ligne de faisceau<sup>97</sup>. Le faisceau de protons pénétrant dans la salle de traitement est de nature monoénergétique et présente une dispersion latérale de seulement quelques millimètres.

Sans modification externe, ce faisceau n'est pas très utile cliniquement parlant (à énergie unique et fixe, sa portée, et par conséquent son dépôt de dose, est ponctuel). Tout au long de l'axe du faisceau de protons, la dose est constante bien qu'adoptant une forme de pic. Dans la direction latérale, le profil est Gaussien avec une dispersion de l'ordre du millimètre. L'utilisation clinique d'un faisceau de protons nécessite au moins deux dispersions préalables. Celles-ci vont permettre de disperser le pic de Bragg dans la profondeur (SOBP) ; ce dernier élément étant une condition sine qua non à l'utilisation de cette technique pour le traitement de tumeurs.

---

<sup>97</sup> Appelée aussi *Beam Line*.

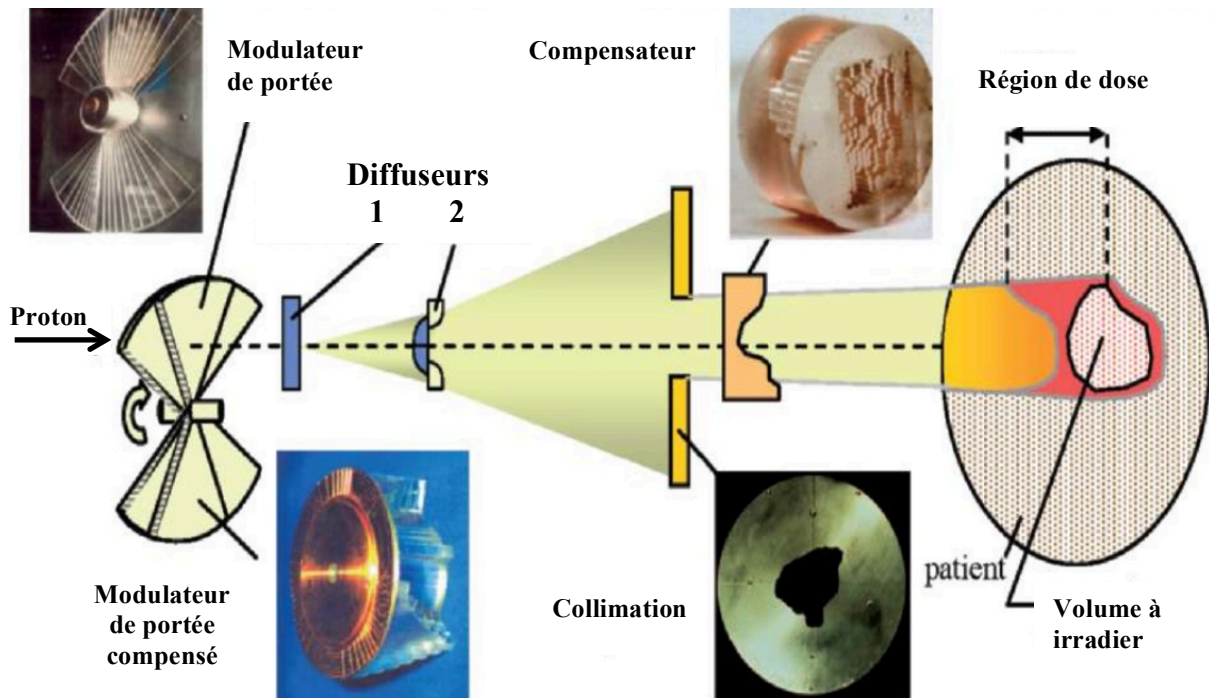
**Représentation** <sup>98</sup>

Figure 13 - Représentation du flux mécanique permettant d'obtenir une dispersion passive

**Modulation du faisceau**

Dans le cas du Passive Scattering (balayage passif), le faisceau de protons est modulé par trois composants internes au nozzle qui permettent de répondre aux contraintes thérapeutiques, à savoir, obtenir une région de dose fiable :

- Le modulateur rotatif (Compensated Range Modulator) induit le Spread Out Bragg Peak ainsi qu'une distribution de dose homogène dans le faisceau de protons.
- Le système de diffuseurs (Scatterer) permet de disperser le faisceau latéralement pour obtenir une taille clinique utilisable.
- Les collimateurs (tels ceux utilisés en radiothérapie externe) permettent de déterminer précisément la zone à irradier.
- Le compensateur va moduler la portée du faisceau de protons.

<sup>98</sup> DINA, D. *Passive Scattering, slide 28*. [En ligne]. 2012 [consulté le 2 avril 2014]. Disponible: <http://fr.slideshare.net/dinadawi/proton-therapy>

## Scanned Beam

### Principe

On parle communément de Spot-Scanning (signifiant littéralement balayage de points). Cette technique fut développée à l'Institut Paul Scherrer avec, initialement, des muons<sup>99</sup>. C'est une technique de traitement, novatrice utilisant un faisceau de protons de quelques millimètres de diamètre régulé par des aimants, eux-mêmes contrôlés par des systèmes informatiques. Tout ceci afin que le point doté de l'énergie la plus importante (au niveau du pic de Bragg) puisse être positionné de la meilleure manière possible pendant un laps de temps défini.

En surimprimant<sup>100</sup> un nombre important de points (les Spots), il est possible d'amener une dose de radiation uniforme tout en contrôlant localement la dose point par point. Ce procédé permet une irradiation aussi nette qu'homogène et adaptée précisément au contour tridimensionnel de la tumeur.

### Représentation <sup>101</sup>

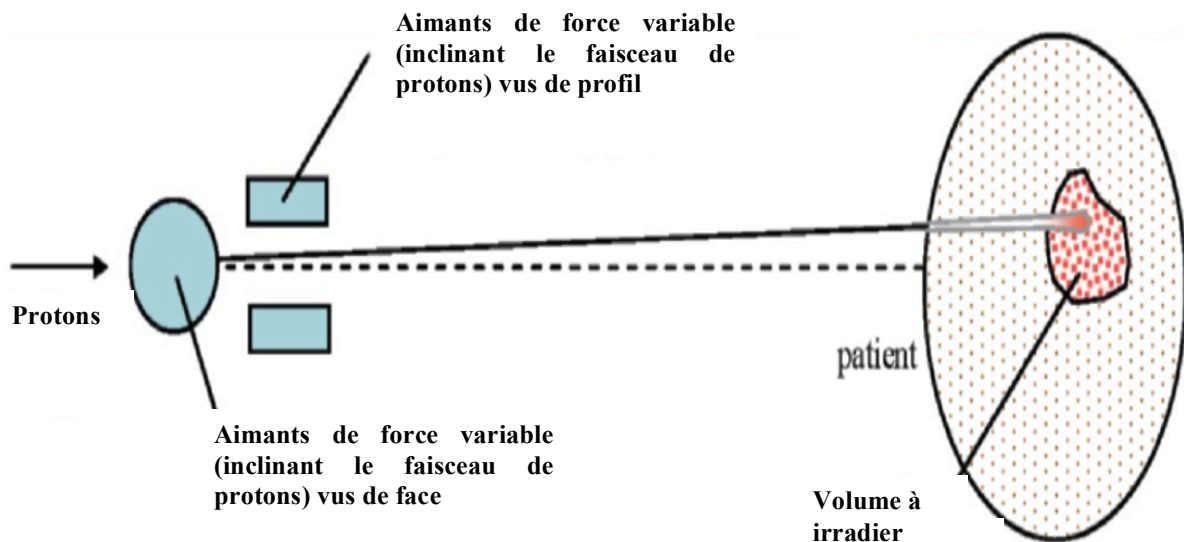


Figure 14 - Représentation du flux permettant d'obtenir un balayage de faisceau

<sup>99</sup> Institut Paul Scherrer. *The Spot-Scanning technique developed at PSI*. [En ligne]. [Mis à jour le 27 avril 2012]. [Consulté le 8 mai 2014]. Disponible: <http://p-therapie.web.psi.ch/e/spot-scanning.html>

<sup>100</sup> La surimpression de dose est une accumulation non linéaire de la dose en un point.

<sup>101</sup> DINA, D. *Passive Scattering, slide 31*. [En ligne]. 2012 [consulté le 2 avril 2014]. Disponible: <http://fr.slideshare.net/dinadawi/proton-therapy>

### ***Modulation du faisceau***

La modulation horizontale et verticale du faisceau est effectuée exclusivement à l'aide d'électro-aimants (Magnet), situés dans le nozzle de la Gantry :

- Les aimants supérieurs et inférieurs peuvent incurver le faisceau verticalement.
- Le dipôle magnétique latéral va, quant à lui, disperser le faisceau horizontalement.

Pour moduler la portée du faisceau, des plaques de polycarbonates, mobiles, permettent d'absorber une partie du rayonnement. Ce qui conduira à déterminer précisément la distance au pic de Bragg.

### ***SFUD (Single Field Uniform Dose)***

La combinaison de champs individuels optimisés permet à chacun de délivrer une dose plus ou moins homogène dans le volume cible à irradier. La technique du SFUD correspond au procédé de Spot-Scanning avec un champ ouvert.

### ***IMPT (Intensity Modulated Proton Therapy)***

Cette technique consiste en l'optimisation simultanée de tous les pics de Bragg de l'ensemble des champs (avec ou sans contrainte de doses additionnelles concernant les organes à risques avoisinants). L'IMPT est l'équivalent de l'IMRT (tout comme la concomitance des champs du Passive Scattering).



# PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS

## *Analyse des données recueillies*

### **Passage en revue de la littérature**

En guise de préambule à ce qui va suivre, il nous paraît crucial de relever que, tout au long des investigations effectuées, la littérature directement liée à notre recherche (activité du TRM en protonthérapie) s'est avérée singulièrement limitée. Il nous a toutefois été possible de trouver un certain nombre d'éléments pertinents dans les ouvrages de référence de protonthérapie (physique, technique) ainsi que dans celles traitant de radiothérapie par rayonnement photonique. Compte tenu de la faible quantité d'éléments littéraires exploitables, la décision d'effectuer une série d'entretiens et d'observations directes s'est imposée d'elle-même. Principalement dans l'optique de confronter les maigres données issues de la littérature à celles que nous allons recueillir et mettre en évidence sur le terrain.

De surcroît, les informations théoriques dénichées dans la littérature présentent l'inconvénient de traiter uniquement de la pratique des techniciens en radiologie médicale au sein de centres de protonthérapie privés ; ou alors de la pratique ayant cours aux Etats-Unis, région où l'activité du TRM n'est pas forcément comparable à celle pratiquée sous nos latitudes, à savoir en Europe. Ceci dit, toute proportion gardée, le Centre de Proton Thérapie de Villigen présente la particularité d'être associé au complexe de recherche du PSI. Il en découle naturellement que l'activité du TRM y diffère de celle exercée dans un centre privé. Par conséquent, le passage en revue de la littérature nous a permis non seulement d'étayer nos connaissances en infirmant ou en confirmant nos représentations avant enquête, mais aussi de déterminer avec précision les notions techniques et physiques sur lesquelles tout TRM dispose d'une action.

## Entretiens

Les tableaux suivants font état des propos tenus par les TRM ayant accepté de participer au recueil de données dans le cadre de ce travail de recherche. Leurs propos ont été, dans un premier temps, retranscrits<sup>102</sup>, puis analysés indépendamment. Dans une phase ultérieure, ils ont été confrontés entre eux afin d'en tirer les éléments nécessaires à l'élaboration des analyses situées dans les sections suivantes. Rappelons, à cet égard, que les questions ayant jalonné ces interviews étaient en lien direct avec les volumes cibles cérébraux, ces derniers représentant la grande majorité des traitements par faisceau de protons.

### *Amorce*

Cette partie initiale traite de la forme par laquelle les entretiens ont débutés ainsi que des éléments qui se sont avérés récurrents lors des entretiens avec les TRM. Tous les entretiens ont commencé par un bref survol de l'expérience professionnelle des techniciens en question.

**Tableau 2 - Analyse des propos recueillis lors de l'amorce des entretiens**

<b>Expérience</b>	Les TRM avec lesquels nous avons eu l'occasion de partager du temps et de converser étaient tous au bénéfice d'une solide expérience professionnelle dans le domaine du radiodiagnostic et/ou de la radiothérapie par faisceau de photons. Ils nous ont confié être arrivés dans le domaine ultraspécialisé de la protonthérapie un peu par hasard. En effet, cette modalité de traitement n'est que faiblement présente sur les divers sites de formation. Au surplus, il a pu être mis en évidence qu'une motivation considérable était de rigueur dans cette profession.
-------------------	---

<sup>102</sup> La retranscription exacte des entretiens en question ne figure pas dans ce document pour des raisons évidentes de confidentialité.

<b>Qualités professionnelles</b>	<p><u>Une motivation importante</u> est indispensable, et bien que le nombre de patients ne soit pas significatif, les pathologies dont ils souffrent, elles, le sont. Il est donc absolument primordial que le TRM en protonthérapie soit parfaitement au clair avec ses émotions.</p> <p><u>Une empathie sincère</u>, afin d'effectuer en tout temps une prise en charge de qualité. Le TRM doit ainsi faire preuve d'empathie aussi bien envers les patients qu'il a à traiter qu'envers leur famille.</p> <p><u>Un désir constant d'innovation et de découverte</u>. Au CPT du PSI, les infrastructures, le matériel, les logiciels informatiques et les formations de chacun forment un « patchwork » s'ajoutant à autant d'éléments distinctifs proposés par les grandes industries de traitement du cancer, dont les principaux sont Varian, Elekta et IBA<sup>103</sup>. Sans parler de tous les autres connaissances acquises par l'expérience et des procédures élaborées par les techniciens et les physiciens eux-mêmes. Partant, les éléments opérationnels à disposition pour le traitement du cancer sont constitués d'une myriade de composants tant humains que techniques et qu'on pourrait qualifier de « Home Made ».</p> <p><u>Une capacité relationnelle développée</u> qui vient compléter et renforcer l'empathie dont il est question plus haut. Les TRM en protonthérapie évoluent dans un milieu pluridisciplinaire où s'activent bien d'autres corps de métier à l'instar des médecins radiothérapeutes, des physiciens médicaux, des anesthésistes, des ingénieurs de maintenance, etc. Ce sont, en somme, tous des protagonistes avec qui le TRM est habituellement amené à agir et à interagir.</p>
----------------------------------	--

<sup>103</sup> Sites internet : <http://www.varian.com> , <http://www.elekta.com/> , [www.iba-protontherapy.com/](http://www.iba-protontherapy.com/)

## ***Prise en charge du patient – relationnel***

Cette seconde partie aborde la représentation que se font les TRM de leurs aptitudes relationnelles.

**Tableaux 3 - Analyse des propos recueillis lors des entretiens concernant la prise en charge du patient**

<b>Radiothérapie versus protonthérapie</b>	<p><u>La production du faisceau</u> n'est pas le moins du monde analogue. En réalité, les infrastructures doivent être différentes. Il en va également ainsi des contrôles à effectuer, tâche dévolue non pas aux TRM mais aux ingénieurs de maintenance. Ce qui peut poser problème dans la mesure où ces personnes ne sont pas toujours proches géographiquement et qu'en cas de panne, les appareils, au demeurant tous reliés à un seul cyclotron (COMET), sont totalement immobilisés jusqu'à ce que la panne soit levée.</p> <p><u>Le faisceau</u>, composé de « paquets de protons » présente des caractéristiques différentes de celui utilisé en radiothérapie classique. Il est donc impératif de tenir compte de ces propriétés physiques, notamment l'altération de la qualité du faisceau dans l'air, la portée limitée et l'énergie constante, dans l'élaboration d'une planification de traitement adéquate.</p> <p><u>Le proton et la physique qui y est intrinsèquement associée</u> sont en tous points dissemblables à la physique de la radiothérapie, principalement en raison du rayonnement énergétique du photon et de la nature limitée de la particule d'électron. L'ensemble des bases théoriques assurant la compréhension a, par conséquent, dû être adapté à cette technique de traitement spécifique.</p> <p><u>L'appareillage</u> employé dans le traitement par faisceau de protons est sensiblement éloigné de celui utilisé en radiothérapie conventionnelle. Attendu que la position du patient doit être la plus conforme possible à celle prévue dans le plan de traitement, un matériel de contention solide et efficace est requis. Par ailleurs, la procédure exige deux topogrammes de positionnement afin de vérifier le placement idoine du patient.</p> <p><u>La communication</u>, d'une part avec le patient, et d'autre part avec les corps de métier spécialisés évoluant autour du TRM, est absolument capitale. Le PSI est un centre de recherche international. En tant que tel, la collaboration interprofessionnelle qui y règne s'en trouve renforcée d'autant.</p> <p><u>La précision</u>, véritable fer de lance de la protonthérapie, constitue son essence même. En effet, cette technique s'avère sûre et efficace uniquement lorsqu'il y a adéquation parfaite entre le positionnement réel et celui calculé au moment de la mise en place du traitement. A contrario, une partie du volume à traiter ne le sera pas, et une autre à préserver puisque constituée de tissus sains, sera inutilement irradiée. Les contrôles sont réalisés à différents niveaux et par de nombreux acteurs distincts, mais toujours dans le but d'assurer une irradiation optimale pour le patient.</p> <p><u>La durée de l'examen</u> en protonthérapie est nettement supérieure à celle rencontrée en radiothérapie ; d'environ 30 minutes à une heure contre 5 à 10 minutes. Cette augmentation de temps est intimement liée au nombre de contrôles devant être effectués avant de procéder à l'irradiation. Dans ce domaine d'activité, « tout prend plus de temps », avec l'objectif final de garantir, une fois encore, un positionnement parfait.</p>
--	--

<b>Temps consacré à la prise en charge complète</b>	<p><u>La mise en place du traitement</u>, soit le moulage et la planification dosimétrique, est d'une durée variable selon le cas clinique (localisation, compréhension et collaboration du patient, taille du volume à irradier, conditions de traitement, nombre de champs, etc.). Néanmoins, il faut généralement compter de 30 minutes pour les situations les plus aisées à plus de 120 minutes pour les cas complexes nécessitant une attention toute particulière. Et ce uniquement pour le moulage, c'est-à-dire la recherche d'une position d'équilibre confortable et la mise en place de contentions. Par la suite, il faut compter entre 3 heures de planifications dosimétriques pour les cas les plus élémentaires et plus d'une demi-douzaine de jours pour ceux impliquant des techniciens, des physiciens et des médecins ; par exemple, en cas de localisations inaccessibles, voire dangereuses pour les tissus sains environnants, ou de volumes très importants, voire compliqués techniquement.</p> <p><u>Le traitement</u> à proprement parler dure souvent entre 15 et 30 minutes environ pour un adulte apte à se mobiliser. Ce créneau englobe le temps d'accueil, de préparation du patient, de positionnement complet et d'irradiation comptabilisée. Toutefois, dans certains cas pédiatriques, il est parfois nécessaire d'anesthésier l'enfant avec du Propofol pour l'aider à rester tranquille. Du reste, les positionnements et les contentions pédiatriques sont habituellement plus délicats et complexes à mettre en place. Premièrement parce que l'enfant n'est pas complètement conscient et deuxièmement parce que les localisations (généralement cérébrales, spinales et abdominales) ne sont pas aisément positionnables.</p> <p><u>La communication de confiance</u> avec le patient constitue, comme en radiothérapie classique d'ailleurs, un gage de bonne réalisation du traitement. Si bien que le temps consacré à la communication avec le patient n'est ni écourté ni galvaudé au CPT de Villigen. Avant toute séance de rayons, le TRM discute un bref instant avec le patient à propos de ses ressentis et de son évolution générale. Durant la mise en place et tout au long du traitement, la communication prend une forme plus subtile et indirecte, à grand renforts de signes, de micros et de moniteurs vidéo. Au terme de la séance journalière, le TRM explique au patient le déroulement de la suivante, si celle-ci présente des spécificités particulières.</p>
---	--

<b>Traitements quotidiens</b>	<p>Les traitements quotidiens sont en principe au nombre de 12 ; 16 lors des jours les plus chargés. Ces chiffres correspondent à moins de la moitié de ceux effectués dans les centres de radiothérapie utilisant un faisceau de photons.</p> <p>Au cours du traitement, le technicien en radiologie médicale doit entamer une communication active avec le patient. En effet, comme en radiothérapie, c'est lui qui établit le lien entre « la technique, le malade et le monde médical ». Le fait de parler au préalable avec le patient, de lui expliquer ce qui se passe ainsi que le déroulement de la séance en verbalisant ce qui est ou n'est pas attendu de lui, permet de créer un réel climat de confiance propice à la bonne réalisation du traitement.</p> <p>Avant la séance d'irradiation, un langage adapté au monitoring vidéo (le TRM parle et le patient confirme par signes) va être mis en place. Cette façon de faire permet un double contrôle : premièrement, le TRM vérifie que le patient va bien et que tout se déroule au mieux pour lui, deuxièmement, le patient conscientise le fait qu'il n'est pas seul puisque sous le regard attentif du TRM.</p> <p>Au terme du traitement, le TRM rentre furtivement dans la salle d'irradiation afin de « libérer » le patient de son « armure de contentions ». De plus, lors de l'irradiation, le TRM reste en tout temps très attentif aux besoins du patient, de manière à pouvoir intervenir immédiatement en cas de problème. Ce dernier aspect favorise la bonne collaboration du patient en lui permettant de réaliser qu'il ne se retrouve pas « abandonné » dans la salle.</p>
<b>Pédiatrie</b>	<p>La gestion de <u>l'enfant</u> est une pièce maîtresse du traitement pédiatrique. Environ un quart des traitements réalisés concerne des nourrissons, des enfants ou encore des adolescents. La prise en charge de ce type de patient est particulièrement complexe. Effectivement, dans la majeure partie des cas, soit les enfants jusqu'à 6-7 ans, il est nécessaire d'anesthésier ou, à tout le moins, de séduire l'enfant pour s'assurer d'une collaboration physique optimale. A charge ainsi au TRM de gagner la confiance du petit en lui expliquant la raison de sa présence en ces lieux, en lui montrant la salle et, enfin, en lui présentant les différents acteurs qui évolueront à ses côtés durant son traitement ainsi que leur fonction. C'est à cette condition expresse que le traitement pourra être correctement mené à bien.</p> <p>La gestion de <u>l'entourage</u>, véritable clef de voûte de l'activité du TRM, s'avère, dans le cas particulier de l'enfant, une question plus délicate encore. Est-il judicieux de convier l'entourage et/ou les parents au traitement? Dans le cas du CPT du PSI, hormis les explications techniques et relatives à la prise en charge du patient, son entourage est invité à découvrir les lieux au cours d'une séance d'information tenue par le médecin radiothérapeute. C'est à cette occasion que le médecin répondra aux interrogations et aux questions de l'entourage ; questions auxquelles le TRM n'est souvent pas habilité à répondre.</p>

## **Mise en place du traitement**

Ce troisième volet traite de l'action attendue du TRM dans la mise en place du traitement. En radiothérapie, on parle fréquemment de simulation virtuelle. Or, dans le cadre de la protonthérapie, il serait plus pertinent de parler de mise en place ou de moulage et d'acquisition. Rappelons que cette étape, dans le domaine de la thérapie par radiations ionisantes, fait figure de pierre angulaire de l'activité du TRM. De fait, cette étape fondamentale va conditionner le reste de la planification ainsi que la réalisation du traitement. Fort heureusement, il sera toujours loisible a posteriori d'en modifier les paramètres et les caractéristiques.

**Tableaux 4 - Analyse des propos recueillis lors des entretiens concernant la mise en place du traitement**

<b>Principe</b>	<p>La mise en place du traitement, également connue sous le terme de simulation virtuelle en radiothérapie conventionnelle, se rapporte, dans le domaine ultra-spécialisé de la protonthérapie, au moulage et à l'acquisition tomographique (CT) du corps du patient ainsi que des volumes déterminant la planification dosimétrique (étape suivante).</p> <p>Le principe de cette manipulation est simple :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en position confortable et reproductible du patient.</li> <li>• Création, moulage et adaptation des différentes contentions.</li> <li>• Acquisition volumique, à savoir CT dédié et calibré pour les atténuations protoniques.</li> </ul> <p>Pour le reste, lors de la mise en place, les volumes cibles, c'est-à-dire les zones nécessitant une irradiation thérapeutique, ainsi que les organes à risques, soit les zones exigeant une protection accrue, doivent être délimités par le médecin radiothérapeute.</p>
<b>Positionnement</b>	<p>Le positionnement du patient est fonction quadripartite de son propre confort, du volume à irradier, des organes à risque à préserver et du type de cancer à traiter. Dans la majorité des situations, le patient est placé en décubitus dorsal, avec une mousse sous le dos et une autre sous les genoux, les bras le long du corps, soutenus par des sangles pour limiter les mouvements. On peut ajouter à ce positionnement « standard » un système de porte-empreinte dentaire (le biteblock, qui permet d'assurer l'immobilité de la tête par un système d'aspiration au niveau du palais) ou un masque en composants non-absorbants. Dans certains cas plus spécifiques, le patient peut être positionné en décubitus ventral ou latéral, avec ajout de mousses adaptatives afin d'accroître le confort. Avec l'utilisation d'OPTIS, le patient est en posture assise et regarde un point lumineux prédéfini.</p> <p>Le positionnement tout comme les contentions employées sont essentiellement élaborés et conçus au CPT, d'où l'appellation « Home Made ».</p>

<b>Déroulement</b>	<p><u>Les explications</u> fournies au patient englobent des éléments utiles autant à sa compréhension qu'à sa bonne collaboration, à savoir la durée de la simulation, les variables sur lesquelles il peut agir, le mode de communication, les réponses à de possibles angoisses, etc. Lui seront expliqués à la fois le déroulement complet de cette étape et sa nécessité absolue en vue d'une planification de traitement efficace.</p> <p><u>La mise en position</u> équivaut à une période d'intenses discussions, attendu que le patient va donner des indications pour accroître au maximum le confort de la position qu'il conservera ensuite durant le reste du traitement. Le confort du patient, est presque toujours synonyme de réussite.</p> <p><u>Le moulage</u> est traditionnellement un moment quelque peu stressant pour le patient et pour le TRM. En effet, lors de traitements cérébraux, l'utilisation d'un porte empreinte dentaire ou d'un masque témoigne toujours d'une situation compliquée, inconfortable et stressante tant physiquement que psychiquement pour le patient ; au stress s'ajoutent pêle-mêle un sentiment d'étouffement, d'enfermement, d'angoisse, d'abandon et parfois même des palpitations.</p> <p><u>L'acquisition volumique</u>, elle, est effectuée par un Scanner CT dédié permettant de restituer une image calibrée spécialement pour les protons, étant donné que ces derniers ne révèlent pas le même profil d'atténuation dans la matière que les photons. Cette phase, rarement génératrice de problème(s), est réalisée avec diligence.</p> <p><u>La délimitation primaire</u> est menée à bien par le médecin radiothérapeute juste après l'acquisition tomographique. Ceci avec comme point de mire de déterminer si le positionnement du patient et les contentions utilisées sont compatibles avec le plan de traitement adapté au volume à traiter.</p>
<b>Repères utilisés</b>	<p>A l'inverse des traitements utilisant des photons ou des électrons, l'emploi de repères externes tels que les lasers est vain. Par contre, il peut s'avérer opportun de prendre en compte certaines caractéristiques propres au patient, telles un bouton, une cicatrice ou toute autre marque cutanée. Dans l'optique de disposer d'un repère visuel sur la zone à traiter, pour l'un, et de situer sa position relative par rapport au reste de l'installation, pour l'autre. Avant chaque traitement, une image de positionnement est exécutée, ce qui diminue la nécessité d'avoir recours, comme en radiothérapie classique, à des repères cutanés (point de tatouage, par exemple).</p>



<b>Moulage</b>	<p>Le moulage consiste à stabiliser les contentions permettant au patient d’avoir une position reproductible dans la durée. Cette étape concerne parfois plusieurs contentions.</p> <p><u>Le moulage du maxillaire supérieur</u>, en cas d’utilisation du porte-empreinte dentaire, est réalisé par le truchement d’une pâte bi-composite, semblable à celle utilisée par les dentistes, ainsi que d’un système d’aspiration qui va plaquer et, par conséquent aussi, immobiliser le système au palais du patient.</p> <p><u>Le moulage de la tête, du cou, de l’extrémité d’un membre ou de toute autre localisation</u> est mené à bien grâce à un masque, similaire à ceux employés en radiothérapie par faisceau de photons. Il permettra de limiter fortement les mouvements de la zone qu’il épouse.</p> <p><u>Le moulage du corps du patient ou d’une partie uniquement</u> avec des sacs sous vide contribue à son maintien et son immobilisation correcte.</p> <p>Des combinaisons associant plusieurs de ces contentions peuvent être mises en place.</p>
<b>Difficultés récurrentes</b>	<p>Tant le positionnement que le moulage de patients anxieux ou algiques se révèlent souvent un exercice laborieux. En effet, les contraindre à garder la même position pendant un laps de temps certain, s’apparente souvent pour eux à un vrai chemin de croix. Une communication apaisée et apaisante constitue l’une des clés pour détendre la situation et amener le patient à comprendre la nécessité de cette simulation dans le bon déroulement de son traitement. Dans les cas pédiatriques, comme nous l’avons déjà relevé plus haut, le recours à l’anesthésie est courant mais pas systématique. Ce peut être là une pierre d’achoppement en présence de petits patients turbulents ou ne parvenant pas à garder une position précise.</p> <p>Un autre problème de taille réside dans les caractéristiques du volume à traiter, en fonction de sa localisation ou de ses éléments avoisinants ; d’où quelquefois la difficulté de positionner et de mettre en place efficacement les contentions.</p>
<b>Radiologie</b>	<p>La protonthérapie nécessite une imagerie tomодensitométrique de simulation particulière, ainsi un Scanner CT calibré pour les protons est utilisé. Ce qui signifie que son tube radiologique émet des photons comme, par ailleurs, tout Scanner CT classique. Toutefois, son logiciel garantit une calibration spécifique à la mise en place d’une balistique utilisant des protons.</p> <p>Techniquement, l’utilisation de ce CT s’apparente fortement à celle d’un appareil homologue employé dans le diagnostic ; la nuance repose dans les calibrations qui doivent être effectuées en vue d’obtenir une carte d’atténuation des protons, ces derniers ne réagissant pas de la même façon que les photons dans la matière.</p>

## Planification dosimétrique

Que ce soit en radiothérapie conventionnelle, en brachythérapie ou en électronthérapie, la planification dosimétrique est incontournable. La protonthérapie, quant à elle, ne fait pas exception à la règle. Cette phase considérée comme cruciale est mise en œuvre de concert par divers corps de métier (TRM, physiciens, médecins et ingénieurs). Au cours de la planification dosimétrique, une balistique de traitement est élaborée, testée puis mise en place pour le traitement définitif.

**Tableaux 5 - Analyse des propos recueillis lors des entretiens concernant la planification dosimétrique**

<b>Volumes délimités</b>	<p><u>Les organes à traiter</u> que sont le GTV (Gross Tumor Volume) et le PTV (Planned Target Volume) ainsi que ses marges induites. Ils sont mis en évidence par le médecin radiothérapeute sur les coupes tomodensitométriques et dépendent de la nature de la tumeur, de son agressivité et de sa classification TNM<sup>104</sup> initiale. Les marges, proposées par le médecin radiothérapeute, tiennent compte des caractéristiques de la tumeur (si elle est mobile ou non, la clarté de ses marges, l'évolution du patient, ses marges techniques et la pénombre géométrique du faisceau).</p> <p><u>Les organes à préserver</u>, c'est-à-dire les organes à risque (OAR), qui sont, dans un premier temps, délimités par le médecin radiothérapeute. Par la suite, les délimitations de ces volumes sont vérifiées puis, en cas de besoin, adaptées par le TRM. Les organes à risque dépendent autant de la localisation du volume à traiter que de la radiosensibilité relative de leur structure. Ces OAR présentent des marges respectives se rattachant à leurs caractéristiques propres.</p>
--------------------------	--

<b>Isocentre</b>	<p>En protonthérapie, la planification dosimétrique ne comporte pas d'isocentre tumoral comme en radiothérapie conventionnelle. Partant, l'ensemble du volume tumoral avec toutes ses aspérités est considéré pour proposer une balistique non isocentrique, ce qui signifie que tous les faisceaux n'ont pas forcément un seul point de concomitance ; d'où l'absence de modélisation directe sur le corps du patient. Ce dernier aspect est quelque peu « perturbant » lorsqu'un TRM passe d'une thérapie photonique/électronique à une thérapie protonique impliquant une réflexion différente, tridimensionnelle.</p> <p>Un « réapprentissage » complet s'avère inévitable, ne serait-ce que pour acquérir de nouveaux réflexes et comprendre l'application de cette technique radicalement différente.</p>
------------------	---

<sup>104</sup> Acronyme anglais signifiant Tumor Node Metastasis. Il s'agit d'un système international qui permet une classification des cancers selon leur extension anatomique. La lettre « T » symbolise la tumeur initiale, la lettre « N » dépend de l'envahissement ou non du territoire ganglionnaire et la lettre « M » est à mettre en relation avec la présence ou l'absence de métastases.

<b>Limite des protons</b>	<p>L'utilisation de protons, comme d'autres thérapie, est limitée d'un côté par des facteurs intrinsèques à cette particule singulière et de l'autre par des facteurs extrinsèques liés à l'appareillage ou au patient lui-même. Les protons, particules lourdes chargées positivement, ne <u>traversent pas tous les matériaux de la même manière</u>. Si bien que des matériaux pourvus d'une haute densité volumique vont arrêter le faisceau de protons. L'énergie perdue dans les tissus est donc fonction de leur densité ; et c'est précisément ce que s'évertue à démontrer le modèle de Monte-Carlo. Mutatis mutandis, la portée réelle des protons dans la matière dépend des trois facteurs que sont l'énergie incidente, la composition des tissus traversés et leur épaisseur respective.</p> <p>Pour faire écho aux éléments abordés précédemment, <u>le dépôt de dose maximal, ne se trouve pas invariablement là où logiquement attendu</u>. La raison en est simple : les logiciels de planification de traitement font appel à un système de calcul simplifié par rapport aux algorithmes complexes de Monte-Carlo. Par voie de conséquence, schéma et réalité ne sont pas toujours exactement à l'identique.</p>
<b>Moduler le faisceau</b>	<p>La modulation du faisceau de protons, au niveau de sa forme et de son intensité locale, varie selon la technique d'irradiation utilisée. L'intégralité de ces variations se produit dans le nozzle, pièce terminale du dispositif.</p> <p>Dans le cas du <b>Passive Scattering</b>, <u>une roue en rotation</u> (Range Modulator Wheel) permet de disperser le pic de Bragg jusqu'à obtenir une surface plutôt qu'un point. (Spread Out Bragg Peak). <u>Des systèmes de diffusion</u>, connus sous le nom de « First et Second Scatterer »<sup>105</sup>, servent ensuite à diffuser le faisceau en un champ de grande taille tout en conservant son homogénéité. Puis, un collimateur (Aperture) redimensionne le champ. Un compensateur (Compensator) est finalement appliqué afin de conformer précisément la dose en profondeur, à l'aide d'épaisseurs variables et dans l'ombre du champ à traiter.</p> <p>Pour ce qui a trait au <b>Spot-scanning</b>, <u>deux aimants</u> ou dipôles magnétiques s'occupent d'incurver le faisceau de protons horizontalement et/ou latéralement. En prime, <u>des plaques</u> (40) en polycarbonate de 4 mm d'épaisseur viennent moduler sa portée.</p>
<b>Toxicité</b>	<p>Les effets entraînés par une irradiation protonique correspondent, peu ou prou, à ceux entraînés par une exposition lors de traitements plus conventionnels. Exception faite des tissus cutanés qui réagissent plus violemment et plus durablement. Ainsi, le crâne présentera plus rapidement une alopecie localisée définitive, contrairement à celle, temporaire, observable en radiothérapie classique. Ceci tient au fait que le proton est une particule et que le photon est une onde électromagnétique. Pour terminer, ajoutons encore que les effets constatés sur les tissus d'entrée diffèrent, quand bien même la dose de protons délivrée à l'entrée soit inférieure à celle de photons, particules épargnant davantage les tissus humains.</p>

<sup>105</sup> Se référer à la figure 12 qui explicite cette notion à la section *Techniques d'irradiation* du chapitre TECHNIQUE ONCOLOGIQUE.

<b>Tumeur traitable</b>	<p>Voici les caractéristiques que doit présenter une tumeur pour qu'elle puisse être prise en charge et traitée en protonthérapie :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Etre <u>radiosensible</u> aux protons. Le Professeur Weber affirme que tout tissu est radiosensible mais que cela dépend de la dose administrée. Toute la subtilité consiste à ce que le volume traité, à irradiation la plus faible possible, réponde suffisamment. Le fait d'augmenter la dose sur le volume à traiter va indéniablement l'accroître sur les autres structures. Il convient donc de trouver un compromis acceptable, à mi-chemin entre le trop et le trop peu.</li><li>- Etre <u>accessible</u>, dans le sens où il doit être possible de l'irradier correctement tout en préservant au maximum les tissus sains environnants ainsi que les organes à risque particulièrement radiosensibles. Au demeurant, il est capital de parvenir à trouver un positionnement approprié permettant de placer le volume tumoral au plus près du nozzle, dans le but de limiter la projection des protons tant dans l'air que dans la matière saine.</li></ul> <p>En dernier lieu, sur un plan plus administratif, <u>la tumeur à traiter doit faire partie intégrante du listing établi par l'organe de régulation de l'Etat</u>. Ce listing repose sur des critères internes stricts, à savoir, entre autres, une impossibilité de traitement avec une modalité différente ainsi qu'un bénéfice scientifiquement documenté et cliniquement prouvé, attestant simultanément l'acceptation préalable de la prise en charge du traitement et le suivi du patient par un médecin radiothérapeute du PSI, spécialiste en protonthérapie.</p>
-------------------------	--

## Traitement

La réalisation du traitement est l'aboutissement de toute la procédure de mise en place du plan de traitement. De ce fait, cette étape doit être réalisée dans les meilleures conditions possibles. C'est une période riche en échanges de toutes sortes entre le corps médical et le patient.

**Tableaux 6 - Analyse des propos recueillis lors des entretiens concernant le traitement**

<b>Mise en place</b>	<p>Il faut que le positionnement imposé au patient pour les séances d'irradiation soit strictement identique à celui élaboré lors de la mise en place du traitement ou simulation virtuelle. La reproductibilité du positionnement est le fil conducteur de l'ensemble du traitement. S'il est mal effectué au départ, cela posera problème tout au long et jusqu'au terme du traitement.</p> <p>Des conditions semblables s'appliquent aux contentions, pour lesquelles il convient de s'assurer qu'elles ne se déforment pas, ne s'altèrent pas et gardent en permanence l'efficacité escomptée.</p>
<b>Contrôle de la position</b>	<p>Avant chaque irradiation thérapeutique, on procède à deux <u>topogrammes</u>, un latéral et un antéro-postérieur, afin de mettre en parallèle la position du patient avec les images de référence réalisées lors du Scanner CT de simulation. Subséquemment, ces deux images vont être attentivement comparées, à l'œil nu et à l'aide d'un logiciel vectoriel, dans le but de recalculer correctement le patient.</p> <p>En combinant <u>positionnement adéquat et contentions contraignantes</u>, on s'approche ainsi au plus près de la position définie lors de la phase de planification du traitement. Périodiquement, soit environ une fois toutes les deux semaines, un <u>Scanner CT</u> est effectué pour rendre compte à la fois de la position et de l'évolution des structures internes.</p>
<b>Recalage du patient</b>	<p>Le recalage, à savoir le déplacement en entier du patient pour obtenir une position spatiale idoine, exige deux topogrammes de référence (AP et LAT). Sur ces images, et notamment dans la table, les structures générales du patient et les structures tumorales, sont disposés divers points de repère. Le TRM pourra ainsi les retrouver avant chaque irradiation. Cette façon de faire présente le double avantage de pouvoir déterminer si le patient adopte une position générale correcte, c'est-à-dire un placement idéal par rapport à la table, et si le volume tumoral se trouve dans les mêmes conditions spatiales que lors de la simulation virtuelle. Une fois les points apposés sur les images du jour, un diagramme statistique propose des déplacements de table millimétriques permettant d'ajuster la position du patient.</p> <p>Ces manipulations terminées, une nouvelle image superposant les deux images précédentes vient mettre en évidence les possibles variations entre ces deux positions. En fin de compte, avant de commencer la séance d'irradiation, le TRM accepte le positionnement ou en réalise un nouveau.</p>

<b>Partage du faisceau</b>	<p>Le partage du faisceau n'est pas une problématique inhérente à la radiothérapie externe, utilisant des photons ou des électrons, l'accélérateur étant propre à chaque appareil. En protonthérapie, en revanche, il n'existe qu'un seul accélérateur de particules relié à tous les autres appareils de traitement répartis dans trois salles de traitement indépendantes.</p> <p>La nécessité de réfléchir en amont s'impose donc d'elle-même. Il faut en particulier garder à l'esprit où les autres appareils en sont dans leur irradiation. Ce qui présuppose de s'arranger temporellement pour que les traitements n'aient pas à être effectués simultanément. Partant, on veillera à calquer l'activité d'un post de traitement sur celle d'autres en vue de limiter autant que faire se peut l'attente du patient.</p> <p>Le partage du faisceau entraîne une contrainte de taille ; en cas d'incident ou de panne technique du cyclotron, c'est la totalité de l'activité de traitement du centre qui peut se retrouver paralysée.</p>
----------------------------	--

## Activité professionnelle

Voici comment les Techniciens en Radiologie Médicale au Centre de Proton Thérapie de l'Institut Paul Scherrer se représentent leur activité.

**Tableaux 7 - Analyse des propos recueillis lors des entretiens concernant l'activité professionnelle**

<b>Qualités prêtées au TRM</b>	<p>Conformément aux propos recueillis, il ressort que le TRM est doté des qualités suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>La motivation, l'empathie et la gentillesse</u>, qui sont des ingrédients tout à fait incontournables dans le domaine du traitement du cancer. L'évidence veut que les situations vécues par les patients soient souvent très difficiles à gérer convenablement pour le corps médical. La plupart du temps, les patients se confient aux TRM, en raison de leur accessibilité et du lien qu'ils établissent entre eux-ci et le monde médical. En outre, la plupart des traitements s'étale sur une période assez longue pouvant durer plusieurs mois. Une véritable relation de proximité va se nouer entre le patient et le TRM. Etant donné qu'une part considérable des patients traités sont des enfants, il est parfois « excessivement difficile » pour le praticien de prendre en charge ces personnes dont le destin et les souffrances résonnent en son for. Fort heureusement, l'immense majorité des thérapies ont une visée curative, ce qui apporte au TRM une grande satisfaction, tant sur le plan personnel que professionnel.</li> <li>- <u>Une ouverture d'esprit</u>, qui participe de l'essence même du CPT du PSI eu égard à sa position en tant qu'institut de recherche. Son matériel et ses infrastructures ne sont absolument pas standardisés. A charge donc au TRM de s'habituer à travailler avec du matériel qui n'est pas issu de la « grande distribution » et de s'adapter constamment aux nouvelles conditions rencontrées.</li> </ul>
<b>Activité du TRM</b>	<p>Une multitude de facettes compose l'activité du TRM en protonthérapie en fonction des intervenants. Nous pourrions le décrire comme suit : <u>un métier combiné à beaucoup d'autres métiers qui s'imbriquent les uns dans les autres</u>. Il peut notamment s'agir de tâches administratives comme donner des rendez-vous, s'occuper de la facturation, faire le coursier, ou de tâches techniques comme la manutention de la machine, l'assistance aux physiciens et aux ingénieurs. Les relations humaines et sociales ainsi que les activités propres au TRM comme l'utilisation du CT, la fusion intermodalitaire et l'interprétation du résultat en représentent également un pan important.</p>

## Perspectives

Le domaine de la radiologie, à l'instar de celui de la radiothérapie et, plus particulièrement, de la protonthérapie, est soumis à d'incessantes évolutions techniques, matérielles et conceptuelles.

**Tableaux 8 - Analyse des propos recueillis lors des entretiens concernant les perspectives**

<b>Gating</b>	<p>A l'heure actuelle, il n'est malheureusement pas possible de synchroniser l'irradiation sur la respiration du patient, comme cela se fait déjà en radiothérapie classique. Le problème réside dans l'impossibilité de couper et de reprendre très rapidement l'irradiation, à volonté ; notamment en raison du temps qui s'écoule entre l'activation du faisceau et sa distribution. Utiliser la technique du Spot-Scanning et des plaques mobiles pour pratiquer une telle opération serait d'ailleurs fort judicieux.</p> <p>A ce propos, des recherches sont menées actuellement par une équipe de TRM et de spécialistes. Les tout premiers essais pourraient débuter vers la fin 2014.</p>
<b>Gantry 3</b>	<p>Une troisième Gantry est en phase de construction et l'excavation prévue pour accueillir cette infrastructure est désormais achevée. Elle devrait inclure un système de Cone Beam CT intégré permettant de limiter considérablement les déplacements entre le contrôle de la position et le lieu d'irradiation ainsi qu'un système de Beam Scanning.</p> <p>A terme, ce nouvel appareil permettra une meilleure rapidité d'exécution des traitements grâce aux nouveautés technologiques proposées par Varian et IBA, mais toujours dans le respect des spécificités du PSI.</p>

## Observation

Tout au long de ce travail de recherche, un certain nombre de périodes d'observation ont été menées. Consécutivement, des tableaux thématiques synthétiques, intégralement présents dans l'annexe III, ont été créés. Pour la mise sur pied optimale de ces tableaux d'observation, la technique protonique a été minutieusement comparée avec celle utilisée en radiothérapie.

La section suivante intitulée « Activité du TRM en protonthérapie » synthétise les éléments retenus durant ces périodes d'observation.



## *Activité du TRM en protonthérapie*

Nous avons décidé de mettre en lien l'activité du TRM en protonthérapie avec nos connaissances en radiothérapie conventionnelle issues de notre formation, de notre pratique et de nos lectures. A la faveur de nos observations ainsi que des discussions et interviews réalisées, nous sommes en mesure d'explicitier et de déterminer précisément l'activité du technicien en radiologie médicale dans la sphère ultra spécialisée de la protonthérapie.

L'activité du TRM telle que décrite dans les paragraphes ultérieurs est celle accomplie par les praticiens du centre de protonthérapie de Villigen. Les propos exprimés ne sont pas tous transposables en l'état aux professionnels d'autres centres de protonthérapie. Le CPT du PSI, fort de son statut international et de sa remarquable capacité d'adaptation, surclasse, au niveau de sa pratique, maints autres centres à caractère privé ou universitaire. Du reste, le PSI en sa qualité de centre de recherche, s'appuie sur des infrastructures et un personnel en constante évolution, dans un milieu dominé par le « Home Made » et où les productions standardisées demeurent l'exception.

### **Relationnel**

Quelles que soient les actions du technicien en radiologie médicale, une qualité qu'il se doit de posséder est sans nul doute le relationnel. Au fond, le TRM est avant tout un soignant qui, aussi bien lors d'examens diagnostics et interventionnels que de thérapies, se retrouve en contact direct avec des patients comme avec d'autres professionnels du monde de la santé. Il doit ainsi avant tout être en mesure d'établir une relation professionnelle authentique avec son entourage.

### ***Communication***

Qui dit relation, dit communication, verbale ou non-verbale. Au fil de sa pratique en protonthérapie, le TRM est confronté à des patients atteints de maux que, communément, ils ne parviennent pas à accepter. Cet état de fait conduit souvent à de longs monologues de la part du patient et auxquels le TRM assiste, impuissant. Malgré toute sa bonne volonté et sa foi impérieuse en la vie, il doit accepter de ne parfois pas pouvoir apporter un réel soutien au malade qui en a besoin. En dépit de cette limite d'action, le TRM en protonthérapie a la responsabilité, pour ne pas dire le devoir, d'accompagner le patient et sa famille. Famille qui ne comprend d'ailleurs pas toujours l'avantage d'utiliser une technique nécessitant un nombre

aussi conséquent de séances d'irradiation. Il faut que le TRM, se fiant à sa vision panoptique de la situation du patient, conscientise sa capacité à apporter de l'aide, dans la mesure de ses compétences et de ses possibilités.

Pendant les séances d'irradiation, le technicien a la possibilité de communiquer directement avec le patient. Effectivement, lors de la mise en place du traitement, un langage est convenu entre les deux parties. D'une part, le praticien parle au patient à travers le micro et, d'autre part, celui-ci répond par une série de signes pour communiquer son état ou faire part d'un éventuel problème. De cette manière, au fil des séances, une véritable relation de nature thérapeutique se tisse entre le technicien et son patient, base d'une solide confiance entre les deux individus. Le patient prend acte du fait que le TRM se trouve derrière ses écrans et qu'il est prêt à intervenir en cas de danger. De même, le technicien s'assure que le patient ne montre aucune hésitation à communiquer, ce qui limite d'autant le risque de rencontrer un problème quelconque.

### ***Esprit d'équipe.***

Le Centre de Protonthérapie au sein duquel les observations ont été conduites fait partie d'un centre de recherche de grande envergure : l'Institut Paul Scherrer. Par voie de conséquence, les corps de métier qui y cohabitent sont aussi nombreux que variés. Parmi ces professionnels, se trouvent d'ordinaire des techniciens en radiologie médicale, des infirmiers, des anesthésistes, des médecins radiothérapeutes, des oncologues, mais aussi des ingénieurs, des physiciens ou encore des électriciens. On y croise également des personnes en formation, en cours de recherche et même en phase de découverte. Inutile de préciser que l'activité du TRM s'exprime dans la complémentarité et le prolongement de la pratique de tous ces autres collaborateurs avec, comme fil conducteur, une bienveillance manifeste envers le patient.

### **Capacités techniques**

Comme nous l'avons déjà mentionné plus tôt, l'utilisation de protons dans le traitement du cancer diffère à maints égards de la technique photonique ou électronique. Partant, il appartient au TRM d'acquiescer quantité d'automatismes spécifiques à cette technique ultra spécialisée. La particule à laquelle il est fait recours n'étant pas la même, il convient d'adapter en conséquence les infrastructures et les protocoles techniques et cliniques.

Hormis l'acquisition des connaissances théoriques sur les protons, tels leur mode de production, leur acheminement, la modulation du faisceau incident et les interactions entre particules et matière, le TRM se doit d'avoir une maîtrise totale des infrastructures, du matériel à disposition et des protocoles en vigueur.

### ***Gestion des infrastructures à disposition***

La protonthérapie nécessite un appareillage et des infrastructures sensiblement différents à ceux mis en œuvre en radiothérapie classique. Par ailleurs, leur volume est aussi nettement supérieur. Il incombe donc au TRM de s'habituer à ce nouveau matériel à portée de main.

Parmi les divers outils que le TRM doit être en mesure de maîtriser, l'un des plus importants est la Gantry. Très lente, lourde et précise, elle se manie avec une extrême précaution et requiert des contrôles réguliers. Elle n'est, en soi, pas beaucoup plus compliquée à manipuler qu'un LINAC de dernière génération. Cependant, son poids imposant, et dès lors son inertie induite, ne doivent pas être négligés ; sous peine de conséquences et de dégâts considérables dans l'éventualité d'une collision avec une autre structure (table de traitement, chariot métallique, instruments, table de transport du patient, etc.) ou avec le malade lui-même.

Pour déplacer le patient, il faut que le technicien emploie une table mobile motorisée qui transporte le malade de la salle de préparation au Scanner CT de mise en place puis sous la Gantry pour la phase de traitement. La mobilisation de cette structure est relativement aisée, nonobstant le temps souvent conséquent, de l'ordre du centimètre par seconde environ, pour acheminer le patient d'un lieu à l'autre. La principale raison de la faible vitesse de déplacement de la table tient au fait qu'en cas d'à-coup, dû à un freinage ou à un heurt, la position du patient pourrait s'en trouver modifiée.

### ***Gestion du partage du faisceau***

Compte tenu de la disposition du centre, doté d'un seul accélérateur de protons pour deux Gantries et un faisceau horizontal, il est impensable de traiter dans plusieurs salles simultanément. Et pour cause, le cyclotron n'est pas apte à délivrer plusieurs faisceaux en même temps. Dès lors, chaque technicien adapte son activité en fonction du temps de faisceau disponible, ce qui a pour corollaire logique d'imposer un rythme à mille lieues de celui prévalant en radiothérapie classique. Il s'avère indispensable pour les TRM d'avoir un moyen sûr de connaître l'état d'avancement des autres sites de traitement. D'où l'impérative

nécessité de comprendre ce que chaque collègue entreprend sur son site et de connaître avec précision le temps qu'il a prévu pour mener à bien son intervention.

L'activité du TRM sur la journée s'en trouve modulée et les traitements sont agendés en alternance, ce qui permet d'irradier, c'est-à-dire d'utiliser du temps de faisceau, sans perturber le travail dans les autres salles de traitement.

## **Préparation du traitement**

Le processus comprenant la mise en place du traitement ainsi que sa planification est certainement l'un des plus gourmands en temps pour les TRM. Sa réalisation efficace est le gage d'un traitement couronné de succès. En conséquence, les professionnels s'attelant à cette délicate et fastidieuse tâche possèdent une énorme expérience ainsi qu'une excellente maîtrise des protocoles ayant cours dans le service.

Dans certains cas, et selon l'usage, il est nécessaire d'endormir temporairement le patient avant de procéder à la création et à la mise en place des contentions. Cette procédure est monnaie courante lors de traitements pédiatriques où une immobilité exemplaire du patient est difficilement exigible et, surtout, atteignable. Une décision de ce type est prise d'entente avec le(s) médecin(s) radiothérapeute(s) et le(s) médecin(s) anesthésiste(s).

## ***Moulage***

Le moulage est une étape charnière puisqu'il garantit un positionnement idéal d'un bout à l'autre du traitement. Cette phase peut se révéler anxiogène pour le patient dans la mesure où on lui demande d'adopter un positionnement aussi confortable que reproductible. A charge au TRM d'aider le patient à se positionner et d'appliquer des contentions adaptées. Le choix des contentions s'opère en amont de la procédure. Néanmoins, elles seront modelées et ajustées à la morphologie du patient en vue d'obtenir des supports contraignants empêchant les mouvements, volontaires ou non, lors du Scanner CT de simulation, puis, par la suite, lors des irradiations thérapeutiques.

Avant d'effectuer l'imagerie de simulation à proprement parler, il faut éprouver mécaniquement les contentions mises en place sur le patient. Une fois ce test réussi avec brio, la position en question va être référencée sous forme de descriptions et d'images numériques, dont l'accès sera exclusivement réservé aux praticiens du centre de protonthérapie.

### ***Processus dosimétrique***

Une fois ces divers processus menés à leur terme, un Scanner CT de positionnement, à savoir une hélice tomодensitométrique, est encore requis. Ce dernier va donner tout son sens aux étapes précédentes. En effet, à partir des coupes obtenues, les volumes cibles et les organes à risque pourront être délinéés. Peu après, et toujours grâce à ces images radiologiques, une balistique<sup>106</sup> adéquate va être mise en place. Finalement, la robustesse du plan de traitement sera testée virtuellement.

A l'issue du processus dosimétrique, dont la durée totale varie de 1 à 15 heures, les derniers paramètres relatifs au bon positionnement du patient vont être réglés au cours d'une ultime étape de finalisation. Les représentations en projection, les fameux Beam's Eye View, ainsi que les topogrammes du Scanner CT de simulation y joueront un rôle déterminant. Sur ces images finales, la schématisation des structures assurant le positionnement optimal est obtenue à l'aide de points de référence de couleur.

### **Traitement**

Le traitement est à n'en point douter la pièce maîtresse de l'ensemble de la procédure de lutte contre le cancer. C'est durant cette étape qu'a lieu l'irradiation, légitimant dans la foulée le processus dosimétrique et la mise en position. Comme indiqué préalablement, le traitement en tant que tel constitue généralement une période angoissante pour le patient qui réalise à ce moment-là l'importance de son immobilité ainsi que son isolement, même temporaire. A la faveur des bons soins de l'équipe de techniciens et de médecins, les séances se déroulent sans anicroches et dans un climat de saine confiance mutuelle.

Un traitement standard débute par la mise en position du patient, conformément aux caractéristiques définies pendant la simulation virtuelle (contentions, position et table mobile). S'ensuit le déplacement du patient vers la salle du Scanner CT, dont la mission est de confirmer sa position (irradiation, comparaison des images, mise en corrélation). Puis, pour finir, le patient est acheminé vers la Gantry pour y être irradié.

---

<sup>106</sup> Composée du nombre de champs, de leur inclinaison, de la dose et, par conséquent, du nombre de Spots délivrés.

### **Première séance de rayons**

Au cours de la toute première séance, il est nécessaire, pour ne pas dire indispensable, d'effectuer une image tomodensitométrique qui servira à évaluer une potentielle évolution entre le Scanner CT de simulation et la première irradiation. Grâce à cette image, le TRM vérifie que les volumes cibles<sup>107</sup> délinés, en cours de planification de traitement et ceux obtenus lors de la première séance de rayons, respectent l'anatomie du patient.

Une fois la position du patient acceptée par le TRM, le médecin radiothérapeute et le physicien médical, on peut, à l'aide de la table mobile, procéder au déplacement du malade jusqu'à la Gantry. Sur place, le système se met automatiquement en position de traitement et le technicien contrôle une seconde fois la position en utilisant, cette fois-ci, l'imagerie embarquée. Cette image permet d'établir si un mouvement significatif s'est produit entre le Scanner CT et la position de traitement. Le TRM explique ensuite au patient le déroulement de l'irradiation et fait les recommandations d'usage.

L'irradiation achevée, le médecin radiothérapeute prend un peu de temps pour discuter avec le patient de façon à répondre à ses questions et/ou à ses angoisses ; il en profite également pour vaquer à certaines tâches administratives d'importance.

### **Positionnement**

La position imposée au patient lors de l'irradiation est strictement identique à celle prévue lors de la simulation virtuelle. Dans le même ordre d'idées, les contentions, la position corporelle et les accessoires lui sont familiers.

S'il éprouve tout de même certaines difficultés à se conformer à cette position, il est possible, par le biais de l'imagerie pré-irradiative, de recourir à une dosimétrie adaptative tenant compte de la nouvelle mise en place.

Une fois bien positionné, le patient est déplacé avec la table mobile motorisée vers le Scanner CT de positionnement où deux topogrammes, un latéral et un de face, vont être réalisés. Ces images viennent corrélérer quantité de points, référencés dans la table<sup>108</sup>, dans les structures anatomiques locales<sup>109</sup> du patient et dans les structures adjacentes aux dispositions

---

<sup>107</sup> Volume tumoral cible et organes à risque.

<sup>108</sup> Relation entre la position du patient et la table : le patient est-il correctement installé par rapport à la table de traitement ?

<sup>109</sup> Pour la position générale du patient : est-il dans la bonne position ?

tumorales. Le TRM déterminera si les points relevés au moment de la planification dosimétrique coïncident avec ceux obtenus lors de l'image du jour. Si, par recalage et modélisation graphique, des variations sont mises en lumière, et pour autant qu'elles se situent dans une marge de tolérance acceptable, le patient peut encore être déplacé sous la machine avant le début du traitement. Les décalages sont illustrés par des gradients de couleur représentant le taux de variation par rapport aux structures de référence.

### ***Suivi de l'irradiation***

Après avoir mis le patient en place sur la table et fermé les portes blindées, l'irradiation thérapeutique peut enfin commencer. Avant toute chose, il faut amener la Gantry et le patient aux coordonnées spatiales requises pour le traitement. Cette étape peut se faire directement dans la salle.

Une fois le tout en position, le TRM prévient le patient du début de l'irradiation au moyen d'un système audio placé à proximité et auquel il répondra par signes. Le praticien gardera, tout au long de l'irradiation, pour parer à toute éventualité, à la fois un œil sur le malade et sur son monitoring. Durant l'irradiation, une représentation graphique des Spots<sup>110</sup> sur le champ de traitement est visualisable, ce qui permet, en cas de problème, d'arrêter sans délai l'irradiation.

### ***Optimisation du traitement***

Etant donné que les Gantries et le faisceau horizontal sont tributaires d'un faisceau de protons provenant de la même source, soit du cyclotron COMET, cela rend plusieurs irradiations simultanées impossible. Toute la subtilité réside donc dans l'organisation du workflow d'après cette contrainte. D'où, notamment, le nombre très restreint de patients.

Dans le but d'optimiser les séances de traitement, les périodes d'irradiation sont agencées de façon à ne jamais se superposer.

---

<sup>110</sup> Paquets de protons constituant le faisceau.

De fait, un horaire approprié pour une matinée de traitement pourrait, par exemple, être celui proposé, par nos soins à la suite des observations effectués, dans le tableau numéro 9 reprenant conjointement les trois salles de traitements.

**Tableau 9 - Simulation d'un horaire matinal**

	09.00	09.20	09.40	10.00	10.20	10.40	11.00	11.20	11.40
GTN 1	MeP	TTT	MeP		TTT	MeP		TTT	MeP
GTN 2	MeP		TTT	MeP		TTT	MeP		TTT
OPTIS	TTT		MeP	TTT		Mep	TTT		Mep

Dans ce tableau, les termes GTN correspondent aux Gantries 1 et 2, **TTT** aux irradiations et **MeP** à la mise en place du patient. On constate que le temps dévolu aux mises en places est raccourci de moitié sur le faisceau horizontal de l'OTPIS.

Par le truchement d'un système de communication entre les salles de traitement, composé d'interphones et de caméras vidéo, chaque praticien a la possibilité de suivre en direct le déroulement des mises en place et des irradiations des pièces annexes. Les rendez-vous et le temps à disposition sont ainsi clairement optimisés.



## ACTIVITE DU TRM EN PROTONTHERAPIE VERSUS ACTIVITE DU TRM EN RADIOTHERAPIE

Les avis du Professeur D.C. Weber et ceux des TRM en protonthérapie concernant leur activité divergent fondamentalement. Il nous a confié, lors de l'entretien accordé, que l'activité et les fonctions du TRM sont identiques (un véritable « copié-collé ») à celles que connaît le TRM en radiothérapie classique. Toutefois, les TRM nous ont montré qu'elles étaient loin de l'être.

Cette divergence d'opinion a permis de mettre en évidence la profonde ressemblance des grandes lignes de l'activité, en tout cas au niveau de ses étapes principales. Inversement, les actes exécutés durant ces processus, eux, diffèrent singulièrement.

Ce chapitre tente d'apporter un éclairage sur les disparités ainsi que les similitudes entre l'activité du TRM en protonthérapie et son activité en radiothérapie. Les propos reportés tiennent autant compte des aspects abordés dans les entretiens que des observations menées au sein de ces deux domaines thérapeutiques.

### *Pratique du technicien en radiologie médicale*

Quid tout d'abord des dissemblances entre la pratique du TRM en protonthérapie et en radiothérapie ? Si, au sens large, elles se ressemblent passablement, principalement au point de vue administratif, elles présentent néanmoins des inégalités certaines quant au temps accordé au traitement et à la prise en charge globale du patient.

## **Durée des actes**

La durée de l'intégralité des processus jalonnant un traitement protonique complet, à l'inverse de celle d'un traitement par photons ou électrons, est sensiblement plus importante. En cause, l'obligation d'atteindre une précision extrême ainsi que l'utilisation des protons eux-mêmes.

En premier lieu, le positionnement du patient à l'aide de contentions adaptées exige un temps conséquent, attendu que cela implique de retrouver la position correcte et de lui assurer confort et sécurité.

Plus tard, il faut encore vérifier et confirmer l'exactitude du placement du patient sur la table par rapport aux coordonnées de traitement. Ce recalage est une opération chronophage, étroitement liée à l'immobilité du patient ; sans parler des conséquences plus ou moins fâcheuses que cela peut engendrer.

Une fois la position confirmée, le patient doit être conduit sous l'appareil de traitement. Cette durée de déplacement varie d'une salle de traitement à l'autre. Ainsi, pour l'OPTIS, elle est quasiment nulle puisque le contrôle est effectué sous la machine. Pour la Gantry 1, en revanche, il faut compter environ 6 minutes ; moitié moins pour la Gantry 2.

L'irradiation thérapeutique requiert un temps manifeste en raison de la multitude de champs à effectuer comme du nombre de spots prescrits pour traiter avec succès. Au surplus, il est indispensable de communiquer avec le patient à intervalles réguliers, en particulier lors des déplacements de la machine, afin de s'assurer que tout se déroule au mieux pour lui.

La radiothérapie classique, royaume des photons ou des électrons, connaît une durée totale largement inférieure. Cela s'explique premièrement par la mise en place directe sous la machine et deuxièmement par la conformation particulière du champ à traiter. L'irradiation, elle aussi, est bien plus brève.

## **Précision accrue**

La précision dans la mise en place du traitement et au moment de l'irradiation est sans conteste un gage de réussite de l'ensemble du traitement. L'utilisation d'une double image de mise en place, à savoir deux topogrammes, un latéral et un autre antéro-postérieur, aide à

déterminer si le patient occupe une position idoine. Un logiciel modélisant des points de référence sur le patient et sur la table, lui, quantifie de possibles déplacements.

A travers des contrôles répétés de la qualité et de la conformité des images ainsi que de la position de la table sous la machine, on s'assure que l'irradiation thérapeutique se déroule dans les meilleures conditions qui soient.

Enfin, la position présente une précision de l'ordre du millimètre, tandis qu'en radiothérapie, elle est d'environ 3 à 5 mm selon la disposition du volume à traiter.

### **Technique oncologique**

L'emploi de protons, dans les limites de l'irradiation thérapeutique, apporte un bénéfice indéniable. Toujours est-il que le technicien doit, au préalable, acquérir un certain nombre de connaissances afin d'être parfaitement au clair avec la technique oncologique, les systèmes de modulation et la représentation des spots, ces derniers pouvant indiquer une défaillance du système.

Le partage du faisceau est également une notion propre à la protonthérapie et avec laquelle il faut composer quotidiennement.

### **Sollicitation des praticiens**

En protonthérapie, le nombre maximum de patients traitables au cours d'une journée normale est d'environ 16, soit à peu près un toutes les 30 minutes. Pour rappel, en radiothérapie, ce chiffre est presque doublé durant des journées considérées comme ordinaires. Cela s'en ressent sur la qualité, du moment que le temps de traitement à disposition est, dans la majorité des cas, amplement suffisant ; souvent même, le TRM dispose d'un appréciable surplus de temps qu'il saura mettre à profit dans son travail.

Comme nous en avons fait état auparavant, le workflow est organisé de manière à respecter la contrainte liée au partage du faisceau. Le tableau 9 résume une matinée type, telle qu'elle pourrait se présenter en cas d'affluence importante.

Il convient encore d'ajouter que le ratio entre l'effectif de TRM en fonction et celui des patients est nettement supérieur en protonthérapie. De fait, par salle de traitement, on

dénombrer 3 techniciens pour s'occuper d'un patient. La charge de travail s'en trouve ostensiblement diminuée, ce qui renforce également d'autant l'attention constante de chacun des praticiens.

## **Collaboration interprofessionnelle**

Le Centre de Proton Thérapie, par sa collaboration étroite et active avec le centre de recherche du PSI, concentre une foule de professions différentes. Simplement dans le cadre de traitements standards, se côtoient des techniciens en radiologie médicale, des médecins radiothérapeutes, des aides, des médecins et infirmiers anesthésistes, des ingénieurs, des physiciens et du personnel de l'administration. Et ce n'est pas tout. Très régulièrement, des groupes de formation viennent participer à des périodes d'observation. Il en résulte que l'équipe médicale dans son entier est souvent mise à contribution pour expliquer cette méthode de traitement atypique.

## *Patient*

### **Pathologie**

Les pathologies dont souffrent les patients s'avèrent aussi variées que complexes à traiter. En effet, les caractéristiques des tumeurs rencontrées excluent généralement tout recours aux photons. En conséquence, et comme précisé par l'ordonnance du DFI sur les prestations dans l'assurance obligatoire des soins en cas de maladie (OPAS, 832.112.31)<sup>111</sup>, les volumes traitables par faisceaux de protons sont précisément ceux se soustrayant à la méthode conventionnelle.

Le pendant est que le technicien se retrouve couramment en face de personnes souffrant de maux confus et dont ils ne comprennent pas toujours tous les tenants et les aboutissants. Contrairement aux traitements par photons où les procédures sont standardisées, de telle sorte que le patient peut entreprendre par lui-même des recherches sur la maladie dont il est atteint.

---

<sup>111</sup> Voir annexe II

## **Pédiatrie**

Une proportion élevée du nombre de patients traités par faisceau de protons sont des enfants ou des jeunes adolescents. Leur organisme présentant une importante radiosensibilité aux radiations, la dose totale administrée doit être la plus faible possible ; ce qui implique aussi une conformation au volume cible à l'avenant, c'est-à-dire aussi parfaite que possible.

De ce fait, une frange des patients présentant des tumeurs pédiatriques est orientée vers la protonthérapie afin d'y suivre un traitement adapté.

Comment parler d'enfants sans parler de leur entourage ou des adultes les encadrant ? Habituellement, la communication avec ces tierces personnes connaît quelques difficultés. En protonthérapie, ces échanges s'établissent plus naturellement. Dans la plupart des traitements pédiatriques, les jeunes patients sont d'abord anesthésiés avec du Propofol. Pour ce faire, il est impératif qu'une équipe d'anesthésistes spécialisés en pédiatrie investissent le terrain.

Le TRM étant fréquemment en contact avec ce type de patient, il lui faut inévitablement développer bon nombre d'aptitudes de communication et de collaboration, non seulement avec l'enfant mais aussi avec son entourage.

## CONCLUSIONS

Dans cet ultime volet, nous nous attèlerons premièrement à rendre compte des principaux résultats de notre recherche. Nous reviendrons ensuite sur les interrogations mises en évidence dans la partie introductive de notre travail, ces dernières étant intimement liées à notre question de départ. Finalement, nous nous efforcerons d'exprimer un point de vue plus personnel sur la façon dont nous avons vécu cet apprentissage initiatique dans le domaine de la recherche scientifique.

### *Principaux résultats de la recherche*

Le travail présenté au fil de ces pages cherchait à mieux comprendre l'activité du TRM en protonthérapie. A partir d'entretiens semi-directifs alliés à une observation non-participante ainsi que de concepts propres à cette approche issus du monde scientifique, nous avons pu établir que la radiothérapie par faisceau de protons constituait une branche de la radiothérapie qui poussait la technicité à l'extrême. Nous avons en particulier remarqué que chaque acte concret, chaque geste, chaque mouvement, chaque opération mentale, chaque prise de décision et chaque raisonnement avait un impact direct sur la qualité du traitement. En d'autres termes, pour parvenir à une prise en charge de qualité et atteindre un niveau de traitement de haute précision, un soin tout particulier doit être accordé à chacune de ces étapes. Il convient d'entreprendre des contrôles rigoureux et minutieux, aussi bien lors *de la prise en charge du patient et de la relation entretenue avec lui*, qu'au moment *de la simulation virtuelle et de la planification dosimétrique*, ou encore au cours *de la délivrance du traitement*. Ces responsabilités, il est vrai, incombent aux TRM ; cependant, elles dépendent et se nourrissent tout aussi manifestement de la qualité collaborative de l'ensemble des membres de l'équipe multidisciplinaire composant le service de protonthérapie du PSI.

## *Retour sur les questions amorcées dans l'introduction*

Pour rappel, la question de recherche visait à comprendre *l'activité du TRM en protonthérapie* et à connaître *sa pratique au sein du Centre de Proton Thérapie de l'Institut Paul Scherrer*. Il s'agissait notamment de nous pencher sur les éléments composant les étapes de préparation et de réalisation des protocoles du plan de traitement.

### *Quel est le cahier des charges d'un TRM ?*

Le TRM, spécialisé en protonthérapie, présente une activité proche de celle du praticien en radiothérapie. Au niveau des actes liés à sa fonction, il se doit de réaliser les processus de simulation virtuelle, de planification dosimétrique et d'irradiation dans les règles de l'art et avec la méthode appropriée. De surcroît, dans l'exercice de sa profession, le technicien a la charge d'amener, avec tact et psychologie, le patient à participer activement à son traitement.

### *Quelles sont les étapes par lesquelles chemine le TRM pour parvenir à la réalisation du plan de traitement ?*

Nos interviews et nos observations démontrent que les étapes permettant au TRM d'accéder à la séance d'irradiation de la tumeur sont balisées par des contrôles multiples et permanents. Cela s'explique autant par le haut degré de précision requis par cette technique que par la localisation, parfois délicate, de certaines tumeurs chez de jeunes sujets. En clair, dans la majorité de ces contrôles, il est nécessaire d'aboutir à une précision infra-millimétrique.

### *En quoi les activités de préparation du traitement, du processus dosimétrique et du traitement diffèrent-elles de celles réalisées en radiothérapie conventionnelle ?*

A la suite du recueil de données mené, nous pouvons affirmer que l'activité du TRM, dans ces deux modalités de traitement, s'établit selon un schéma primaire identique. Se différencient ensuite les actes spécifiques exigeant un temps plus conséquent et une précision plus accrue ainsi que les interactions relationnelles appelant souvent plus d'intensité, voire de profondeur.

Par ailleurs, les infrastructures à disposition se distinguent suffisamment d'une modalité à l'autre pour que la pratique, elle aussi, varie en conséquence.

*Quels sont les moyens permettant d'adapter très précisément la dose de radiation à la forme de la tumeur ?*

Par le biais de nos observations et de nos entretiens ainsi que des notions théoriques apportées par nos nombreuses lectures sur le sujet, l'interrogation primaire a pu puiser certains éléments de réponse dans la diversité des méthodes de modulation du faisceau de protons. Les techniques, de conserve avec les avancées technologiques, ont évolué au fil du temps. Ces deux techniques respectives sont donc caractérisées aussi bien par la modulation à l'aide de diffuseurs que par le déplacement du faisceau au moyen d'aimants.

*Quelle tumeur pourrait présenter l'avantage de servir de comparatif à ce qui se fait actuellement en radiothérapie traditionnelle ?*

Initialement, ce questionnaire devait permettre, en s'appuyant sur le déroulement du traitement d'une tumeur au travers de deux approches radiothérapeutiques distinctes, de mettre en lumière la pratique du TRM. Malheureusement, cette méthode de comparaison n'a pas été réalisable, en raison de l'absence de similitudes parlantes entre les plans de traitement des cancers traités dans chacune des deux modalités. Quand bien même, en insistant dans cette voie, notre description de l'activité du TRM aurait été incomplète et tronquée.

### *Positionnement personnel*

Dès les premières recherches théoriques en lien avec ce travail, la possibilité de mener une recherche scientifique de bout en bout, soit de ses prémices à son dénouement, nous a fortement stimulés et enthousiasmés. Après des années d'études, le fait de pouvoir se rendre sur le terrain, d'interroger et de rendre compte, même sous une forme modeste, de l'« univers » extrêmement technique de la protonthérapie est venu couronner l'ensemble de nos efforts. Autrement dit, il nous tenait véritablement à cœur d'approcher au plus près la réalité



professionnelle des acteurs de la protonthérapie, afin de constater comment ils exerçaient leur métier et quel sens ils lui attribuaient.

Allant de surprises en surprises, nous avons découvert le domaine relativement peu connu de la protonthérapie ainsi que, plus particulièrement, le métier de TRM qui s'y rattache. C'est un domaine vaste où la précision tient la dragée haute à la technique. Cette recherche nous a apporté son lot de connaissances théoriques et pratiques. Tout ce savoir-faire, tant technique que technologique, exige un travail de mise à niveau perpétuel, propre à cette discipline en constante évolution qu'est la protonthérapie. Ce bagage de l'« agir », dans un effort permanent du TRM de maintenir à jour ses connaissances et sa pratique, constituera à n'en point douter un référentiel de compétences excessivement utile pour faciliter notre entrée dans le monde du travail.

La méthodologie caractérisant ce type de travail repose sur des éléments déterminants tels que la rigueur, la précision, l'argumentation ainsi que la capacité d'interroger et de s'interroger, voire de s'étonner. En ce sens, elle représente, à nos yeux, une plus-value de taille dans l'exercice quotidien de notre profession.

Au terme de ce travail ô combien instructif et passionnant, nous estimons nous être investis au plus près de notre conscience dans l'ensemble de la méthode de recherche. Au point même que, parfois, à force d'implication exagérée, nous nous sommes égarés ou avons rencontré des difficultés à synthétiser certaines parties de notre travail ; d'où, d'ailleurs aussi, la taille plutôt volumineuse de ce document. Puisse le courageux lecteur ne pas nous en tenir rigueur, car, pour notre défense, nous avons sincèrement eu à cœur de retranscrire, d'explicitier et d'analyser le plus finement possible le contenu de nos entretiens et de nos observations.

En guise de digne épilogue, nos pensées et notre gratitude vont naturellement à tous les professionnels rencontrés dans le cadre de cette étude. Ils nous ont permis, chacun à leur tour et à leur façon, de prendre conscience du fait que toute technologie, aussi pointue soit-elle, n'a de sens réel que lorsqu'elle est exercée avec humanité, au travers d'une relation authentique avec le patient. Seuls les indissociables « savoir-faire technique » et « savoir-être médical », hors de toute humilité qu'impose l'adversité au soignant, peuvent prétendre répondre aux paradoxes auxquels fait face le TRM dans sa pratique actuelle et, a fortiori, à venir.

## REFLEXIONS SUR LES PERSPECTIVES FUTURES

Nous allons proposer ci-après quelques pistes de réflexion sur les perspectives futures, de manière large et au niveau suisse. Dans un second temps, nous nous pencherons sur les pistes d'action que nous avons jugées exploitables.

A l'heure actuelle, les thérapies modernes de lutte contre le cancer englobent plusieurs méthodes de traitement. Rappelons ici que la plus répandue est la chirurgie, suivie de près par l'irradiation. En 2010, on comptait 25 installations opérationnelles<sup>112</sup> dans le monde alors que, 4 ans plus tard, en mars 2014<sup>113</sup>, on en recensait 46 en activité, 27 en construction et 11 à l'étude.

### *Au niveau helvétique*

#### **Centre en développement dans la région de Galgenen**

Durant nos recherches documentaires, notamment celles entreprises à l'origine de ce travail, nous avons pris contact avec le centre en développement du Proton Therapy Center Switzerland (PTCS) AG Zürichobersee situé à Galgenen dans le canton de Schwyz et sommes allés à leur rencontre. Pour l'heure, encore en cours de construction (depuis 2013) et en phase de test, il ouvrira vraisemblablement ses portes au monde clinique en 2017. D'après les éléments exposés sur la page Web qui y est consacrée<sup>114</sup>, il s'agirait en fait d'« une collaboration entre le PTCS Zürichobersee, le CPT de l'Institut Paul Scherrer et les Hôpitaux

---

<sup>112</sup> Mazal A., Habrand J.-L., Delacroix S., Datchary J., Dendale R., Desjardins L., et al. *La protonthérapie: bases, indications et nouvelles technologies*. Bulletin du Cancer. [En ligne]. Juillet 2010 [consulté le 14 mai 2014]. Volume 97 – No 7 : p. 831-846. Disponible: <http://www.jle.com/fr/revues/medecine/pnv/e-docs/00/04/34/B6/resume.phtml>

<sup>113</sup> Annexe 8

<sup>114</sup> The Proton Therapy Center Switzerland AG. [En ligne]. 2011 [consulté le 23 mai 2014]. Disponible: <http://www.ptcs.ch/language/en-US/tabid/64/Home.aspx>

Universitaires Suisses, ceci dans le but de créer un état coopératif afin d'optimiser les traitements cliniques, la recherche et la formation ».

### **Centre en Suisse romande**

En 1999, un groupe de recherche composé de Miralbell R. et al. soumettait le projet<sup>115</sup> de l'« installation d'une unité de protonthérapie dans un centre romand, afin d'optimiser le traitement du cancer par radiothérapie, et ce, dans le cadre d'un programme d'intérêt national. Cette installation sera le résultat d'un transfert de technologie dans le domaine de la protonthérapie, laquelle sera développée au PSI au cours des 3 à 5 prochaines années ».

Pour le moment, ce projet n'a pas encore vu le jour. Il reste, nonobstant, toujours d'actualité et apparemment en attente. On nous a confié à demi-mot que le principal frein à ce développement public concernait les fonds, limités, mis à disposition par la Confédération pour cette technique de niche. En effet, le CPT du PSI dépend à la fois d'un financement fédéral et, pour majorité, d'un financement privé.

### **Gantry 3**

Tout au long de l'entretien exploratoire réalisé en collaboration avec le Professeur D.C. Weber à l'Institut Paul Scherrer, nous avons pu glaner une foule d'informations concernant la construction prévue, ou à tout le moins la mise en place certaine, d'une nouvelle Gantry pour le traitement clinique. Ce nouveau faisceau n'en est encore qu'à ses balbutiements. Quand bien même, le Professeur Weber semble fonder de grands espoirs sur cette nouvelle Gantry qui sera vraisemblablement dotée de la technologie CB-CT<sup>116</sup> de dernière génération ; ceux-ci se retrouvent d'ailleurs déjà sur certains appareils d'arc thérapie en Suisse<sup>117</sup>. Du reste, cette nouvelle structure présentera l'avantage considérable de bénéficier des découvertes techniques et matérielles que connaissent d'ores et déjà d'autres appareils de protonthérapie ailleurs dans le monde. Partant, cette Gantry 3 répondra aux

---

<sup>115</sup> Wolf W. / SGSMP. *Avant-projet de protonthérapie en Suisse romande*. [En ligne]. 1999 [mis à jour le 25 juillet 2003] ; [consulté le 2 janvier 2014]. Disponible: <http://www.sgsmp.ch/protsr-f.htm>

<sup>116</sup> Acronyme anglais signifiant Cone-Beam Computed Tomography.

<sup>117</sup> Expérimentés par les Hôpitaux Universitaires de Genève, le Genolier Swiss Medical Network et le Réseau Santé Valais.

avancées technologiques les plus récentes, tant en matière de recherche qu'en matière de traitement des cancers, ces derniers devenant de plus en plus complexes à traiter.

## Technique Gating

Au fil des périodes d'observation, des membres de l'équipe technique, à savoir des TRM et des ingénieurs, nous ont parlé d'une future nouveauté qui permettrait de synchroniser l'irradiation sur la respiration du patient : le gating respiratoire. Cette technique n'est pour l'instant pas possible au CPT du PSI. Pratiquement, le but à atteindre, en se basant sur la caractéristique mobile du Spot-Scanning, serait de suivre les mouvements thoraciques du patient afin de reproduire un système déjà employé en radiothérapie classique. Il s'avère en effet que les mouvements respiratoires peuvent conduire à des déplacements importants des sites à traiter, par exemple en cas de localisations hépatiques, pulmonaires ou médiastinales. Il en résulte une répartition de dose réelle plus ou moins éloignée de celle prévue en planification.

Plusieurs systèmes différents seraient alors utilisables, dont un spiromètre<sup>118</sup> qui offrirait l'avantage d'un contrôle strict mais augmenterait malheureusement significativement le temps d'examen. A cela s'ajoute une technique qui s'appuierait sur les mouvements externes du corps du patient, c'est-à-dire la respiration visible ; ces changements perceptibles seraient mis en évidence par une caméra adaptée et par des capteurs judicieusement positionnés. Cette façon de faire pourrait révéler quantité d'atouts non négligeables. Ainsi, grâce à la capacité du faisceau de protons à être mobilisé en mode Spot-Scanning, on pourrait suivre dans l'espace le volume à irradier. Cette méthode est en ce moment en cours de développement au PSI.

D'un mot encore, une étude<sup>119</sup> réalisée en 2007 par Lu HM et al. démontre qu'une telle manipulation est techniquement et cliniquement réalisable.

---

<sup>118</sup> Le spiromètre est un appareil dans lequel le patient respire et qui permet de déterminer une valeur seuil où bloquer ou non sa respiration afin que l'irradiation soit effectuée à ce pourcentage respiratoire précis, respectivement à cette position exacte.

<sup>119</sup> Lu H.M., et al. *A respiratory-gated treatment system for proton therapy*. [En ligne]. Août 2007 [consulté le 20 mai 2014]. Volume 34: p. 3273-3278. Disponible: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17879790>

## *Pistes d'action*

### **Gating respiratoire**

Une fois la technique de suivi de la respiration du patient harmonisée, il pourrait être profitable de se pencher sur sa validité effective. Parmi les variantes utilisables, laquelle se révélerait suffisamment bénéfique pour être appliquée en protonthérapie ? A contrario, pourquoi n'est-il pas possible, en 2014, de mettre en place des traitements à localisation mobile, à l'instar de volumes au niveau pulmonaire ? Dans la même optique, pourquoi les techniques actuellement disponibles ne sont-elles pas transférables à des localisations de ce type ?

### **Nouvelles indications**

En cette année 2014, une vingtaine d'indications sont reconnues et autorisées sur le plan fédéral<sup>120</sup> et, par conséquent, prises en charge par l'assurance maladie de base. Il serait fructueux de déterminer pour quelles raisons ces localisations sont prises en charge financièrement. Au demeurant, avec l'avancée des procédures en recherche clinique, de nouvelles indications vont assurément rentrer progressivement dans les textes de lois. Dès lors, lesquelles présenteraient un avantage certain à être traitées par faisceau de protons ? De plus, il pourrait être intéressant de corréliser les indications actuelles pour ce domaine de traitements avec les évolutions technologiques que va subir, à n'en point douter, le monde de la radiothérapie.

### **Evolution de la protonthérapie en Suisse**

Eu égard à l'évolution importante<sup>121</sup> de la protonthérapie dans le monde, on pourrait légitimement imaginer que la Suisse voie, elle aussi, le nombre de ses sites de traitement croître à l'avenir. Le centre en cours de construction à Zürichobersee atteste de l'engouement, quoique timide et contenu, vis-à-vis de cette modalité thérapeutique. En poussant plus avant la réflexion, on serait en droit de se demander pourquoi il n'existe qu'un seul centre de ce

---

<sup>120</sup> Voir annexe II

<sup>121</sup> Voir annexe VII

type en Suisse. Par extrapolation, mais toujours concernant le développement de la protonthérapie helvétique, il serait enrichissant de s'intéresser à la formation des TRM dans ce domaine. Quelles qualifications et compétences devraient posséder les TRM dans l'éventualité où la protonthérapie se généralisait et devenait une modalité de traitement routinière ?

### **Utilisation de l'IRM en complément du CT pour la simulation**

Désormais, l'utilité du Scanner CT en vue d'obtenir des images de qualité destinées à l'élaboration du plan de traitement n'est plus à démontrer. Cela dit, certains centres utilisent déjà, en combinaison, les informations issues de l'imagerie par résonance magnétique et la tomodensitométrie. On pourrait, bien à propos, analyser la pertinence d'une telle fusion<sup>122</sup>. Le Scanner CT de simulation dispose d'une définition suffisamment bonne pour obtenir un diagnostic. La question qui se pose donc naturellement est la suivante : serait-il envisageable, en protonthérapie, de procéder à plusieurs examens radiologiques (CT, MR et imagerie métabolique) lors de la simulation virtuelle ?

### **Activité du TRM en protonthérapie**

Le travail de recherche mené a permis de déterminer l'activité réelle du technicien en radiologie médicale dans le cadre de la protonthérapie. Cependant, les aspects de formation (HES, ES et post-graduée) n'ont pas été abordés. Tout comme, d'ailleurs, le développement et l'évolution de cette pratique dans le temps ainsi que les pratiques parallèles existantes. De fait, il pourrait être éminemment instructif de chercher à connaître la quantité et le contenu de la matière s'y rattachant et étudiés durant les diverses formations. Précisons encore à ce sujet que ces formations ont lieu, pour l'heure, directement au PSI.

Si tant est que la pratique de la protonthérapie prenne son essor et gagne ses lettres de noblesse, serait-il alors judicieux d'accompagner cette technique de niche sur le plan académique ?

---

<sup>122</sup> Fusion intermodalitaire dans la position de traitement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### Ouvrages

- MAZERON, J.-J., MAUGIS, A., BARRET, C., MORNEX, F. *Techniques d'irradiations des cancers*. Paris: Maloine 2011. 428 p.
- DILLENSEGER, J.-P., & MOERSCHEL, E. *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie*. Paris: Elsevier Masson 2009. 390 p.
- BREUER, H., SMIT, B.J. *Proton Therapy and Radiosurgery*. Germany: Springer 2011. 288 p.
- VAN CAMPENHOUDT, L., QUICY, R. *Manuel de recherche en sciences sociales*. Paris : Dunod 2011; 4ème édition. 262 p.
- PAGANETTI, H. *Proton Therapy Physics*. New York: CRC Press 2012. 684 p.
- HECHT, E. *Physique*. Bruxelles: ITP de Boeck 2003. 1304 p.
- COSSET, J.-M. *Des rayons contre le cancer. Tout savoir sur la radiothérapie*. Paris: Robert Laffont 2008. 265 p.
- LARTIGAU, E. *L'innovation thérapeutique en cancérologie. Radiothérapie oncologique. Concept, techniques et applications cliniques*. Montrouge: John Libbey Eurotext 2009. 208 p.
- Commissions romandes de mathématique, de physique et de chimie. *Formulaires et tables*. G d'Encre 2010. 278 p.

### Articles

- BOUYON-MONTEAU, A., HABRAND, J.-L., DATCHARY J., ALAPETITE, C., BOLLE, S., DENDALE, R., et al. *La protonthérapie : avenir de la radiothérapie ? Première partie : aspects cliniques*. Cancer/Radiothérapie. 2010. Volume 14 – No 8. pp. 727-738
- WEBER, D.C., MIRIMANOFF, R.-O., MIRALBELL, R. *La radiothérapie par faisceaux de protons : bases physiques, indications et expérience suisse*. Bulletin du Cancer. Septembre 2007. Volume 94 – No 9. pp. 807-815.
- MAZAL, A., HABRAND, J.-L., DELACROIX, S., DATCHARY, J., DENDALE, R., DESJARDINS, L., et al. *La protonthérapie: bases, indications et nouvelles technologies*. Bulletin du Cancer. Juillet 2010. Volume 97 – No 7. pp. 831-846
- LU, H.M., et al. *A respiratory-gated treatment system for proton therapy*. Medical Physics. Août 2007. Volume 34 – No 8. pp. 3273-3278

POINTREAU, Y., VOGIN, G., LIEM, X., BERGES, O., RIOU, O., LOUVEL, G., et al. *Innovations en radiothérapie*. Oncologie. Janvier 2012. Volume 14 – No 1. pp. 17-20

MARCHESI, V., PEIFFERT, D., LE TALLEC, P., AIGLE, D. *Partage des tâches avec les manipulateurs en électroradiologie médicale : organisation et prérequis pour la délégation des tâches de dosimétrie des plans de traitements*. Cancer/Radiothérapie. Octobre 2013. Volume 17 – No 5-6 pp. 378-382

## Sites internet

Institut Paul Scherrer. *La Protonthérapie à PSI*. [En ligne]. Disponible: <http://www.psi.ch/protontherapy/protontherapie>

BATTISTELLI, B. *Ensemble de la carrière : Yves Jongen*. [En ligne]. 2013. Disponible: [http://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2013\\_fr.html](http://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2013_fr.html)

Organisation Mondiale de la Santé/Centre des médias. [En ligne]. 2014. Disponible: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs297/fr/>

HAMISH, J. / *CERN creates new office for medical research*. [En ligne]. 2014. Disponible: <http://blog.physicsworld.com/2014/02/25/cern-creates-new-office-for-medical-research/>

SDBB | CSFO - orientation.ch. *Technicien en radiologie médicale HES / Technicienne en radiologie médicale HES*. [En ligne]. N° Swissdoc: 0.723.48.0 ; 2014. Disponible: <http://www.orientation.ch/dyn/1109.aspx?id=258>

HEdS de Genève: *Technique en radiologie médicale*. [En ligne]. 2014. Disponible: [http://www.heds-ge.ch/portail/welcome.nsf/pages/technique\\_en\\_radiologie\\_medicaleF](http://www.heds-ge.ch/portail/welcome.nsf/pages/technique_en_radiologie_medicaleF)

République et Canton de Genève. *Formation*. [En ligne]. Genève. Disponible: <http://ge.ch/formation/metier/technicien-en-radiologie-medicale-hes-technicienne-en-radiologie-medicale-hes>

CNRTL. *Ortolang*. [En ligne]. 2012. Disponible: <http://www.cnrtl.fr/lexicographie/délinéation>

Institut Paul Scherrer. *L'histoire du PSI*. [En ligne]. Disponible: [www.psi.ch/histoire-du-psi](http://www.psi.ch/histoire-du-psi)

LEDEN et EDP Sciences. *Protonthérapies*. [En ligne]. 2001. Disponible: <http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/protontherapies.htm>

HERON, J.F. *Irradiations par d'autres particules*. [En ligne]. 2014. Disponible: [http://www.oncoprof.net/Generale2000/g08\\_Radiotherapie/g08\\_rt25.php](http://www.oncoprof.net/Generale2000/g08_Radiotherapie/g08_rt25.php)

JAMES D. COX, M.D. The University of Texas Cancer Center. *Proton Therapy Center*. [En ligne]. 2014. Disponible: <http://www.mdanderson.org/education-and-research/research-at-md-anderson/early-detection-and-treatment/centers/proton-therapy-center/index.html>

*The National Association for Proton Therapy Proton News*. [En ligne]. 2014. Disponible: <http://www.proton-therapy.org/pr10.htm>

*Prontherapy Center*. [En ligne]. Disponible: <http://www.proton-cancer-treatment.com/proton-therapy/proton-therapy-around-the-world/operating-clinical-proton-centres/>



PTCOG. *Particle therapy facilities in a planning stage*. [En ligne]. 2013. Disponible: <http://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-planning-stage>

TRIKALINOS, T., TERASAWA, T., IP, S., RAMAN, G., LAU, J., TUFTS EPC / AHRQ. *Technical Brief on Particle Beam Radiotherapies for the Treatment of Cancer*. [En ligne]. 2010. Disponible: <http://www.ahrq.gov/news/events/conference/2010/trikalinos/>

ITER. *La Science*. [En ligne]. 2014. Disponible: <http://www.iter.org/fr/sci/whatisfusion>

Los Alamos National Laboratory. *Contrast and Resolution*. [En ligne]. 2014. Disponible: <http://www.lanl.gov/science/1663/january2012/story4a.shtml>

ROBERT FERREOL. *Spirale Logarithmique*. [En ligne]. Editeur; MANDONNET Jacques 2012. Disponible: <http://www.mathcurve.com/courbes2d/logarithmic/logarithmic.shtml>

DINA, D. *Passive Scattering, slide 28*. [En ligne]. 2012. Disponible: <http://fr.slideshare.net/dinadawi/proton-therapy>

Institut Paul Scherrer. *The Spot-Scanning technique developed at PSI*. [En ligne]. 2012. Disponible: <http://p-therapie.web.psi.ch/e/spot-scanning.html>

The Proton Therapy Center Switzerland AG. [En ligne]. 2011. Disponible: <http://www.ptcs.ch/language/en-US/tabid/64/Home.aspx>

WOLF, W. / SGSMP. *Avant-projet de protonthérapie en suisse romande*. [En ligne]. 1999. Disponible: <http://www.sgsmp.ch/protsr-f.htm>

SAFAI, S., BULA, C., MEER, D., PEDRONI, E. Translational Cancer Research. *Improving the precision and performance of proton pencil beam scanning*. [En ligne]. 2012. Disponible: <http://www.thetcr.org/article/view/599/html>

DENIS, F. SIRIADE. *Site Internet de Radio-anatomie et d'Auto-enseignement à la Délinéation*. [En ligne]. Disponible: [www.siriade.org](http://www.siriade.org)

Elekta AB. [En ligne]. 2014. Disponible: <http://www.elekta.com/>

Varian Medical Systems. [En ligne]. 2014. Disponible: <http://www.varian.com>

IBA Proton Therapy. [En ligne]. 2014. Disponible: [www.iba-protontherapy.com/](http://www.iba-protontherapy.com/)

## *PDF en version électronique*

Organisation Mondiale de la Santé / Centre International de Recherches sur le Cancer. *Dernières statistiques mondiales sur le cancer*. [En ligne]. 2013. Disponible: [http://www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2013/pdfs/pr223\\_F.pdf](http://www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2013/pdfs/pr223_F.pdf)

Rapport Final (DRAFT). *Les défis du vieillissement*. [En ligne]. Disponible: [http://www.chru-strasbourg.fr/Hus/HTML/cooperation/docs/HDC\\_rapport\\_final\\_cliquable.pdf](http://www.chru-strasbourg.fr/Hus/HTML/cooperation/docs/HDC_rapport_final_cliquable.pdf)

Département Fédéral de l'Intérieur. *Ordonnance du DFI sur les prestations dans l'assurance obligatoire des soins en cas de maladie OPAS 832.112.31*. [En ligne]. 1995. Disponible: <http://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19950275/201401010000/832.112.31.pdf>

MD ANDERSON. Cancer Center. *Proton Therapy Center*. [En ligne]. 2006. Disponible: <http://www.mdanderson.org/education-and-research/resources-for-professionals/clinical-tools-and-resources/physician-oncology-toolkit/conference-materials/proton-therapy-center-brochure1.pdf>

ROHRER, U. / Paul Scherer Institut. *Proscan Area Layout*. [En ligne]. 2006. Disponible: [http://aea.web.psi.ch/Urs\\_Rohrer/MyWeb/proscan.htm](http://aea.web.psi.ch/Urs_Rohrer/MyWeb/proscan.htm)

WEBER, Damien Charles. *Curriculum vitae*. [En ligne]. 2013. Disponible: [http://www.sarkomzentrum.ch/media/filer\\_public/2013/12/09/cv-english\\_prof\\_damien\\_charles\\_weber\\_dez\\_2013\\_031213.pdf](http://www.sarkomzentrum.ch/media/filer_public/2013/12/09/cv-english_prof_damien_charles_weber_dez_2013_031213.pdf)

DELACROIX, S., DE OLIVEIRA, A. Institut Curie. Mise en œuvre de la démarche ALARA au centre de protonthérapie de l'Institut Curie. [En ligne]. 2010. Disponible: <http://www.sfrp.asso.fr/IMG/pdf/18-SDelacroix.pdf>

HELSSERVICE Proton Therapy Center. *Basic indications of proton therapy PTC*. [En ligne]. [http://www.helsservice.net/Portals/87/Filer/Proton/Indications%20and%20treatment%20results\\_p\\_\ron%20therapy.pdf](http://www.helsservice.net/Portals/87/Filer/Proton/Indications%20and%20treatment%20results_p_\ron%20therapy.pdf)

### Multimédias

Euronews. *L'espoir de la protonthérapie*. [Vidéo en ligne]. 2014. Disponible: <http://fr.euronews.com/2013/05/14/l-espoir-de-la-protontherapie/>

France Info. *La protonthérapie en pleine évolution*. [Podcast audio en ligne]. 2012. Disponible: <http://www.franceinfo.fr/sciences-sante/info-sciences/la-protontherapie-en-pleine-evolution-538275-2012-02-24>

Institut Paul Scherrer. *Présentation de la protonthérapie*. [Vidéo]. 2011. [www.montevideo.tv](http://www.montevideo.tv)

### Dictionnaire

AKOUN, A., & ANSART, P. *Dictionnaire de sociologie*. 1999. Paris: Seuil. 1999. 587 p.

### Brochure

JERMANN, M., & BAROKE, D. *La protonthérapie à l'Institut Paul Scherrer*. Villigen 2011

## Communiqué de presse

OMS / Centre International de Recherche sur le Cancer. *Dernières statistiques mondiales sur le cancer. En augmentation à 14,1 millions de nouveaux cas en 2012 :L'augmentation marquée du cancer du sein demande des réponses.* [En ligne]. Décembre 2013. Disponible: [http://www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2013/pdfs/pr223\\_F.pdf](http://www.iarc.fr/fr/media-centre/pr/2013/pdfs/pr223_F.pdf)

## Divers

TRISCONNE, G. *Cours de base en radioprotection pour technicien-ne-s en radiologie médicale.* 2011. [Cours de formation du module 1301]. Haute Ecole de Santé Genève; BSc 1.

MIRALBELL, R. *Radiobiologie.* 2011. [Cours de formation du module 1301]. Haute Ecole de Santé Genève; BSc 1.

BRAULT, D. *Contrôle de qualité en Médecine Nucléaire.* 2014. [Cours de formation du module 3108]. Haute Ecole de Santé Genève; BSc 3.

BARADA, M. *Simulation virtuelle, notions de base.* 2014. [Cours de formation du module 3107]. Haute Ecole de Santé Genève; BSc 3.

PAPAZYAN, J.-P. *Traitements oncologiques.* 2014. [Cours de formation du module 3106]. Genève : Haute Ecole de Santé; BSc 3.

BIRCHER, V. *Des Noirs face au racisme: vécus et trajectoires dans le domaine public.* 2008. HETS; Fribourg. 190 p.

OXFORD JOURNALS. *Journal Of The ICRU. SOBP.* [En ligne]. 2011. Disponible: <http://jicru.oxfordjournals.org/content/7/2/11/F4.large.jpg>

SIRIADE. *Site Internet de Radio-anatomie et d'Auto-enseignement à la Délinéation.* [Applications iPhone<sup>®</sup>, iPad<sup>®</sup> & Android<sup>®</sup>]. Janvier 2012. Disponible: <http://www.siriade.org/>

## ANNEXES

*I – Radiosensibilité organique*<sup>123</sup>

Organes à risque		Dose de tolérance
<b>Encéphale</b>	Total	D <sub>max</sub> 45 Gy
	Partiel	D <sub>max</sub> 60 Gy
<b>Structures cérébrales</b>	Tronc cérébral	D <sub>max</sub> 50 Gy
	Hypophyse	D <sub>max</sub> 45 – 60 Gy
<b>Structures oculaires</b>	Chiasma	D <sub>max</sub> 54 Gy
	Cornée	D <sub>max</sub> 30 Gy
	Rétine	V45 Gy < 50 %
	Nerf optique	D <sub>max</sub> 55 Gy
	Cristallin	D <sub>moy</sub> < 5 – 10 Gy
<b>Nerfs périphériques</b>		D <sub>max</sub> 60 Gy
<b>Sphère O.R.L.</b> <sup>124</sup>	Oreille (cochlée)	D <sub>max</sub> 40 Gy
	Glandes salivaires (parotides)	D <sub>moy</sub> < 25 - 30 Gy (homolat)
	Articul. temporo-mandibul.	D <sub>max</sub> 65 Gy
	Larynx	D <sub>moy</sub> < 40 - 45 Gy D <sub>max</sub> 66 Gy
<b>Thyroïde</b>		V50 Gy < 50 %
<b>Poumon</b>		V20 < 30 % V30 < 20 %
<b>Cœur</b>		V 35 Gy < 30%
<b>Système urinaire</b>	Rein	D <sub>moy</sub> < 20 Gy
	Vessie	V60 Gy < 50% D <sub>max</sub> 60 - 65 Gy
<b>Digestif</b>	Foie	D <sub>max</sub> 37 Gy
	Estomac et duodénum	D <sub>max</sub> 54 Gy
	Rectum	V60 Gy < 50 %
	Canal anal	D <sub>max</sub> 55 Gy
<b>Gonades</b>	Vagin	D <sub>max</sub> 120 Gy (1/3 supérieur) D <sub>max</sub> 80 – 90 Gy (1/3 moyen) D <sub>max</sub> 60 – 70 Gy (1/3 inférieur)
	Ovaires	D <sub>max</sub> 2 – 5 Gy
	Testicules	D <sub>max</sub> 2.5 Gy
<b>Peau</b>		D <sub>max</sub> 40 Gy
<b>Osseux</b>	Côtes	D <sub>max</sub> 50 Gy
	Os longs	D <sub>max</sub> 60 Gy D <sub>moy</sub> < 37 Gy
	Moelle osseuse	D <sub>75%</sub> < 24.5 Gy (volume total)

<sup>123</sup> Tiré de l'application Siriade pour iPhone. Disponible en téléchargement sur l'Apple Store ou par le site internet de formation [www.siriade.org](http://www.siriade.org)

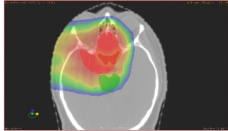
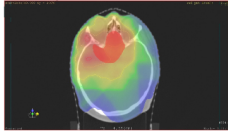

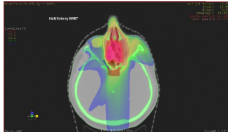

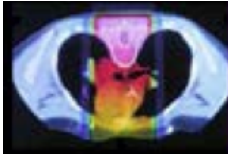
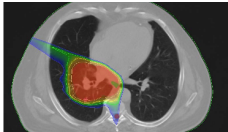
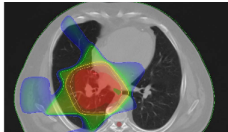
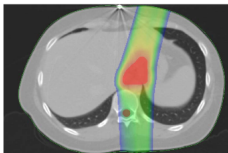
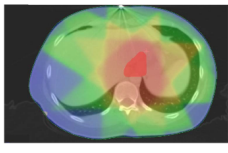
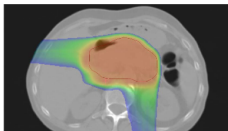
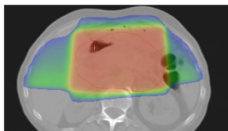
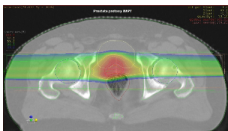
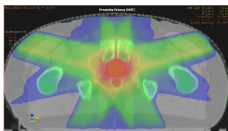
<sup>124</sup> O.R.L. signifie oto-rhino-laryngologique.

## II – Législations

Ordonnance du DFI sur les prestations dans l'assurance obligatoire des soins en cas de maladie (Ordonnance sur les prestations de l'assurance des soins OPAS, 832.112.31).

O sur les prestations de l'assurance des soins			832.112.31
Mesure	Obligatoire- ment à la charge de l'assurance	Conditions	Décision valable à partir du
<i>9.3 Radiologie interventionnelle et radiothérapie</i>			
Irradiation thérapeutique par faisceau de pions	Non		1.1.1993
Irradiation thérapeutique par faisceau de protons	Oui	Mélanomes intraoculaires.	28.8.1986
	Oui	Prise en charge seulement si l'assureur a donné préalable- ment une garantie spéciale et avec l'autorisation expresse du médecin-conseil.  Lorsqu'il n'est pas possible de procéder à une irradiation suffisante par faisceau de photons du fait d'une trop grande proximité d'organes sensibles au rayonnement ou du besoin de protection spécifique de l'organisme des enfants et des jeunes. Indications: – tumeurs du crâne (chordo- me, chondrosarcome, car- cinome épidermoïde, adé- nocarcinome, carcinome adénoïde kystique, lym- phoépithéliome, carcinome mucoépidermoïde, esthé- sioneuroblastome, sarco- mes des parties molles et ostéosarcomes, carcinomes non différenciés, tumeurs rares telles que les para- gangliomes) – tumeurs du cerveau et des méninges (gliomes de bas grade, 1 ou 2; méningio- mes) – tumeurs extra-crâniennes au niveau de la colonne vertébrale, du tronc et des extrémités (sarcomes des tissus mous et de l'os) – tumeurs de l'enfant et de l'adolescent  Exécution à l'Institut Paul Scherrer, à Villigen.	1.1.2002/ 1.7.2002/ 1.8.2007/ 1.1.2011/ 1.7.2011
	Oui	En cours d'évaluation  Indications: – Radiothérapie postopératoire de carcinomes mammaires stade III-A ou III-C gauches Traitements pratiqués dans le cadre de l'étude pilote de l'Institut Paul Scherrer. Exécution à l'Institut Paul Scherrer, à Villigen.	1.7.2012 jusqu'au 30.6.2015

### III – Indications en radiothérapie vs protonthérapie<sup>125</sup>

Indication	Représentation	
	Protonthérapie	Radiothérapie
<b>Tumeur du système nerveux central</b>		
<b>Tumeur oto-rhino-laryngologique ou faciale</b>		
<b>Médulloblastome (pédiatrique)</b>		
<b>Carcinome broncho-génique non à petite cellule</b>		
<b>Carcinome de l'œsophage, de la jonction gastro-oesophagienne</b>		
<b>Cancer du pancréas</b>		
<b>Cancer de la prostate</b>		

<sup>125</sup> Helseservice. *Basic indications of proton therapy PTC*. [En ligne]. [Consulté le 23 juin 2014]. Disponible: [http://www.helseservice.net/Portals/87/Files/Proton/Indications%20and%20treatment%20results\\_proton%20therapy.pdf](http://www.helseservice.net/Portals/87/Files/Proton/Indications%20and%20treatment%20results_proton%20therapy.pdf)

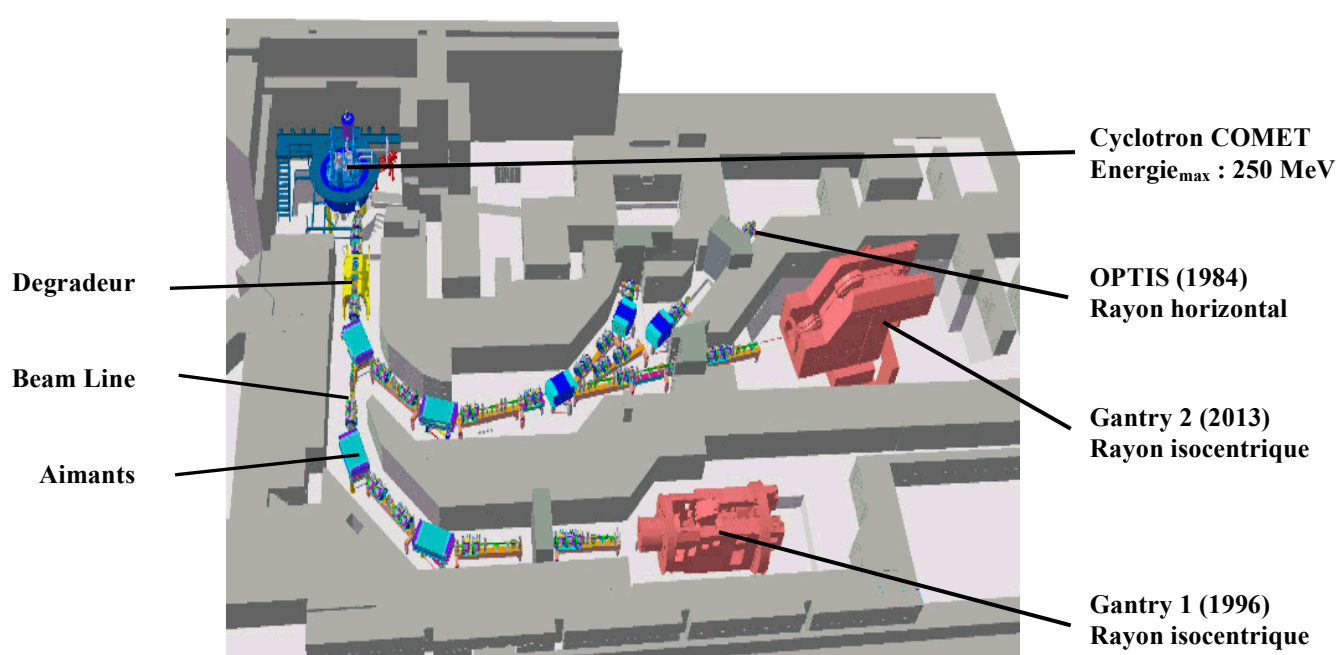
*IV - Représentation du CPT du PSI*

Figure 15: Répartition des faisceaux de protons - PSI

## V - Guide d'entretien exploratoire

**h e d s**

Haute école de santé  
Genève

Filière Technique en radiologie médicale  
HEdS - Haute école de santé Genève  
47, avenue de Champel  
CH-1206 Genève  
Tél. : +41(0)22 388.34.20

### Guide d'entretien - Travail de Bachelor

Date : Statut :

Durée : Lieu :

#### Communication

Comme l'attestent les documents qui ont été signés<sup>1</sup>, vous avez à tout moment le droit d'accepter ou de refuser de participer à cet entretien. De même, toutes les données récoltées resteront confidentielles.

Le but de notre travail n'est en aucun cas de tenir un quelconque jugement, mais de poursuivre un objectif de compréhension uniquement.

#### Rappel du sujet de recherche

Nous nous intéressons à l'activité du technicien en protonthérapie ainsi qu'au déroulement d'un cas clinique observable au centre de protonthérapie de Villigen. La problématique sous-jacente est la suivante :

#### ***Quelle est l'activité du TRM en protonthérapie ? Observations et analyses d'un cas clinique au Centre de Proton Thérapie de Villigen.***

Cet entretien (exploratoire) a pour but de pouvoir bénéficier des connaissances approfondies et de la grande expérience que le Professeur D.C. Weber daignera partager avec nous.

#### Déroulement

L'entretien va se dérouler de la façon suivante :

- Nous avons choisi de mener une démarche semi-directive
- Nous vous poserons des questions qui serviront à diriger la conversation dans le sens de notre question de recherche

<sup>1</sup> Documents annexes : Formulaire de consentement éclairé et libre et demande d'autorisation pour enquêter dans votre institution.



### 1. Professeur D.C. Weber

- 1.1. Pourriez-vous vous présenter en quelques mots ?
- 1.2. Nous avons pu lire que le saut effectué entre la radiothérapie actuelle et la protonthérapie correspondrait au bond réalisé à l'époque entre le cobalt et l'accélérateur linéaire (LINAC). Son utilisation *routinière* pourrait-elle être, selon vous, envisageable dans le futur ?
- 1.3. Qui compose une équipe de protonthérapie (vs une équipe de radiothérapie) ?

### 2. La multimodalité en protonthérapie

- 2.1. Quelle modalité radiologique est suffisamment pertinente pour être utilisée dans le cadre d'une dosimétrie prévisionnelle ?
- 2.2. Comment procédez-vous pour le contrôle de l'exacte position du patient avant et au cours du traitement ? Le cas échéant (mauvaise position), comment est-il possible de l'optimiser ?

### 3. L'activité du TRM en protonthérapie

- 3.1. Quelles sont les principales étapes qui balisent l'ensemble de la réalisation d'un plan de traitement ?
- 3.2. Quelles sont les caractéristiques professionnelles que doit présenter un technicien en protonthérapie et en quoi diffèrent-elles de celles de la radiothérapie conventionnelle ?
- 3.3. Dans l'activité du TRM quelles tâches lui sont confiées et quelles responsabilités doit-il assumer ?
- 3.4. En sachant qu'en radiothérapie traditionnelle l'activité du TRM se découpe en trois étapes majeures (préparation, processus dosimétrique et traitement). Comment la décririez-vous en protonthérapie ?
- 3.5. Quels moyens sont utilisés pour adapter précisément la dose à la tumeur (mobilité, irrégularité,...) ?

#### 4. Concernant la technique oncologique en protonthérapie

- 4.1. Hormis le type d'irradiation, qu'est-ce qui, à votre sens, différencie fondamentalement la protonthérapie des autres techniques actuelles de radiothérapie (conformationnelle, par modulation d'intensité et par thérapie sous forme d'arc).
- 4.2. Pourriez-vous nous parler du Pic de Bragg et de son importance pour cette technique ?
- 4.3. Qu'est-ce qui permet d'appliquer la modulation d'intensité à un faisceau de protons ?
- 4.4. Qu'entend-on par « organe qui répond à une escalade de dose » ?
- 4.5. Quels sont les outils de positionnement et contention utilisés en protonthérapie ?
- 4.6. Quelles difficultés majeures se posent ou pourraient se poser tout au long d'un traitement par faisceaux de protons ?

#### 5. Bilan actuel et impact de la protonthérapie selon le Professeur Weber

- 5.1. Quelles sont les indications retenues pour un traitement par faisceau de proton et dans quelle(s) pathologie(s) tumorale(s) le *Center of Proton Therapy* se positionne-t-il sur le plan international ?
- 5.2. De quel « recul » bénéficie-t-on par rapport à cette méthode de traitement ?
- 5.3. Quelle est la tendance actuelle en matière de traitement par faisceaux de protons ?

#### 6. Discussion - Conclusion

- 6.1. En rapport au cas que vous allez nous soumettre, quelle serait la façon la plus pertinente et judicieuse de confronter les deux protocoles thérapeutiques en protonthérapie et en radiothérapie ?
- 6.2. Le succès de la protonthérapie tient, entre autres à la miniaturisation des installations (tel que le cyclotron), serait-ce dans un futur proche envisageable ?

6.3. Pensez-vous que le TRM a sa place dans un service de protonthérapie ? Où ses tâches trouvent-elles leurs limites ?

6.4. A quels éléments, que nous n'aurions pas évoqué au cours de cet entretien, devons-nous être particulièrement attentifs pour bien documenter notre question de recherche ?

---

Un tout grand merci, Professeur, d'avoir consacré une partie de votre précieux temps à répondre à nos questions. Si vous avez d'éventuelles remarques et/ou propositions, nous serions ravis d'en prendre connaissance.

EVENTUELLEMENT EN FIN SI LE TEMPS NOUS LE PERMET.

Quelles sont les caractéristiques d'une tumeur traitable par faisceaux de protons (ceci en analogie avec celles d'une tumeur traitable par faisceaux photoniques) ?

Quels sont les critères majeurs permettant de valider de nouvelles indications de traitements par faisceaux de protons d'une tumeur ?

En réponse à cette question, nous pensons savoir que cela tient à trois conditions :

- Amélioration de la survie du patient
- Non augmentation de la toxicité radio-induite tardive
- Absence de récurrence

Nous avons eu l'occasion de découvrir que la multidisciplinarité est importante dans ce domaine, pouvez-vous nous en dire plus... Quelles sont les principales interactions ?

## VI - Guide d'entretien semi-directif destiné aux TRM

**h e d s**

Haute école de santé  
Genève

Filière Technique en radiologie médicale  
HEdS - Haute école de santé Genève  
47, avenue de Champel  
CH-1206 Genève  
Tél. : +41(0)22 388.34.20

### Guide d'entretien - Travail de Bachelor

Date : Statut :

Durée : Lieu :

#### Communication

Comme l'atteste le document qui a été signé<sup>1</sup>, vous avez à tout moment le droit d'accepter ou de refuser de participer à cet entretien. De même, toutes les données récoltées resteront confidentielles.

Le but de notre travail n'est en aucun cas de tenir un quelconque jugement, mais de poursuivre un objectif de compréhension uniquement.

#### Rappel du sujet de recherche

Nous nous intéressons à l'activité du technicien en protonthérapie ainsi qu'au déroulement d'un cas clinique observable au centre de protonthérapie de Villigen. La problématique est la suivante :

#### ***Quelle est l'activité du TRM en protonthérapie ? Observations et analyses d'un cas clinique au Centre de Proton Thérapie de Villigen.***

Cet entretien a pour but de pouvoir bénéficier des connaissances approfondies et de la grande expérience que [REDACTED] (TRM au centre de proton thérapie de Villigen) acceptera de partager avec nous.

#### Déroulement

L'entretien va se dérouler de la façon suivante :

- Nous avons choisi de mener une démarche semi-directive
- Nous vous poserons des questions qui serviront à diriger la conversation dans le sens de notre question de recherche

<sup>1</sup> Document annexe : Formulaire de consentement éclairé et libre.

### 1. Patricia Moser dans son rôle de TRM, généralités

- 1.1. Pourriez-vous vous présenter en quelques mots et pouvez-vous nous parler de votre expérience dans ce domaine ultraspécialisé de la radiothérapie ? Avez-vous exercé en radiothérapie conventionnelle ?
- 1.2. Nous aimerions axer notre réflexion, nos questions et nos observations avec la situation (connue de nous deux) d'un traitement d'une **localisation cérébrale**. Est-ce envisageable pour vous ?

### 2. Prise en charge du patient

- 2.1. Qu'est-ce qui différencie fondamentalement, dans la prise en charge générale du patient, la protonthérapie des techniques actuelles de radiothérapie (3DRCT, IMRT, VMAT) ?
- 2.2. Combien de temps est consacré (en moyenne) à la prise en charge complète du patient ? Combien de patients traite-t-on au Centre de Proton Thérapie quotidiennement (tous type de traitements et appareils confondus) ?
- 2.3. Au cours d'une journée type, quels éléments retiendraient votre attention ?
- 2.4. Concernant la prise en charge pédiatrique, comment se déroule un traitement cérébral ?

### 3. La simulation virtuelle

- 3.1. Pouvez-vous nous expliquer comment se déroule une simulation type ?
- 3.2. Comment le patient est-il positionné (quelles contentions sont utilisées et pourquoi) ?
- 3.3. Quels repères anatomiques, morphologiques ou externes au patient sont utilisés pour préparer la simulation du patient ?
- 3.4. Quelles sont les difficultés majeures rencontrées lors de la simulation virtuelle d'un traitement ?
- 3.5. L'utilisation de la tomodesitométrie n'as plus à être démontrée, mais l'utilisation de techniques combinant la fusion intermodalaire peut l'être. Qu'en pensez-vous ? Qu'en est-il au Center for Proton Therapy ?

#### 4. La planification dosimétrique

- 4.1. Le TRM est-il impliqué dans tout le processus dosimétrique?
- 4.2. Suite à la simulation virtuelle, quels volumes vont être délimités (volumes à traiter, organes à risques) ? Des marges sont-elles délimitées (si oui, de quelles dimensions et de quoi tiennent-elles compte) ?
- 4.3. Comment est-il possible de modéliser (sur le patient) l'isocentre du volume à traiter ? (cf. Lasers)
- 4.4. Peut-on utiliser un masque (3/5 points) compte tenu de l'utilisation de protons ?
- 4.5. Comment définit-on les éléments nécessaires au bon positionnement (lors du traitement) du patient ?
- 4.6. Comment est-il possible de moduler la répartition de la dose, sur quels éléments physiques/techniques est-il possible de s'appuyer pour l'influencer ?
- 4.7. Concernant le SPOTSCANN, quel est le domaine d'application de cette technique ?
- 4.8. La dose tolérée par les OAR est-elle la même que celle tolérée lors d'utilisation de photons (pouvez-vous nous expliquer pourquoi) ?
- 4.9. Connaît-on une toxicité aux traitements par protons ?
- 4.10. Quelles sont les caractéristiques d'une tumeur traitable par faisceaux de protons (ceci en analogie avec celles d'une tumeur traitable par faisceaux photoniques) ?

#### 5. Le traitement

- 5.1. Nous avons observé (08.04.14) que les lasers (cf. radiothérapie classique) n'étaient pas utilisés, comment être certain de l'exacte position du patient ?
- 5.2. Lors du contrôle de position, nous avons pu observer (08.04.14) que des topogrammes (AP et LAT) étaient effectués, pourquoi ne pas utiliser la technique tomodensitométrie ? Pourquoi ne pas effectuer le contrôle sous machine ?
- 5.3. Pouvez-vous nous expliquer la méthode utilisée pour « recalcr le patient » ?
- 5.4. A. Lehde nous a parlé du partage de faisceau, comment cela module-t-il votre activité ?

5.5. Dans l'éventualité dans laquelle la morphologie du patient évoluerait au cours de son traitement (traitement autre que cérébral), est-il envisageable d'effectuer une dosimétrie adaptative, sur quels critères se base-t-on pour l'effectuer ?

## 6. Concernant l'activité professionnelle du TRM

6.1. A votre sens, quelles doivent être les spécificités/particularités professionnelles d'un TRM en protonthérapie, ceci en comparaison d'un TRM exerçant en radiothérapie ?

6.2. En quelques mots, comment décririez-vous « l'activité du TRM en protonthérapie » et en quoi diffère-t-elle de celle pratiquée en radiothérapie conventionnelle ?

## 7. Discussion - Conclusion

7.1. Quels éléments, qui n'auraient pas été évoqués au cours de cet entretien, devons-nous être particulièrement attentifs pour bien documenter notre question de recherche ?

7.2. Le gating respiratoire est-il un outil qui vous est utile ?

---

Un tout grand merci, d'avoir consacré une partie de votre précieux temps à répondre à nos questions. Si vous avez d'éventuelles remarques et/ou propositions, nous serions ravis d'en prendre connaissance.

## VII - Statistiques de la PTCOG

## Centres en activité en mars 2014

Localisation		Beam	Particule	Energie (MeV)	Début des traitements	Nombre de traitements
<b>Canada</b>	TRIUMF, Vancouver	1	Proton	72	1995	175
<b>Rép. Tchèque</b>	PTC Czech r.s.o., Prague	4	Proton	230	2012	140
<b>Chine</b>	WPTC, Wanjie / Zibo	3	Proton	230	2004	1078
	IMP-CAS, Lanzhou	1	C-Ion	400	2006	213
<b>Royame Uni</b>	Clatterbridge	1	Proton	62	1989	2446
<b>France</b>	CAL, Nice	1	Proton	165	1991	4936
	CPO, Orsay	3	Proton	250	1991	6432
<b>Allemagne</b>	HZB, Berlin	1	Proton	250	1998	2312
	RPTC, Munich	5	Proton	250	2009	1881
	HIT, Heidelberg	3	Proton	250	2009, 2012	503
			C-Ions	430	2009, 2012	1368
WPE, Essen	5	Proton	230	2013	32	
<b>Italie</b>	INFN-LNS, Catania	1	Proton	60	2002	350
	CNAO, Pavia	4	Proton	250	2011	76
			C-Ions	480	2012	106
<b>Japon</b>	HIMAC, Chiba	2	C-Ions	800	1994	8073
	NCC, Kashiwa	2	Protons	235	1998	1226
	HIBMC, Hyogo	3	Protons	230	2001	4223
			C-Ions	230	2002	1935
	PMRC 2, Tsukuba	2	Protons	250	2001	2967
	Shizuoka Cancer Center	4	Protons	235	2003	1590
	STPTC, Koriyama-City	3	Protons	235	2008	2306
	GHMC, Cunma	4	C-Ions	400	2010	985
	MPTRC, Ibusuki	4	Protons	250	2011	919
	PTC, Fukui City	3	Protons	235	2011	428
Nagoya PTC, Aichi	3	Protons	250	2013	199	
SAGA-HIMAT, Tosu	4	C-Ions	400	2013	62	
<b>Poland</b>	IFJ PAN, Krakovie	1	Protons	60	2011	39
<b>Russie</b>	ITEP, Moscou	1	Protons	250	1969	4320
	St.-Petersbourg	1	Protons	1000	1975	1386
	JINR 2, Dubna	1	Protons	200	1999	995
<b>Afrique du Sud</b>	NRF, iThemba Labs	1	Protons	200	1993	521
<b>Corée du Sud</b>	NCC, Ilsan	3	Protons	230	2007	1158
<b>Suède</b>	Uppsala	1	Protons	200	1989	1356
<b>Suisse</b>	PSI, Villigen	3	Protons	250	1984,96,13	7045
<b>Etats-Unis</b>	Loma Linda (CA)	4	Protons	250	1990	17829
	UCSF (CA)	1	Protons	60	1994	1621
	NPTC, MGH Boston (MA)	3	Protons	235	2001	7345
	IU Health PTC, Bloomington (IN)	3	Protons	200	2004	1927
	MD Anderson CC, Houston (TX)	4	Protons	250	2006	4746
	UFPTI, Jacksonville (FL)	4	Protons	230	2006	5085
	ProCure PTC, Oklahoma (OK)	5	Protons	230	2009	1364
	Upenn, Philadelphia (PA)	5	Protons	230	2010	1744
	CDH PTC, Warrenville (IL)	5	Protons	230	2010	1329
	HUPTI, Hampton (VA)	5	Protons	230	2010	767
	ProCure PTC, New Jersey (NY)	4	Protons	230	2012	512
	ProCure PTC, Seattle (WA)	4	Protons	230	2013	86
	Lee Kling PTC, St. Louis (MO)	1	Protons	250	2013	1
	Scripps PTC, San Diego (CA)	5	Protons	250	2014	1



**Centres en construction en 2013**

Localisation		Beam	Particule	Energie	Début des activités
<b>Autriche</b>	Med-Austron, Neustadt	3	Pr / C-I	430	2015
<b>Chine</b>	HITFiL, Lanzhou	4	C-Ion	400	2014
	Fudan University CC, Shanghai	3	Pr / C-I	430	2014
<b>France</b>	Centre Antoine Lacassagne, Nice	1	Protons	230	2014
<b>Allemagne</b>	PTC Dresden, Dresden	1	Protons	230	2014
<b>Italie</b>	ATreP, Trento	3	Protons	230	2014
<b>Japon</b>	PBTC, Hokkaido Hosp, Sapporo	1	Protons	250	2014
	Aizawa Hosp PTC, Nagano	1	Protons	235	2014
	Hakuokai Group PTC, Osaka	1	Protons	235	2016
	Tsuyama Chuo PTC, Okayama	1	Protons	235	2016
	i-Rock Kanagawa CC, Yokohama	4	Protons	430	2015
<b>Pologne</b>	IFJPAN, Cracovie	1	Protons	235	2014
<b>Russie</b>	PMHPTC, Protvino	1	Protons	250	2014
<b>Arabie saoudite</b>	King Fahad PTC, Riyadh	4	Protons	250	2016
<b>Slovaquie</b>	CMHPTC, Ruzomberok	1	Protons	250	2014
<b>Corée du Sud</b>	Samsung Proton Center, Seoul	2	Protons	230	2014
<b>Suède</b>	Skandion Clinic, Upssala	2	Protons	230	2014
<b>Taiwan</b>	Chang Gung Mem Hosp, Taipei	4	Protons	235	2014
<b>Etats-Unis</b>	Robert Wood, New Brunswick	1	Protons	250	2014
	MD Anderson, Orlando (FL)	1	Protons	250	2014
	FCO, Jacksonville (FL)	1	Protons	250	2014
	Oklahoma Uni, Oklahoma (OK)	1	Protons	250	2014
	Illinois PT, Chicago (IL)	4	Protons	250	2015
	McLaren PTC, Flint (MN)	3	Protons	250	2014
	PCP, Knoxville (TN)	3	Protons	250	2014
	Mayo CPBTC, Rochester (MN)	4	Protons	250	2015
	Mayo CPBTC, Phoenix (AZ)	4	Protons	250	2016

**Centres en étude de mise en place en 2013**

Localisation		Beam	Particule	Energie	Début des activités
<b>Chine</b>	SJFH, Pékin	2	Protons	230	N/A
<b>Pays-Bas</b>	Holland PTC, Delft	3	Protons	230	2016
	APTC, Amsterdam	2	Protons	N/A	2017
	UMCGPTC, Groningen	2	Protons	N/A	2017
	PTC, Maastricht	1	Protons	230	2017
<b>Russie</b>	Hopital °63, Moscou	N/A	Protons	N/A	N/A
<b>Slovaquie</b>	CCSR, Bratislava	1	Protons	72	N/A
<b>Suisse</b>	PTC Surichobersee, Galgenen	5	Protons	230	N/A
<b>Royaume-Uni</b>	The Cristie PTC, Manchester	3	Protons	N/A	2018
	PTC UCLH, London	4	Protons	N/A	2018
<b>Etats-Unis</b>	PINY, New York (NY)	4	Protons	230	2015

## VIII - Guide d'observation complété

## Activité du TRM en protonthérapie dans le cadre d'un traitement cérébral : guide d'observation

Ce tableau regroupe les éléments que nous avons déjà ainsi que ceux que nous allons acquérir ainsi que leurs caractéristiques.

Actions		Résultats	
Relationnel			
Patient	Prise en charge	de	35-40 séances. Le nombre total de séances dépend directement de la localisation et du type de tumeur à traiter. Cette notion est décidée d'un commun accord entre le médecin oncologue en charge du dossier et le physicien médical qui validera le cas.
	Temporalité	Nombre de séances	1 séance tous les jours 5 jours par semaine (parfois 4 dans le cas d'une maintenance)
		Fractionnement des séances	Au total (accueil du patient, préparation, positionnement, imagerie de contrôle, acheminement à la salle de traitement, traitement, libération) 60 à 90 minutes environ.
		Temps de la séance	Cette notion est intimement liée au nombre de champs (positions et dimensions du faisceau) traités, mais généralement, on compte environ 15-20 minutes de traitement, donc d'irradiation.
		Temps d'irradiation	Avant la simulation virtuelle, passage obligé lors d'un tel traitement, le patient ne va pas rencontrer le TRM, à l'exception peut être le cas où il demanderait spécifiquement à découvrir le traitement par protons avant d'avoir sa propre thérapie.
		Explications données	La TRM va expliquer au patient le déroulement complet de la simulation (moulage avec le matériel de contention adéquat, scanner CT permettant d'effectuer la planification dosimétrique) ainsi que sa durée et que sa nécessité absolue dans la prise en charge du traitement. Ces coupes anatomiques vont permettre d'effectuer une balistique prévisionnelle. D'autre part, le TRM va également expliquer au patient le comportement à adopter dans le scanner pour obtenir une imagerie de qualité (absence de mouvements, respiration calme, régulière et d'amplitude constante, conserver la position jusqu'à ce qu'il soit libéré).

				<p><i>Juste avant la première séance de protons, le patient est accompagné par le TRM et/ou le médecin radiothérapeute afin de découvrir les locaux qui vont l'accueillir tout au long de son traitement. Ceci afin qu'il puisse être conscient de l'implication des collaborateurs dans le bon déroulement de son traitement.</i></p> <p><i>Les thérapies utilisant de protons sont exclusivement à visée curative (absence de rémission), ceci à l'opposé des thérapies par photons/électrons qui peuvent être curatives mais aussi palliatives ou encore analgiques.</i></p> <p><i>Ces effets sont décrits (brièvement) par le médecin radiothérapeute au cours des entretiens qu'il peut avoir avec le patient. Le TRM ne va pas en parler directement, mais informer le patient qu'il peut lui en parler en cas de besoin.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Le patient se doit de respecter au mieux les rendez-vous agencés.</i></li> <li>- <i>Avertir les collaborateurs en cas d'anormalité notable (douleurs, changements morphologiques, problème quelconque).</i></li> <li>- <i>Respecter les consignes prévues pour le bon déroulement du traitement.</i></li> <li>- <i>Ne pas bouger au cours de l'irradiation.</i></li> </ul>
	Avant le premier traitement			
	Effets souhaités			
	Effets toxiques			
	Consignes données	Sécurité	Recommandation de vis-à-vis de l'optimisation de l'irradiation	
		Compliance	Action du patient sur son traitement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Utiliser un shampooing au pH neutre ou pour bébé et ne pas mettre de lotion capillaire. (pour éviter une inflammation du cuir chevelu, ou une quelconque réaction).</i></li> <li>- <i>Se couper les cheveux dès la simulation (selon la localisation du volume à irradier, il n'est pas impossible qu'une alopecie temporaire ou définitive, si les glandes capillaires sont exposées) survienne)</i></li> <li>- <i>Ne pas exposer la tête au soleil, mais porter un chapeau, une casquette ou un foulard (les rayons UV peuvent créer une forte inflammation sur les tissus cutanés, le coup de soleil. La peau est déjà souvent fragilisée avec un traitement utilisant des protons mais aussi des photons. Il est donc indispensable de protéger correctement la zone à irradier).</i></li> <li>- <i>Eviter de nettoyer les oreilles avec des cotons-tiges (éviter une inflammation du conduit auditif externe).</i></li> <li>- <i>Utiliser de la crème hydratante conseillée par le médecin (en général, de la Biafine (Janssen Pharmaceutica) est prescrite par le médecin oncologue, cette crème est connue et appréciée pour ne pas faire de réaction dermique. Il faut néanmoins respecter la posologie et ne pas l'appliquer avant le traitement).</i></li> </ul>

				<p>- <b>Crème hydratante</b> : Le patient doit appliquer la crème hydratante recommandée (Biafine) sur la peau lésée ou qui présenterait une symptomatologie inflammatoire. Il ne faut pas l'utiliser directement avec le traitement (&lt;3 heures avant). En effet, cette action présente un risque de modifier de la dosimétrie prévisionnelle en agissant comme un Bolus en modifiant la répartition spatiale de la dose.</p> <p>- <b>Anti-inflammatoires</b> : Dans certains cas, le médecin peut prescrire de tels médicaments pour aider le patient à supporter les douleurs (souvent cutanées) dues à l'irradiation.</p> <p>- <b>Calmants</b> : Il arrive dans certains cas que le patient présente un <b>état anxieux</b> lors de sa séance de protons (stress dû à la maladie, impression d'emprisonnement sous le masque, d'étouffement avec le bitebloc) et dans ces cas, il est possible de lui procurer une dose de Temesta (Myeth-Lederle) pour l'aider</p>
Collaboration	Equipe	TRM	<p>Une dizaine de TRM</p> <p>2 TRM assurent la prise en charge complète lors du traitement</p> <p>- 1 : <b>accueil</b> du patient et discussion, <b>positionnement</b> avec les contentions requises, acheminement dans la salle de scanner, mise en place dans le <b>CT</b>, acheminement vers la salle de traitement, <b>mise en place sous la gantry</b>, fermeture de la zone d'exposition.</p> <p>- 2 : vérification de l'identité du patient, réalisation de tâches administratives, vérification de la correspondance pour le traitement, contrôle de la <b>position au topogramme, matching</b> de la position avec les points, statistiques de la position, <b>irradiation</b>, contrôle du nombre de SPOTS délivrés, administratif de sortie, gestion du workflow.</p>	
			<p>Responsabilités du traitement</p> <p>- Contrôle <b>visuel</b> et appréciatif de la <b>position du patient</b> (par rapport à ce qui est connu, aux coordonnées de références et aux images prises lors de la simulation virtuelle).</p> <p>- Contrôle <b>radiologique</b> de la <b>position du patient</b> (2 topogrammes : AP et LAT et périodiquement des coupes millimétriques).</p> <p>- <b>Surveillance</b> visuelle (et/ou monitoring du patient) lors des topogrammes et lors de l'irradiation)</p> <p>- <b>Irradiation sous contrôle visuel</b> (caméras : 4) et sonore (microphone : 1)</p>	
		Médecin	<p>Fonction</p> <p>- Prescrit la dose à délivrer ainsi que les <b>PTV</b> (Planned Treatment Volume), <b>marges</b>,</p>	

			<p><b>OAR (Organes A Risques) et la ballistique générale.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Assure un <b>suivi du patient</b> tout au long de son traitement (environ une fois par semaine, ou dans la nécessité, plus souvent).</li> <li>- <b>Autorise l'irradiation</b> dans le cas où le positionnement n'a pas pu être effectué d'une manière exacte (avec collaboration des physiciens) mais que cela n'entrave pas le bon déroulement du traitement.</li> </ul>
	Rapports patient	au	<p>Lors de la première séance, le médecin va <b>accompagner</b> tout au cours de cette dernière le patient dans la procédure et ainsi lui expliquer au mieux ce qui va lui arriver, pourquoi, comment et comment il doit réagir.</p>
Autres	Fonction		<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Aide</b> : Accueil du patient, effectue les <b>déplacements</b> du patient sur la table spécialement dédiée (CT, salle de traitement), prend soin des TRM, effectue des tâches administratives.</li> <li>- <b>Médecin anesthésiste</b> : Dans le cas de prise en charge d'enfants de moins de 6-8 ans, il est indispensable d'<b>anesthésier</b> ce dernier, afin qu'il ne bouge pas et ne soit pas incommode par le traitement et les investigations y-rattachés. Le médecin anesthésiste va assurer un <b>suivi des fonctions vitales</b> du patient tout au long de la planification et du traitement à proprement parler.</li> <li>- <b>Infirmier</b> : Rencontre régulièrement le patient, prend soin du patient et assiste le médecin anesthésiste.</li> </ul>
Appareillage	Partage de faisceau	Effet sur l'action du TRM	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité de placer les séances des patients en <b>quinconce</b> afin que les traitements (l'irradiation) ne tombent pas en même temps et ainsi <b>optimiser le temps d'utilisation</b> du faisceau.</li> <li>- <b>Diminue le nombre de patients</b> traitables sur la journée.</li> <li>- En cas de panne sur le cyclotron, toutes les installations sont indisponibles pour le traitement. Il est donc nécessaire d'ajuster le plaming.</li> </ul>
	Workflow	Gestion par l'équipe	<p>Le workflow doit être agencé d'une manière optimale pour utiliser au mieux le faisceau à disposition (séances des patients agencés en quinconce, gestion des maintenances, limitation des pannes par des contrôles d'Assurance Qualité réguliers).</p> <p>Lorsqu'une gantry utilise le faisceau de protons il faut que les autres soient en phase de préparation d'irradiation ou en libération du patient.</p>
	Maintenance	Fréquence	<p>Une petite maintenance, surtout pour la vérification d'éléments mineurs est effectuée</p>

				<p><b>hebdomadairement</b> (en général sur le weekend). Elle permet également aux équipes d'ingénieurs d'effectuer des mesures de stabilité (QA) sur l'appareillage (gantry, repérage anatomique, CT) des mesures de précision de la table, des installations, et autres. Des maintenances générales sont agencées <b>trimestriellement</b>.</p> <p>De rares maintenances, suite à des pannes, peuvent survenir et empiéter sur le bon déroulement du traitement du patient (reporter une ou plusieurs séances).</p> <p><b>Décalage temporel</b> des séances de traitement du patient (la(les) séance(s) qui n'ont pas eu la possibilité d'être effectuée(s) sont reportées au plus vite) si le délai de latence entre la dernière séance effectuée et celle après la maintenance n'est pas trop important, la planification dosimétrique ne s'en voit pas modifiée.</p> <p>Il est nécessaire d'en informer les physiciens et le médecin responsable afin qu'ils puissent déterminer l'incidence que peut avoir, néanmoins, un temps de latence plus important.</p>
<b>Simulation virtuelle</b>				
Accueil	Patient	Généralités	Eléments contrôlés	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eléments <b>standards</b> à un examen radiologique (identité du patient, correspondance administrative, mensurations).</li> <li>- La <b>compréhension</b> du patient vis-à-vis du traitement. L'acceptation du traitement (document légal à signer).</li> </ul>
		Discussion	Evolution du traitement	<p>Explication de l'examen radiologique à proprement parler (pas bouger, tenir la position). Les explications sont sensiblement <b>pareilles</b> à celles données pour un examen tomodensitométrique standard.</p>
			Problèmes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Angoisse du patient vis-à-vis des <b>contentions</b>.</li> <li>-----<b>Masque</b> : Le patient peut présenter des difficultés à respirer, un besoin de voir hors de la contention, le masque peut trop le serrer, être peu confortable ou qui applique une pression douloureuse à un endroit (oreille, nez, menton, front).</li> <li>----- <b>Biteblock</b> : Le patient peut présenter des difficultés à le mettre en place, à respirer, à avaler sa salive, à garder la position, il peut présenter une suffocation, un réflexe vomitif, des vomissements, une sensation d'étouffement.</li> <li>- Difficulté du patient à <b>garder la position</b> le temps de traitement/simulation (problèmes pour respirer, douleurs, stress, perte des repères sensoriels).</li> <li>-angoisse du patient par rapport au temps (<b>la durée</b>) du moulage et de l'examen.</li> </ul>

				<p>- Poids : Lors de la simulation virtuelle le poids de référence va être relevé puis, lors des séances de traitement, <b>une fois par semaine</b>.</p> <p>- Haut du corps (vêtements, colliers, écharpe,...).</p> <p>- Tête (chapeau, lunettes, prothèse dentaire, prothèse auditive,...).</p> <p>(Cheveux en couvettes reproductibles (doubles).</p>
Préparation	Matériel	Zones à préparer	Mensurations	<p>- <b>Bite block</b> : C'est un dispositif buccal appliqué au contact du palais (vacuum) morphologique au patient permettant d'immobiliser complètement le crâne (le vacuum est maintenu pendant la simulation et les séances de traitement). Ce dispositif est fixé à une barre métallique permettant d'obtenir une position confortable (simulation) et reproductible (séances).</p> <p>- <b>Masque</b> : C'est un moulage (thermoformé) de la tête du patient effectué lors de la simulation et qui va lui permettre de garder la position dans une certaine tolérance. La position des yeux, du nez et de la bouche va être découpée sur le masque pour donner au patient un meilleur confort.</p> <p>- <b>Molécure</b> (couchette bleue) : C'est un coussin qui peut être moulé selon la morphologie du patient. Elle permet d'assurer un confort accru et une meilleure reproductibilité.</p> <p>- <b>Matelas</b> dans le dos, <b>coussin</b> sous les genoux et <b>sangles</b> : Ces éléments ne sont pas contentions à proprement parler mais permettent au patient d'avoir la position la plus confortable possible. En effet, plus le patient est confortable, moins il a de risques de bouger et par conséquent, le confort du patient est gage de position optimale pour le traitement.</p>
			à	
Patient	Position	Traitement	Instrumentation nécessaire	<p>En <b>déclubus dorsal</b>, ou en <b>déclubus ventral</b> suivant la localisation du volume à traiter (il est nécessaire que la structure à traiter soit au plus près de nozzle).</p> <p>Les bras <b>le long du corps</b>, le plus confortablement possible.</p>
			Corps	
			Bras	

				<p>Avec des <b>sangles</b> et un confort accru.</p> <p>Couverture + chaleur + musique + communication (ce qu'on va faire, si ça bouge...). Le confort du patient est un gage d'immobilité.</p> <p>Plan sagittal du patient + biteblock ou masque + taches derousseurs/cicatrices pour le centrage en hauteur (si le patient est bien positionné dans l'axe des Z).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La position du patient dans le CT.</li> <li>- Le <b>plan sagittal</b> du patient (à peu près).</li> <li>- La position du <b>biteblock</b> ou du <b>masque</b>.</li> <li>- Des <b>repères cutanés</b> (taches derousseurs, cicatrices) pour la hauteur du patient dans l'appareil</li> </ul>	<p>Immobilité du corps</p> <p>Confort</p> <p>Morphologiques / Cutanés</p> <p>Définie par...</p>	<p>Fixateurs</p> <p>Repères</p> <p>Position de référence</p>	<p>Contentions</p> <p>Marqueurs</p>	
Imagerie	Modalité	<p>Physiologique</p> <p>Anatomique</p>	<p>Choix</p>	<p>Pas au cours de la simulation virtuelle, il peut néanmoins être nécessaire d'avoir une imagerie physiologie pour déterminer une éventuelle dissémination des cellules tumorales et d'en déterminer la mesure</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>CT de simulation calibré pour les protons</b> (le même que pour les topogrammes de positionnement). Le fait d'avoir un CT calibré de la sorte permet d'être sûr que les densités que vont rencontrer les protons dans le corps du patient sont les mêmes que celles de la planification dosimétrique. En effet, les photons (CT traditionnel) on un pouvoir d'arrêt bien supérieur que celui des protons ce qui induit que l'imagerie de planification doit être calibré pour la particule qui va être utilisé.</li> <li>- Imagerie MR, couplée à une investigation MN réalisée au préalable qui sera utilisée (fusionnée au CT) pour <b>optimiser la délimitation</b> des volumes à traiter et des organes à risques.</li> </ul>	<p>Choix</p>	<p>Produit injecté</p> <p>Repères</p> <p>But</p>	<p>Imagerie</p> <p>Modalité</p>	
				<p>Sans</p> <p>Sans</p> <p>Avec. Ces repères radio-opaques (sous forme de petites pastilles collantes) permettent de <b>corrèler</b> efficacement la position de référence du CT (position 0) avec celle du patient.</p> <p>Il est commun d'utiliser des <b>repères cutanés fixes</b> (taches derousseurs, cicatrice, ...)</p> <p>Par le <b>médecin radio-oncologue</b> responsable du cas et les <b>physiciens médicaux</b>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Nombre</b> de champs : Généralement entre <b>1 et 3</b></li> <li>- <b>Géométrie</b> des champs : A <b>30°</b> entre eux.</li> </ul>	<p>PCI</p> <p>Radioactif</p> <p>Radio-opaques</p> <p>Anatomiques</p> <p>Segmentation</p> <p>Balistique choisie</p>	<p>Sans</p> <p>Sans</p> <p>Repères</p> <p>But</p>	<p>Imagerie</p> <p>Modalité</p>	



			<p>Volumes (par le médecin)</p> <p>Isocentre</p> <p>Choix</p> <p>Problématique</p>	<p>- <b>Volumes à traiter : PTV (Planning Target Volume), GTV (Gross Tumor Volume) avec marges adéquates</b></p> <p>- <b>Organes à risques</b></p> <p><b>Pas d'utilisation d'isocentre, mais du volume à traiter dans sa globalité.</b></p> <p>Encéphale sain, tronc cérébral, hypophyse, chiasma, œil (cornée, rétine, nerf optique, cristallin), nerfs périphériques, oreille (cochlée), glandes salivaires (parotides), articulation temporo-mandibulaire.</p> <p>- Leur <b>localisation par rapport au PTV</b> peut être problématique, notamment si ils sont au contact direct ou qu'il faut les traverser pour atteindre le PTV.</p> <p>- Leurs <b>dimensions</b> : Dans le cas d'une petite structure, la dose qu'elle peut cumuler est plus importante qu'une grande structure.</p> <p>- Leur <b>visibilité radiologique</b> : Ces structures sont souvent difficiles à visualiser.</p> <p>- Leur <b>radiosensibilité</b> : Chaque tissu présente une radiosensibilité propre qu'il faut observer attentivement pour limiter l'arrivée d'effets néfastes.</p> <p>Dans un <b>maximum</b> de vues, dans les vues générales, les vues des moniteurs.</p> <p>Sans (juste le nom et l'identification du patient)</p> <p>Entre 2 semaines et 4 semaines après la simulation virtuelle.</p>
<b>Planification dosimétrique</b>				
Préparation	Patient	Imagerie	Antécédents	<p>Il est impérativement nécessaire d'avoir une imagerie MR de comparaison très récente. Elle va permettre de segmenter les zones (zone à irradier), les organes à risques et surtout de vérifier, au terme de la planification dosimétrique la répartition de la dose dans sa globalité.</p> <p>CT (calibré pour les protons) + MR + modalités physiologiques</p>
	Treatment planning system	Logiciel	Fusion inter-modalaire	<p><b>Inconnu.</b> Mais au CPT, la majorité des instruments et des logiciels utilisés sont développés spécifiquement pour le matériel (la Gantry, le CT, le cyclotron). Ainsi on trouve dans le commerce des TPS génériques comme Eclipse (Varian) qui sont capable de gérer une planification de traitement par protons.</p>
			Nom	<p>- Traitement par <b>Photon</b> (radiothérapie conventionnelle, 3D-RCT, IMRT, VMAT)</p> <p>- Traitement par <b>Proton</b> (passive scattering et scanned beam, IMPT, SFUD)</p>
			Possibilités de planification	3 faïcesaux : 9h de calculs dosimétriques environ
			Temps total pour	

		une planification	
		Adaptation (temps)	Logiciel relativement <b>complexe</b> à l'utilisation et le fait de ne <b>pas avoir d'isocentre</b> va perturber quelque peu l'utilisateur.
Contraintes	Patient	Utilisation Intrinsèques	<p>Organes à risques + radiosensibilité</p> <p>- <b>Encéphale</b> : maximum 45 Gy            - <b>Tronc cérébral</b> : maximum 50 Gy            - <b>Hypophyse</b> : maximum 50 Gy            - <b>Chiasma</b> : maximum 54 Gy            - <b>Oeil</b> :            ----- Cornée : max 30gy            ----- Rétine : <math>V_{45 Gy} &lt; 50\%</math>            ----- Nerf optique : moyenne de 10 Gy            - <b>Nerfs périphériques</b> : maximum 60 Gy            - <b>Oreille</b> (cochlée) : maximum 40 Gy            - <b>Glandes salivaires</b> (parotides) : moyenne de 30 Gy            - <b>Articulation temporo-mandibulaire</b> : maximum 60 Gy            - <b>Peau</b>            - <b>Cuir chevelu</b></p> <p>Les protons sont des particules qui <b>perdent très rapidement leur énergie</b> lorsqu'elles traversent des structures avec des densités importantes (os). En revanche, dans des structures aqueuses, elle ne perd que peu d'énergie.</p> <p>Le gating (synchronisation entre la respiration du patient et le traitement) n'est pour le moment <b>pas possible</b>. Mais avec le Spotscanning cela pourrait vraisemblablement le devenir (par rapport à la technique de traitement).</p> <p>- Décubitus dorsal            - Bras le long du corps</p> <p><i>BiBloc et/ou masque</i></p> <p>Proportionnelle à la profondeur désirée et à la puissance du faisceau  <b>34 cm pour 250 MeV</b></p> <p>Les interactions de Coulomb sont responsables du schéma d'arrêt des protons dans la matière.</p> <p>- Ralentissement par des collisions avec des électrons            - Déviation par des collisions avec des nucléons</p>
		Morphologie (structures traverser) Mouvements	
		Positionnement	
		Contentions	
	Technique	Profondeur de dépôt d'énergie Pouvoir d'arrêt Interactions	
		Extrinsèque	
		Protons	

Planification	Généralités	Protons	Particularités	- Collisions frontales avec un noyau nucléaire	
				- <b>Particule chargée positivement</b> (et donc par conséquent attirable par une aimantation)	
Technique	Balistique	Energie	Action sur l'organisme	- <b>Lourde</b> (2000x la masse de l'électron)	
				- <b>Haut TLE</b> (Transfert Linéique d'Energie). Le proton va déposer un maximum de son énergie (dose) un <b>en point précis</b> (Pic de Bragg).	
Technique	Modulation	Possibilités	Choix	- <b>Passive Scattering</b> : pencil beam pour les traitements oculaires	
				- <b>Scanned Beam</b> : spotscanning pour toutes les autres localisations (IMPT, SFUD)	
Dosimétrie	Recherché	Toxicité	Dose au PTV totale	Selon la profondeur désirée, l'énergie de sortie du faisceau de protons module la portée du pic de Bragg. On peut faire varier rapidement l'énergie de sortie grâce à des plateaux (40) de 4mm de polycarbonates disposés à la sortie du nozzle.	
				- <b>Range shifting</b> avec des plateaux (40 de 4mm de polycarbonates, mobiles) ou avec une roue spécifique (en rotation).	
Dose intégrale	OAR	Dose au PTV totale	OAR	- <b>Champs magnétiques</b> pour incurver le faisceau.	
				1.8-2 Gy x 35-40 séances : <b>63-80 Gy</b> avec des principes de boost	
Dose intégrale	OAR	Toxicité	OAR	Les effets sont sensiblement pareil à ceux obtenus en radiothérapie conventionnelle à l'exception près qu'ils sont en général plus forts.	
				- <b>Encéphale</b> : Encéphalite radique, démence, nérose - <b>Oeil</b> : Cataracte à survenue tardive, cécité - <b>Nerfs périphériques</b> : névrites - <b>Oreille</b> : otites répétées - <b>Glandes salivaires</b> : asialie temporaire ou définitive - <b>Articulation temporo-mandibulaire</b> : trismus sévère - <b>Peau</b> : Radiodermites, fibroses, télangiectasies - <b>Cheveux</b> : Alopecie temporaire ou définitive	
Dose intégrale		Signifie dose <b>délivrée hors de la tumeur</b> . Cette dose est tout à fait inutile et néfaste pour le patient. Le quantitié de dose intégrale <b>n'est pas quantifiable</b> , mais qualitativement on sait que cette fraction de dose est nettement inférieure avec l'utilisation de protons à la place de photons. C'est la raison pour laquelle l'utilisation de cette technique de traitement est particulièrement adaptée dan les cas pédiatrique.			

					<p><i>Auparavant : utilisation de TLD (Dosimètres ThermoLuminescents), mais actuellement, il n'y en a plus besoin, compte tenu de la répartition de la dose connue.</i></p> <p><i>Sous la forme de schémas, de coupes CT représentatives et de DVH (Dose Volume Histogramm).</i></p> <p><i>Oui, avec le PTV et les OAR les plus proches.</i></p> <p><i>Le TRM, le physicien, le médecin radiothérapeute et le patient qui doit accepter le traitement.</i></p> <p><i>Sans</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Refus du traitement</i></li> <li>- <i>Evolution (non favorable) entre la planification et la première séance.</i></li> <li>- <i>Angoisse surpassant les capacités du patient à effectuer le traitement.</i></li> <li>- <i>Structures métalliques proches du champ de traitement : le métal a une densité suffisamment importante pour bloquer complètement les protons et si il ne les bloque pas, il y a des phénomènes de diffraction et de réflexion qui poseraient problème pour établir une dosimétrie exacte.</i></li> </ul>
					<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Panne.</i></li> <li>- <i>Mauvaise calibration du CT de simulation (calibration par rapport aux protons)</i></li> <li>- <i>Temps de planification très important.</i></li> <li>- <i>Erreur dans la balistique.</i></li> <li>- <i>Chevauchement de structures à traiter et de volumes à épargner.</i></li> </ul>
<b>Traitement</b>					
					<p><i>Au moins 4 angles de vues différents permettant de voir :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Le monitoring et la respiration du patient.</i></li> <li>- <i>La communication par gestes avec le patient (le TRM parle dans le micro et le patient répond par une gestuelle connue).</i></li> <li>- <i>Les mouvements de la gantry (lors des changements de champs).</i></li> <li>- <i>Le couloir d'accès (vérifier qu'il n'y a personne d'autre que le patient dans la salle de traitement).</i></li> </ul>
					<p><i>Vérifier l'avancement de chacun de autres sites de traitement et localiser un éventuel</i></p>

	<p>tous les sites</p> <p>Imagerie de contrôle</p> <p>Matching</p>	<p>retard dans la question du partage du faisceau.</p> <p><b>Optimiser les actions de chacun.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Topogramme AP et LAT</b> (fait par le CT calibré pour les protons) tous les jours pour le recalage de la position.</li> <li>- <b>Coupes CT</b> à une intervalle de 10 jours pour vérifier l'évolution et le positionnement morphologique, ces coupes peuvent mener à une dosimétrie adaptative si le cas se présente.</li> </ul> <p>Grâce aux topogrammes de positionnement, on va comparer la position du patient dans le CT à sa position lors de la simulation virtuelle. Ceci à l'aide de points :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Vert</b> : Ces points se situent dans la <b>table</b>. Ils permettent de déterminer si la table est correctement positionnée dans le CT et par conséquent sous la gantry.</li> <li>- <b>Jaunes</b> : Ces points se situent à l'intérieur du patient mais représentent des structures morphologiques permettant de déterminer la <b>position macroscopique</b> du patient. En général, ces points se situent au niveau des grandes structures anatomiques (voûte du crâne, vertèbres).</li> <li>- <b>Rouges</b> : ces points délimitent des <b>structures proches ou au contact du volume tumoral</b>. Il est nécessaire d'avoir une correspondance optimale entre les points déterminés lors de la simulation et ceux obtenus lors du scanner de positionnement.</li> </ul> <p>Les points rouges sont représentés sur une courbe statistique ( sous forme de colonnes) qui permet de déterminer si la structure se trouve dans une zone de tolérance prédéfinie et permet à l'appareil de proposer une correction optimale dans les trois plan XYZ, que l'opérateur validera ensuite. La tolérance de déplacement est inférieure à 3 mm</p> <p>Lors de l'irradiation, on visualise les <b>Spots</b> (nombres et localisation sur le nozzle grâce à un système de représentation en direct) de plus on a un contrôle visuel et sonore des déplacements des <b>Ranges</b> (système pour moduler la portée du faisceau de protons).</p> <p>Il y a communication entre le TRM (par oral) et le patient (réponse sous forme de signe) à chaque fois que cela peut être nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entre chaque <b>mouvement</b> de la machine.</li> <li>- <b>Avant</b> chaque irradiation.</li> <li>- Si il y a de <b>l'attente</b> (problématique au niveau du partage de faisceau).</li> </ul>
	<p>Contact</p> <p>Audio avec le patient</p>	

				<ul style="list-style-type: none"> <li>- En cas de <b>problème</b> (le patient a appris une gestuelle a effectuer).</li> <li>- Pour <b>optimiser le partage du faisceau</b> (dire quant le traitement commence et se termine).</li> <li>- Pour demander ou aller porter de l'<b>aide</b>.</li> </ul>
	Avec les autres sites			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Garder un œil sur les moniteurs des autres salles. Ce qui permet de déterminer leur état d'avancement ainsi que le temps à attendre avant d'utiliser le faisceau.</li> <li>- Gestion du <b>dossier du patient</b> (numéro de séance, dose, fraction).</li> <li>- Gestion des <b>rendez-vous</b> du reste de la journée</li> <li>- <b>Workflow</b> entre les sites (quel site doit encore faire quoi, le TRM peut-il aider quelque part ?)</li> </ul>
	Autre	Partage faisceau Administratif		<ul style="list-style-type: none"> <li>- CT-scann standard</li> <li>- Calibration journalière pour les <b>protons</b>.</li> <li>- Coordonnées <b>position patient</b> (déterminées lors de la simulation virtuelle)</li> <li>- Position table + <b>Gantry</b> (positions actuelles, le système va permettre d'amener ces positions à celles recherchées pour le traitement).</li> <li>- <b>Eclairage</b> de la salle (grâce à un système d'éclairage adapté et à des enceintes stéréo, il est possible de créer un environnement agréable et confortable pour le patient).</li> <li>- <b>Vidéo</b> autres sites (gestion du workflow et du partage du faisceau).</li> </ul>
Salle de traitement	Imagerie de contrôle Moniteurs	CT-Scann caractéristiques +		
	Table			<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Gantry 1</b> : La table est amenée par un <b>chariot mobile</b> automatisé (lent, ceci dans un soucis de limiter l'énergie cinétique qu'acquerrait le patient en cas de vitesse augmentée qui risquerait de le faire se déplacer). Elle va se déplacer sous la gantry et <b>rester fixe</b> par rapport à celle-ci (mouvement en carrousel, la distance entre la table et la gantry est fixe).</li> <li>- <b>Gantry 2</b> : La table est placée sur un <b>bras articulé</b> qui permet d'effectuer toutes les rotations nécessaires à un bon positionnement sous la gantry. Les déplacements s'effectuent lentement pour les mêmes raisons susmentionnées.</li> </ul>
	Gantry	Directionnel		<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Gantry 1</b> : Elle se déplace par des mouvements <b>rotatifs</b> avec la gantry et la table du patient (<b>mouvement carrousel</b>). A la sortie du faisceau se trouve un nozle mobile qui peut se déplacer en direction du patient.</li> <li>- <b>Gantry 2</b> : Elle se déplace autour de la position (<b>isocentrique</b>) de la table du patient. A la sortie du faisceau se trouve également un nozle mobile et doté de</li> </ul>

				<p>capteurs.</p> <p>L'isocentre de la tumeur n'est <b>jamais modélisé</b>. D'une part, il est nécessaire de traiter la tumeur dans sa <b>globalité</b>, d'autre part les <b>contentions</b> et la présence d'un <b>topogramme biplan</b> utilisés sont suffisamment précises pour s'affranchir de représenter l'isocentre. Par conséquent, les lasers (de radiothérapie conventionnelle) ne sont pas utilisés</p>
Mise en place	Patient	Position reproductibilité	Radiologique	<p>Avant toute irradiation, il est nécessaire, sinon indispensable d'effectuer une <b>imagerie de contrôle</b> de la position du patient dans les conditions de traitement sous CT (sous <b>topogrammes</b> réellement). Cette imagerie radiologique donnera des points de contrôles à vérifier.</p> <p>Les contentions utilisées doivent être <b>strictement pareilles</b> à celles utilisées lors de la simulation virtuelle (masque ou biteblock).</p> <p><b>Une fois par semaine</b> en général</p>
	Evolution	Mensurations / Anatomie	Contentions utilisé	<p>Le CT (coupes périodiques) permet également de déterminer si il y a une <b>évolution morphologique</b> (la tumeur qui changerait de forme). Ainsi il est possible d'effectuer une dosimétrie adaptative utilisant les coupes les plus récentes. Ceci dans les buts de vérifier que la <b>couverture de dose soit toujours optimal</b> et d'autre part que les <b>organes voisins ne soient pas irradiés</b>.</p>
	Contrôle	Patient	Position dans l'espace	<p>La table mobile va se déplacer dans l'espace jusqu'aux <b>coordonnées</b> qui ont été définies comme étant optimales lors de la simulation virtuelle. Le TRM doit s'assurer que la <b>position réelle et finale de la table correspond aux coordonnées théoriques</b>.</p>
			Imagerie contrôle	Utilisation des topogrammes <b>Antéro-Postérieur (AP)</b> et <b>Latéral (LAT)</b> .
			Corrélation 2D	Utilisation de la technique de Matching avec les <b>points de couleurs</b> (verts, jaunes et rouges) ainsi que les <b>statistiques</b> pour déterminer si la table est à la bonne place et si le patient est correctement positionné.
		Table		<p>- Gantry 1 : La table est déplacée (lentement) grâce à une <b>télécommande</b> dédiée jusqu'à la position où elle se retrouve attachée (le plateau supérieur) au carrousel.</p> <p>- Gantry 2 : La table est déplacée sur un bras articulé via une <b>télécommande</b> dédiée.</p>
		Gantry		Elles sont commandées via une <b>télécommande</b> pour aller dans la position de traitement. Par convention, on va toujours commencer avec la position de gantry la plus éloignée de la position 0.

Mise en corrélation 2D	Points de contrôles	Choix	Structure anatomique	<p>Les points de contrôles qui vont être matchés sont définis par le médecin radiothérapeute lors de la simulation virtuelle. Il en définit le nombre.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Verts</b> : En général 1 à 3 points qui permettent de déterminer la position <b>patient-table</b>.</li> <li>- <b>Jaune</b> : Utilisation de 3 à 6 points qui permettent de déterminer si la <b>position générale du patient</b> dans l'espace (XYZ) est correcte.</li> <li>- <b>Rouge</b> : Utilisation de 10 points et plus qui permettent de déterminer si la zone à traiter est <b>convenablement placée</b>, en plus de la position dans l'espace (hauteur, latéralité, profondeur), il est déterminable deux autres notions, le pitch et le roll (inclinaison caudo-craniale ou inversement et inclinaison latérale, le roulis). Avec ces derniers points, la précision est de rigueur.</li> </ul> <p>Les structures choisies pour les points de contrôles sont facilement <b>trouvables</b> et surtout <b>peu mobiles</b>. Une grande différence pourrait traduire une évolution morphologique du patient.</p>
		Tolérance		<p>Variable selon le cas, mais de <b>1 à 4 mm</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Trouver et marquer</b> les points de références sur l'image du jour puis <b>corrélés</b> entre la référence effectuée lors de la simulation virtuelle et l'image du jour.</li> <li>- L'ordinateur présente des <b>statistiques de positionnement</b> avec tolérance ce qui permet de déterminer si un ou plusieurs points de contrôles sont déviants.</li> <li>- Mise en évidence <b>graphique des déplacements</b>.</li> <li>- Après déplacement de la table, représentation des <b>nouveaux décalages</b> tolérables.</li> <li>- <b>Acceptation</b> pour traitement.</li> </ul>
		Principe		<p>Cette technique permet d'assurer une <b>reproductibilité</b> très importante mais également de déceler très rapidement une <b>imprécision</b> ou un <b>changement morphologique</b>.</p> <p>Utilisation du <b>CT de simulation</b> ou un <b>CT utilisé pour une planification adaptative</b>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Mouvements</b> (le patient ne doit pas bouger, un mouvement serait peut être un signe de problème).</li> <li>- <b>Constantes vitales</b> en cas de besoin</li> </ul> <p>La Gantry va bouger entre les irradiations, il faut veiller à ce qu'elle ne touche pas le patient ou autre chose.</p> <p>Communication avec le patient, vérifier que tout va pour le mieux.</p>
Irradiation	Image	Reproductibilité		
	Contrôle	Référence	Mouvements patients	
		Audio	Mouvements extrinsèque	
			Avant l'irradiation	



	Technique	Moniteur	Visualisation du flux de protons	<p>- <b>Spots</b> : Visualisation du nombre de « paquets de protons » arrivant sur le nozzle, ce qui donne le débit de protons (d'énergie et de dose) ainsi que leur position par rapport au centre du champ.</p> <p>- <b>Plates</b> : Visualisation de la position des plates de polycarbonate ce qui donne l'énergie du faisceau.</p> <p>Avec le nombre de <b>spots</b> délivrés.</p>
			Contrôle dosimétrique en direct	
<b>Autres</b>				
Collaborateur	TRM	Nombres Fonction		10 TRM Dosimétrie, planification, traitement, administratif
Patients	Nombre	Jour Année		Maximum <b>16</b> patients par jour 2012 : <b>5000</b> patients
	Frais		Traitement complet Remboursement LAMaL	<b>25'000 CHF</b> ( <a href="http://www.sgsinp.ch/prototr-f.htm">http://www.sgsinp.ch/prototr-f.htm</a> ) - Mélanome intraoculaire (OPTIS) - Méningiomes (bénin et malin) et gliomes peu avancés - Tumeurs situées dans la région du cou, du nez et des oreilles (ORL) - Sarcomes, chondromes et chondrosarcome - Tumeurs des petits enfants (+anesthésie), des enfants et des adolescents <a href="http://www.psi.ch/info/MediaBoard/Protonentherapie_f.pdf">http://www.psi.ch/info/MediaBoard/Protonentherapie_f.pdf</a> page 13

## IX - Echancier du travail de recherche

