

U.E : Projet professionnel personnel
de l'étudiant (P.P.P.E) :

Master Mathématiques et
Applications :
parcours M2 CEPS

Sujet de stage :
Méthodes éléments finis et réseaux
de neurones pour la chirurgie
augmentée.

Enseignant :
Maxime HAURAY

Étudiant :
FALL Madou



C'est un rapport rédigé dans le cadre de l'UE PPPE en tant que travail personnel, basé sur des références, notre compréhension du sujet et les conseils de certains enseignants, en particulier Monsieur Maxime Hurray (responsable de l'U.E PPPE).

I. Introduction

"On commence par donner la définition de la chirurgie qui n'est rien d'autre qu'une branche de la médecine qui se concentre sur le traitement des maladies, des traumatismes et des anomalies physiques par des procédures manuelles ou opératoires. Les personnes qualifiées pour effectuer des interventions chirurgicales sont appelées chirurgiens. La chirurgie peut être pratiquée pour diverses raisons, notamment la correction d'anomalies anatomiques, le traitement de maladies, la réparation de lésions causées par des traumatismes, et l'amélioration de la fonction corporelle.

L'approche de la chirurgie assistée par ordinateur tire parti de la technologie pour apporter un soutien aux chirurgiens tout au long des interventions. Cette technologie permet la fourniture en temps réel d'informations cruciales, telles que des images médicales, des données anatomiques et des repères chirurgicaux, directement dans le champ visuel du chirurgien pendant l'opération, contribuant ainsi à accroître la précision et la sécurité des procédures chirurgicales. L'intégration de l'intelligence artificielle (I.A) dans le domaine chirurgical englobe diverses applications, telles que des systèmes de diagnostic assistés par ordinateur, des robots chirurgicaux guidés par l'I.A, et des outils d'analyse de données visant à soutenir les chirurgiens dans la prise de décisions éclairées. Par exemple, l'I.A peut être employée pour interpréter des images médicales, formuler des recommandations de plans de traitement personnalisés, voire assister directement le chirurgien pendant le déroulement de l'opération".

Cette initiative démontre l'engagement à la fois pragmatique et précautionneux envers le progrès médical. En associant les compétences de l'**Équipe Inria MIMESIS** de l'Hôpital Civil, laboratoire Icube à Strasbourg, et de l'**Équipe Inria TONUS** de l'Institut de Recherche Mathématique Avancée de Strasbourg, ce stage vise à fusionner les méthodes éléments finis et les réseaux de neurones pour la chirurgie augmentée. Cette approche intégrative témoigne de la volonté de garantir la sécurité et l'efficacité des avancées technologiques dans le domaine médical, en mettant l'accent sur une validation rigoureuse et une intégration prudente.

II. Les travaux effectués et les atouts du stage

La problématique réside dans la recherche et l'exploration de l'intégration des méthodes d'éléments finis (MEF) et des réseaux de neurones (RN) pour la chirurgie. La chirurgie augmentée vise à améliorer les capacités des chirurgiens en utilisant des technologies avancées telles que la simulation et l'assistance informatique.

La combinaison des méthodes d'éléments finis, qui sont des techniques numériques utilisées pour résoudre des problèmes complexes de structures et de comportements physiques, avec les réseaux de neurones, qui sont des modèles inspirés du cerveau humain pour effectuer des tâches intelligentes, posent plusieurs défis et ouvrent des perspectives intéressantes.

Quelques points clés à explorer pour aborder cette problématique pourraient inclure :

Intégration des données anatomiques par MEF et RN : Comment les données anatomiques peuvent-elles être utilisées dans les modèles basés sur les éléments finis et les réseaux de neurones pour créer des simulations plus précises et adaptées à chaque patient ?

Optimisation des stratégies chirurgicales : Comment les méthodes d'éléments finis peuvent-elles être utilisées pour simuler les interventions chirurgicales, et comment les réseaux de neurones peuvent-ils être employés pour optimiser les stratégies chirurgicales en fonction des données en temps réel pendant l'opération ?

Apprentissage et adaptation en temps réel : Comment les réseaux de neurones peuvent-ils être entraînés et adaptés en temps réel en utilisant les informations fournies par les méthodes d'éléments finis pour améliorer la prise de décision pendant la chirurgie ?

Validation et fiabilité : Comment garantir la validité et la fiabilité des résultats produits par cette combinaison de techniques, en tenant compte des variations anatomiques entre les patients et des conditions opératoires changeantes ?

Interprétabilité et confiance : Comment rendre les modèles résultants **MEF** et **RN** compréhensibles pour les chirurgiens et comment établir la confiance des praticiens envers ces modèles hybrides pour les guider dans leurs interventions chirurgicales ?

La résolution de ces questions contribuerait à la création d'une approche synergique utilisant les méthodes d'éléments finis et les réseaux de neurones, pour améliorer la précision, l'efficacité et la sécurité des interventions chirurgicales.

Nous allons utiliser une équation aux dérivées partielles (EDP) elliptique typique, souvent utilisée pour modéliser des phénomènes de diffusion ou de conductivité thermique. Une équation de Laplace avec un terme source, et la condition de Neumann sur la frontière (Γ) indique une condition de flux nul. La forme de l'équation est la suivante :

$$-\Delta u + u = f \text{ dans } \Omega,$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \text{ sur } \Gamma.$$

où :

- $-\Delta u$ est l'opérateur Laplacien de u , représentant la divergence du gradient de u .
- f est une fonction source.
- Ω est le domaine spatial où l'équation est définie.
- Γ est la frontière de Ω .
- $\frac{\partial u}{\partial n}$ est la dérivée normale de u par rapport à la frontière Γ , indiquant que le flux normal est nul sur la frontière.

Dans le contexte de la chirurgie, nous pouvons interpréter u et f de manière spécifique en fonction des applications médicales. La modélisation mathématique dans le domaine de la chirurgie peut être complexe, mais nous allons donner une interprétation générale :

*** u** : Représentation de la déformation ou de la structure chirurgicale

- u pourrait représenter la déformation ou la structure spatiale d'un organe, d'un tissu ou d'une zone spécifique du corps pendant une intervention chirurgicale. Par exemple, cela pourrait être la déformation d'un organe sous l'effet d'une manipulation chirurgicale.

*** f** : Terme source chirurgical

- f pourrait représenter un terme source qui modélise l'influence de l'intervention chirurgicale elle-même. Il pourrait inclure des informations sur les forces exercées par le chirurgien, les changements de forme induits délibérément, ou d'autres paramètres liés à la procédure chirurgicale.

L'équation aux dérivées partielles elliptique que nous avons fournie ($-\Delta u + u = f$), cela pourrait être interprété comme modélisant la déformation d'une structure chirurgicale (u) en réponse à des influences extérieures, y compris les actions du chirurgien (f).

L'intégration des méthodes d'éléments finis (MEF) et des réseaux de neurones (RN) dans ce contexte pourrait viser à améliorer la modélisation de la déformation en utilisant des techniques numériques avancées et à intégrer des aspects d'apprentissage automatique pour ajuster le modèle en fonction de données spécifiques du patient ou d'autres paramètres variables pendant l'opération.

Pour la résolution numérique de l'équation aux dérivées partielles, "Il n'existe aucun mailleur 3D permettant de mailler n'importe quelle géométrie de manière hexaédrique. Afin de s'affranchir de la création de maillages, il est possible d'effectuer des simulations numériques sur un maillage non-conforme (qui ne coïncide pas avec le bord des organes) et de gérer les conditions limites. Il existe déjà des MEF de ce type, mais leur implémentation engendre des difficultés."

Cependant pour résoudre cette équation aux dérivées partielles, nous utilisons la méthode d'éléments finis appelé nommée ϕ -FEM.

Nous considérons une équation aux dérivées partielles elliptique du second ordre avec des conditions aux limites de Neumann

$$-\Delta u + u = f \text{ dans } \Omega, \quad \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \text{ sur } \Gamma \quad (1)$$

dans un domaine délimité $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ ($d = 2, 3$) avec une frontière lisse Γ en admettant que Ω and Γ sont données par une fonction "level-set" ϕ :

$$\Omega := \{\phi < 0\} \text{ et } \Gamma := \{\phi = 0\}. \quad (2)$$

La fonction "level-set" est supposée connue sur \mathbb{R}^d

En mathématiques, une fonction "level-set" f de n variables réelles est un ensemble où la fonction prend une valeur constante donnée c , c'est-à-dire :

$$L_c(f) = \{(x_1, \dots, x_n) \mid f(x_1, \dots, x_n) = c\},$$

La méthode ϕ -FEM a été conçue pour résoudre le problème de Poisson ($-\Delta u = f$), un type d'équation aux dérivées partielles, avec des conditions aux limites de Dirichlet homogènes. Les conditions de Dirichlet homogènes impliquent que la solution doit être nulle sur la frontière Γ du domaine considéré. Pour cela, la méthode propose d'exprimer la solution u comme le produit de deux fonctions, ϕ et w , c'est-à-dire $u = \phi w$. La condition $u = 0$ sur la frontière est assurée en choisissant $\phi = 0$ sur Γ , garantissant ainsi que, quel que soit le choix de w , la solution u reste nulle sur la frontière.

Pour rendre cette méthode applicable numériquement, les fonctions ϕ et w sont remplacées par leurs approximations par éléments finis, notées respectivement ϕ_h et w_h . En substituant ces approximations dans l'expression de la solution, u est approximée par $\phi_h w_h$ c'est à dire $u \approx \phi_h w_h$. Cette expression est ensuite introduite dans une formulation variationnelle appropriée du problème de Poisson.

$$\int_{\Omega_h} \nabla(\phi w) \cdot \nabla(\phi v) - \int_{\partial\Omega_h} \frac{\partial}{\partial n}(\phi w) \phi v = \int_{\Omega_h} f \phi v, \quad \forall v \in H^1(\Omega_h)$$

Ω_h le domaine inclus dans le maillage, de sorte que, en général, Ω_h soit légèrement plus grand que Ω .

L'originalité de la méthode réside également dans le choix de maintenir l'utilisation d'éléments finis. Au

lieu d'opter pour la voie classique des méthodes mixtes, qui introduisent des éléments finis vectoriels, la méthode introduit les inconnues supplémentaires uniquement là où elles sont nécessaires, c'est-à-dire à proximité de la frontière Γ .

Dans le contexte de l'optimisation des méthodes numériques, cela permet d'exploiter l'efficacité des éléments finis tout en traitant efficacement les conditions aux limites de Neumann. Cette approche revêt une importance particulière dans le domaine de la chirurgie, en pleine expansion, qui intègre des technologies avancées visant à améliorer les procédures chirurgicales.

L'utilisation des méthodes d'éléments finis et des réseaux de neurones constitue une approche intéressante dans ce contexte.

* Méthodes d'éléments finis (MEF) :

-Modélisation anatomique : Les méthodes d'éléments finis permettent de créer des modèles numériques complexes du corps humain en utilisant des maillages tridimensionnels. Ces modèles peuvent représenter la géométrie anatomique avec une grande précision.

-Simulation des tissus : La MEF permet de simuler le comportement mécanique des tissus biologiques pendant une intervention chirurgicale. Cela peut être utilisé pour prédire les déformations des organes, les réponses tissulaires et les contraintes exercées par les instruments chirurgicaux.

- Planification chirurgicale : En intégrant les données du patient dans le modèle MEF, les chirurgiens peuvent planifier leurs interventions de manière plus précise, en anticipant les challenges anatomiques et en optimisant les trajectoires d'incision.

* Réseaux de neurones :

-Segmentation d'images médicales : Les réseaux de neurones convolutifs peuvent être utilisés pour la segmentation automatique des structures anatomiques à partir d'images médicales telles que les scanners ou les IRM. Cela permet une extraction rapide et limpide des informations pertinentes pour la planification chirurgicale.

-Assistance à la navigation : Les réseaux de neurones peuvent être impliqués dans le suivi en temps réel des instruments chirurgicaux, offrant ainsi une navigation assistée par ordinateur pour guider les chirurgiens pendant l'intervention.

-Apprentissage automatique pour la prise de décision : Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être formés pour prendre des décisions basées sur des données cliniques et chirurgicales. Par exemple, ils peuvent aider à identifier les zones à risque ou à recommander des ajustements de trajectoire en temps réel.

En combinant ces deux approches, les chercheurs visent à créer des systèmes de chirurgie plus sophistiqués, capables de prendre en compte la variabilité anatomique entre les patients et de s'adapter en temps réel aux changements survenant pendant l'intervention. Cette convergence de techniques promet d'améliorer l'efficacité, la précision et la sécurité des procédures chirurgicales. Cependant, il est important de souligner que l'application de ces méthodes dans le domaine médical nécessite une validation rigoureuse et une conformité aux normes de sécurité et de réglementation.

III. Conclusion

"Les chercheurs (Inria MIMESIS & Inria TONUS) ont accompli des avancées significatives dans le domaine de la chirurgie augmentée en développant des méthodes innovantes à l'interface entre l'intelligence artificielle (IA) et les méthodes numériques. Des résultats préliminaires démontrent le succès de la combinaison de solveurs basés sur les méthodes des éléments finis (MEF) avec des réseaux de

neurones (RN) en biomécanique, permettant des gains notables en temps de calcul pour la résolution de problèmes complexes.

Les défis liés à la quasi-incompressibilité ont été abordés avec ingéniosité en explorant l'utilisation de maillages non conformes, évitant ainsi les contraintes associées à la création de maillages hexaédriques. L'introduction de l'approche novatrice ϕ -FEM, exploitant une fonction "Level-Set" au bord du domaine, représente une solution prometteuse pour surmonter les difficultés rencontrées lors des calculs de quadrature et offre une alternative aux méthodes traditionnelles.

Les implications pratiques de ces avancées sont significatives, notamment pour les applications nécessitant un calcul en temps réel en chirurgie augmentée. La capacité à résoudre efficacement des problèmes non linéaires en quelques millisecondes ouvre des perspectives passionnantes pour l'amélioration des procédures chirurgicales, tout en minimisant les contraintes liées à la complexité des maillages.

Cependant, des défis subsistent, notamment en termes d'implémentation pour des problèmes biomécaniques spécifiques. L'équipe de recherche continue à perfectionner l'approche ϕ -FEM, explorer des techniques d'optimisation spécifiques aux problèmes biomécaniques, et affiner les méthodes de régularisation des réseaux de neurones pour assurer la convergence et la stabilité de la méthode".

En résumé, cette recherche promet d'apporter une contribution significative à la convergence entre l'IA et les méthodes numériques, ouvrant la voie à des applications révolutionnaires en chirurgie augmentée et soulignant le potentiel des approches pour résoudre des défis complexes dans le domaine biomédical.