

## Physique de l'effet FLASH : Machines, Faisceaux et Défis Métrologiques

Sophie Heinrich

Institut Curie – Centre de Recherche, Orsay

Sophie.heinrich@curie.fr

**Contexte** : Utilisée dans environ 50 % des cas au cours du parcours de soin, la radiothérapie joue un rôle fondamental dans le traitement du cancer. L'enjeu de la planification des traitements de radiothérapie est de délivrer une forte dose de rayonnement ionisant à la tumeur, tout en préservant au maximum les tissus environnants. Dans certains cas, la radiosensibilité d'un organe à risque est encore un facteur limitant à la dose de traitement. L'exposition à une irradiation à Ultra-Haut Débits de Dose (UHDD), popularisée sous le nom d'irradiation FLASH ou FLASH-RT, est apparue comme une nouvelle modalité d'irradiation qui pourrait permettre l'élargir la fenêtre thérapeutique (Figure 1). En effet, la particularité remarquable de « l'effet FLASH », observé jusqu'ici sur des modèles animaux, consiste en une épargne sélective des tissus sains sans perte de l'efficacité antitumorale.

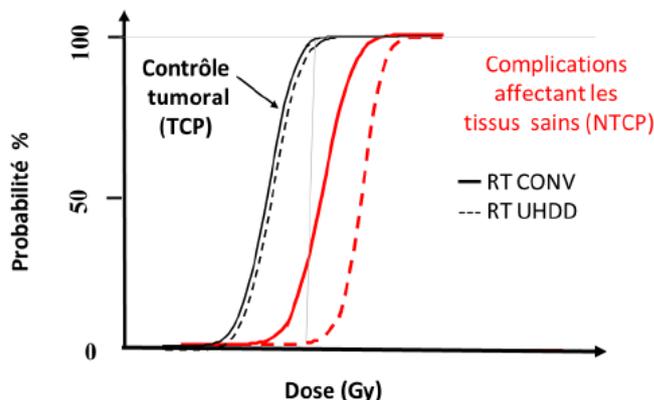


Figure 1: Illustration des courbes théoriques de contrôle tumoral et de complications affectant les tissus sains par radiothérapie à débit conventionnel et radiothérapie à Ultra-Haut Débit de Dose (Rapport IRSN N° 2024-00179 « Radiothérapie Externe à Ultra-Haut Débit de Dose et Effet FLASH »).

**Technologies disponibles et en développement** : Atteindre des débits suffisamment hauts (plusieurs dizaines de Gy/s) pour induire cet effet biologique requiert des modifications, voire des innovations technologiques dédiées, au niveau des machines de radiothérapie, tant pour les applications précliniques que cliniques. Initialement, les premières démonstrations précliniques de l'effet FLASH ont été réalisées principalement sur des accélérateurs linéaires d'électrons de moyenne énergie (4 – 16 MeV). Pour envisager de traiter les tumeurs profondes des patients, des cyclotrons de protonthérapie commencent à être utilisés, et plusieurs projets académiques et industriels visent à développer des accélérateurs d'électrons à Très Haute Energie (« VHEE »,  $E > 50 - 100$  MeV), par accélération linéaire ou même par accélération plasma – laser. En fonction de la technologie d'accélération des particules utilisée, la structure temporelle du faisceau permettant d'atteindre l'UHDD varie considérablement (Figure 2), ce qui a un impact crucial sur les détecteurs utilisables.

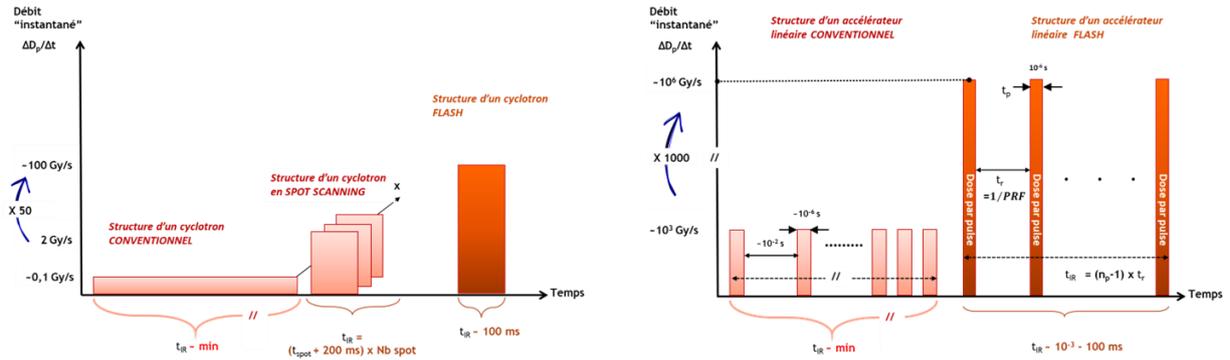


Figure 2 : A gauche : Profils temporels d'un faisceau quasi-continu (cyclotron) en débit UHDD vs conventionnel. A droite : Profils temporels d'un faisceau pulsé (linac) en débit UHDD vs conventionnel.

**Mesure de la dose :** En termes de mesure de la dose absorbée et de l'exposition des travailleurs, l'utilisation des UHDD pose un certain nombre de défis. En effet, le dépôt d'énergie instantané très important dans le détecteur peut créer des effets de saturation. La dépendance de la réponse d'un détecteur en fonction du débit de dose dépend 1/ de la technologie de détection utilisée, et 2/ de la structure temporelle du faisceau. A titre d'exemple, dans le cas des chambres d'ionisation, le détecteur de référence pour la dosimétrie, l'efficacité de détection dépend de façon extrêmement forte (dans les conditions UHDD) de la dose-par-pulse (Figure 3), qui est corrélée au débit de rayonnement moyen, mais aussi à la structure temporelle du faisceau et donc à la technologie utilisée. En conséquence, les chambres d'ionisation ne peuvent plus être utilisées comme détecteurs de référence dans les champs pulsés à forte dose-par-pulse.

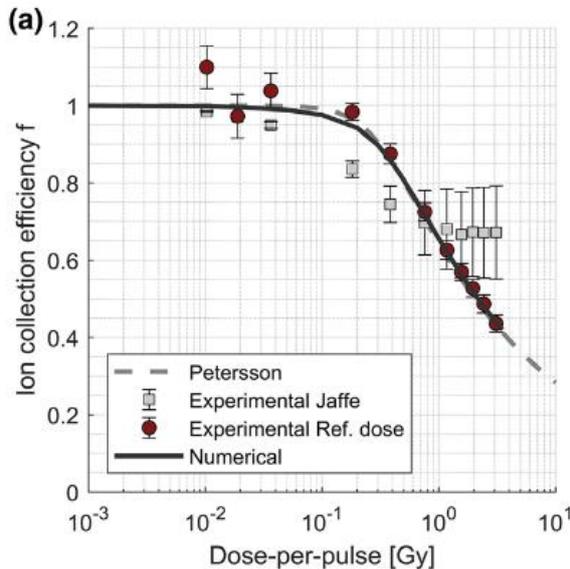


Figure 3 : Efficacité de détection d'une chambre d'ionisation Advanced Markus (PTW) en fonction de la dose-par-pulse (Kranzer et al. Physica Medica 2022). On considère généralement que l'effet FLASH est observable à partir de ~ 1Gy/pulse.

Bien que certains détecteurs passifs (alanine, films radiochromiques) aient pu être utilisés pour la dosimétrie des études précliniques, de nombreux efforts sont en cours pour développer et caractériser des détecteurs à lecture directe compatible avec les UHDD. Malheureusement, peu d'études se sont intéressées à la mesure de l'exposition, notamment la mesure par radiamètre dans le cas des faisceaux pulsés.

Pour encourager la prise en main de ce sujet par la communauté de radioprotection, nous développerons au cours de ce tutoriel :

- Un bref état de l'art des études sur l'effet FLASH et des essais cliniques en cours
- Un panorama des technologies capables d'atteindre l'UHDD en fonction de la particule accélérée (électrons / protons / RX)
- Les différentes structures temporelles associées à ces faisceaux
- Les limites des détecteurs actuels en fonction de la technique de détection et quelques exemples de détecteurs innovants validés dans les faisceaux UHDD