

Contrôle qualité patient en protonthérapie par analyse interne des fichiers log et calcul de dose indépendant Monte Carlo GATE pour ProteusONE

Matériel complémentaire

¹BARON Noam, ¹ALI Yasmine, ¹VIDAL Marie

¹Centre Antoine Lacassagne - Institut Méditerranéen de Protonthérapie

1 Procédure

La Figure 1 résume la logique de la procédure proposée de contrôle qualité patient (PSQA). Dans le workflow clinique actuel, le PSQA repose principalement sur une comparaison entre la dose calculée par le TPS et la dose mesurée dans un fantôme d'eau solide. La procédure proposée étend cette approche en combinant une analyse interne des fichiers log, permettant de reconstruire les positions des spots et les unités moniteur délivrées, de les comparer au plan de traitement, puis de les intégrer dans un plan reconstruit à partir des logs. La dose est ensuite recalculée par IDEAL 2.0 basé sur GEANT4/GATE en se basant, d'une part, sur le plan reconstruit et, d'autre part, sur le plan original. Enfin, on compare à la fois la dose issue du TPS, du calcul indépendant et du plan reconstruit par analyse gamma 3D et par comparaison des histogrammes dose-volume afin de détecter les impacts cliniques de la délivrance sur les organes à risque et sur le volume cible. En parallèle, une procédure de vérification mensuelle est proposée afin d'évaluer la fiabilité des fichiers log à l'aide de délivrances de référence dédiées et de mesures indépendantes. Ce cadre combiné vise à renforcer la vérification de la délivrance, améliorer la sensibilité aux écarts pertinents et permettre une réduction progressive du recours systématique au PSQA fondé sur la mesure.

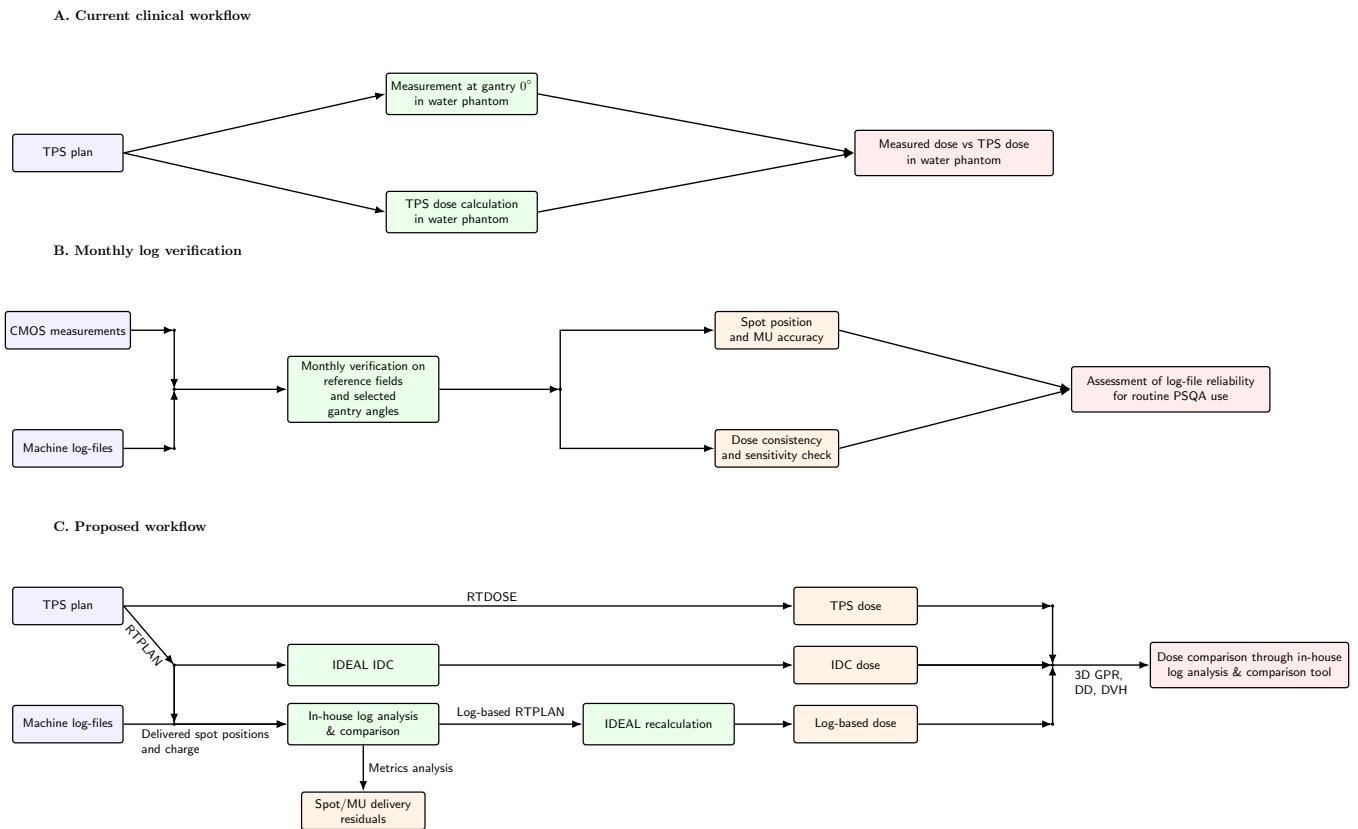


FIGURE 1 – Vue d'ensemble du workflow clinique actuel, de la stratégie mensuelle de vérification des fichiers log, et de la procédure de PSQA proposées combinant analyse des fichiers log et calcul de dose indépendant.

2 Résultats de délivrance spot par spot fondés sur les logs

Sur 458 faisceaux, correspondant à 468.577 spots reconstruits, l'analyse fondée sur les fichiers log a montré une précision globale submillimétrique de la délivrance. L'erreur globale de position des spots était de 0.274 ± 0.173 mm, avec un RMS global de 0.324 mm et un 95^e percentile de 0.624 mm. Pour les poids des spots, l'erreur relative absolue moyenne était de $0.60\% \pm 1.63\%$, tandis que le biais signé global restait minimal (-0.04%). Ces résultats sont illustrés à la Figure 2 et soutiennent la robustesse de la chaîne de reconstruction pour l'évaluation géométrique et dosimétrique spot par spot.

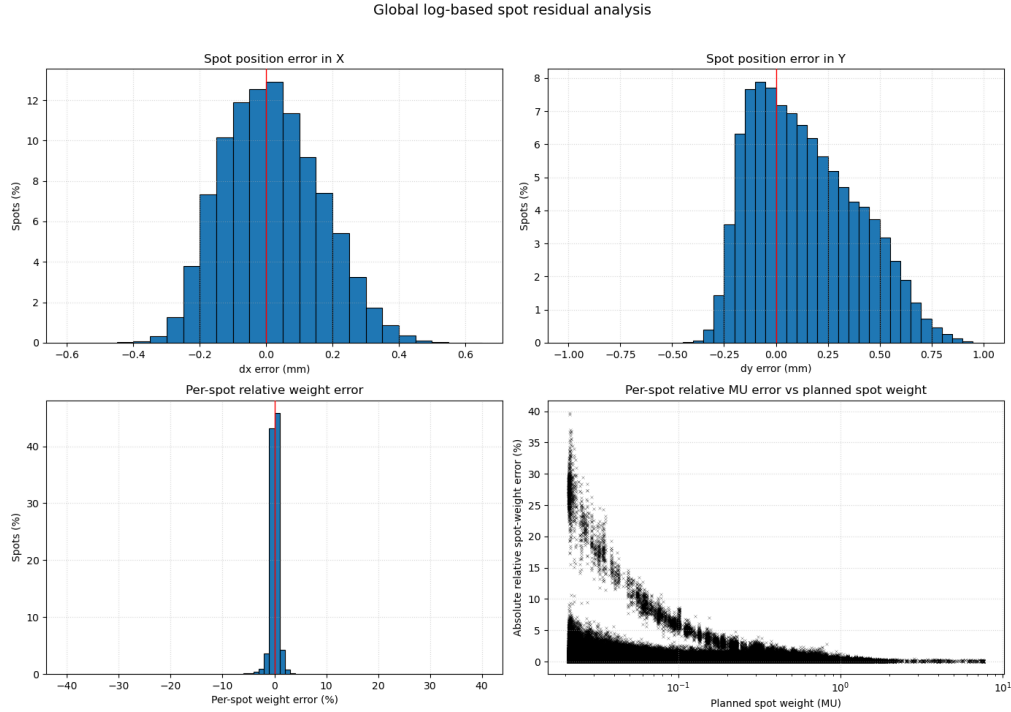


FIGURE 2 – Analyse globale des résidus fondée sur les fichiers log de 458 faisceaux (468.577 spots reconstruits). **En haut à gauche** : histogramme des résidus de position des spots selon X (dx). **En haut à droite** : histogramme des résidus de position des spots selon Y (dy). **En bas à gauche** : histogramme de l'erreur relative sur le poids des spots. **En bas à droite** : erreur relative absolue sur le poids des spots en fonction du poids planifié (MU).

En complément des métriques globales de résidus, les écarts spot par spot ont également été décomposés en composantes systématique et aléatoire. Cette distinction est pertinente pour le commissioning et la vérification longitudinale, car elle permet de séparer les biais spatiaux persistants de la variabilité de délivrance. Dans le jeu de données étudié, la composante systématique est restée en moyenne nettement plus importante que la composante aléatoire, ce qui soutient l'interprétation selon laquelle la majorité des écarts observés étaient structurés plutôt que dominés par des fluctuations stochastiques.

3 Confirmation préliminaire par calcul de dose indépendant

En complément de l'analyse spot par spot fondée sur les fichiers log présentée ici, des recalculs de dose indépendants préliminaires réalisés avec GEANT4/GATE9 soutiennent également la faisabilité de la procédure proposée. Bien que ces résultats dosimétriques ne soient pas détaillés sur cette page complémentaire, les premières observations sont cohérentes avec la conclusion selon laquelle la combinaison du calcul de dose indépendant et de l'analyse des fichiers log peut réduire le recours aux mesures 2D systématiques, tout en améliorant la sensibilité du PSQA, la sécurité des patients et la qualité du traitement.

4 Références

- [1] Winterhalter C et al. Log file based Monte Carlo calculations for proton pencil beam scanning therapy. doi : 10.1088/1361-6560/aaf82d. PMID : 30540984.
- [2] Emert F et al. PSQA Working Group. Risk Assessment Report on Patient-Specific Quality Assurance. foreseen for publication as PTCOG TxEff QA White Paper ; Spring 2026.
- [3] Grevillot L et al. The GATE-RTion/IDEAL Independent Dose Calculation System for Light Ion Beam Therapy (2021). doi : 10.3389/fphy.2021.704760