

Développement d'un jumeau numérique patient-spécifique de l'estomac pour l'optimisation biomécanique de la sleeve gastrectomie

Mots-clés : chirurgie bariatrique, biomécanique, modélisation numérique, jumeau numérique, personnalisation chirurgicale, morphométrie 3D

1. Contexte scientifique et médical

L'obésité constitue un problème majeur de santé publique mondiale. Elle est associée à une augmentation significative de la morbidité cardiovasculaire, métabolique et oncologique. Chez les patients présentant une obésité sévère ou morbide, la chirurgie bariatrique représente le traitement le plus efficace à long terme.

La **sleeve gastrectomie (SG)** est aujourd'hui l'intervention la plus pratiquée. Elle consiste en une résection longitudinale de l'estomac (laissant environ 1/3 du volume initial) aboutissant à la création d'un tube gastrique calibré à l'aide d'un guide endoluminal. Bien que standardisée, cette intervention présente une variabilité morphologique post-opératoire importante.

Les examens d'imagerie montrent fréquemment des torsions du tube gastrique, des angulations marquées, des variations de diamètre et de rectitude. Ces anomalies morphologiques peuvent être associées à des complications fonctionnelles telles que la dysphagie précoce ou le reflux gastro-œsophagien. Cependant, leurs mécanismes biomécaniques demeurent insuffisamment compris.

Par ailleurs, la compliance gastrique et les propriétés mécaniques de la paroi ne font pas partie de l'évaluation préopératoire standard, alors qu'elles pourraient jouer un rôle déterminant dans le comportement mécanique du tube gastrique post-opératoire.

2. Verrous scientifiques et état de l'art

Plusieurs travaux ont exploré la biomécanique gastrique et la modélisation numérique.

Les progrès récents de l'imagerie ont permis une caractérisation plus fine des modifications morphologiques et fonctionnelles induites par la sleeve gastrectomie. Des études utilisant la tomodensitométrie (TDM) ou l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ont mis en évidence une réduction substantielle du volume gastrique total, généralement comprise entre 75 et 80 %, associée à la résection du fundus et du corps gastrique, tandis que la majeure partie de l'antrum est préservée afin de maintenir la fonction pylorique (Fiorillo et al., 2020 ; Baumann et al., 2011 ; Bertoli et al., 2023).

L'imagerie dynamique a également confirmé une accélération du transit gastrique en phase précoce après sleeve gastrectomie (Fiorillo et al., 2020 ; Parker et al., 2018).

Cependant, les réductions volumétriques rapportées varient fortement d'une étude à l'autre, révélant une difficulté méthodologique fondamentale : il n'existe actuellement ni méthode de référence standardisée (transit baryté du tube digestif supérieur, TDM ou IRM), ni protocole

consensuel d'imagerie pour l'évaluation du volume gastrique. L'estomac étant un réservoir hautement compliant, les volumes mesurés dépendent fortement du degré de distension luminale au moment de l'acquisition, ce qui limite les comparaisons directes entre études. L'évaluation de la compliance gastrique reste peu développée en pratique, faute de méthode simple, reproductible et transposable. Les études consacrées à la compliance sont rares et reposent encore principalement sur des modèles ex-vivo ou virtuels (3,2). Les premiers, bien qu'offrant une analyse structurale précise, donnent cependant lieu à des travaux réalisés dans des conditions non physiologiques. Les seconds offrent une modélisation volumique intéressante, notamment en contexte post-chirurgical, mais demeurent limités par l'absence de prise en compte des organes de voisinage, ainsi que par leur forte dépendance à la qualité de l'imagerie initiale et aux performances des algorithmes de reconstruction. L'endoscopie oeso-gastro-duodénale (EOGD), réalisée en routine pour de nombreuses indications, offre un contexte particulièrement favorable à l'exploration fonctionnelle de l'estomac, en l'occurrence de sa compliance. Des outils, comme le système EPSIS (Endoscopic Pressure Study Integrated System) permettrait via un capteur inséré dans le canal opérateur de l'endoscope, d'enregistrer en temps réel les variations de pression au sein de la cavité gastrique, avec des performances déjà établies dans le cadre de l'étude du sphincter inférieur de l'œsophage et du reflux gastro-œsophagien (5). Le déplissement des plis et l'élévation de la pression intraluminale, bien que primordiaux, ne font l'objet d'aucune mesure systématique en pratique. Leur quantification permettrait pourtant de mieux caractériser les propriétés mécaniques de la paroi gastrique.

Cependant, plusieurs verrous persistent :

1. Absence d'intégration conjointe morphologie 3D et propriétés mécaniques individualisées.
2. Absence d'outil prédictif permettant de simuler différents plans de section chirurgicale.
3. Absence de démarche de planification personnalisée en chirurgie bariatrique.

Le concept de **jumeau numérique patient-spécifique**, largement développé en ingénierie et émergent en médecine, n'a pas encore été appliqué à la planification de la sleeve gastrectomie.

3. Hypothèses scientifiques

Nous posons les hypothèses suivantes :

1. Les anomalies morphologiques de la sleeve résultent de l'interaction entre la géométrie gastrique préopératoire et le plan de section choisi.
2. L'impact fonctionnel post-opératoire dépend des propriétés biomécaniques individuelles de la paroi gastrique.
3. Un modèle numérique patient-spécifique permettrait d'identifier un plan de section optimisé minimisant les contraintes mécaniques et les déformations indésirables.

4. Objectifs du projet

4.1 Objectif principal

L'objectif principal de cette thèse est de développer un jumeau numérique patient-spécifique validé de l'estomac permettant de simuler et d'optimiser le plan de section de la sleeve gastrectomie.

4.2 Objectifs spécifiques

Cinq objectifs spécifiques découlent de l'objectif principal :

1. Développer une méthodologie d'analyse morphométrique gastrique 3D préopératoire.
2. Caractériser les propriétés biomécaniques in vivo de la paroi gastrique.
3. Personnaliser un modèle numérique gastrique intégrant géométrie et paramètres mécaniques.
4. Simuler différents scénarios chirurgicaux.
5. Définir des critères quantitatifs d'optimisation morpho-mécanique.

5. Méthodologie

Pour répondre aux objectifs présentés ci-dessus la méthodologie proposée repose sur 3 grands axes complémentaires qui sont l'analyse morphométrique, la caractérisation biomécanique in vivo et le développement d'un modèle numérique personnalisé.

5.1 Analyse morphométrique 3D de l'estomac

L'analyse morphométrique 3D de l'estomac a pour but de quantifier la variabilité interindividuelle et corrélérer morphologie initiale et géométrie finale de l'estomac.

Elle se décomposera en 2 phases :

- L'acquisition d'imagerie scanner pré- et post-opératoire
- La segmentation 3D semi-automatique (outils IA développés dans notre laboratoire) avec extraction de paramètres morphométriques : volumétrie, orientation des axes principaux, indices de torsion, courbures

5.2 Caractérisation biomécanique in vivo

Sur la base d'un banc expérimental (ex-vivo et animal) développé au laboratoire, la caractérisation biomécanique in vivo de l'estomac reposera sur la réalisation d'une étude clinique (après validation CPP) dans le cadre de l'endoscopie préopératoire. Elle comprendra :

- La mesure indirecte de pression intragastrique via un capteur couplé à l'endoscope
- Le tracking vidéo du déplissement gastrique
- L'identification des paramètres élastiques par le couplage des mesures simultanées pression/déformation

5.3 Développement du jumeau numérique

En intégrant les résultats obtenus pour les 2 précédents axes, un jumeau numérique de l'estomac des patients sera développé.

Il s'appuiera sur :

- La personnalisation géométrique du modèle gastrique existant développé dans notre laboratoire permettant la simulation du remplissage gastrique post-prandial, intégration des paramètres constitutifs individuels
- Le développement d'un module de simulation de section gastrique
- La définition d'un critère d'optimalité (rectitude, contraintes, homogénéité de distribution des déformations)

6. Originalité et impact

Ce projet propose :

- La première approche intégrée morphologie–biomécanique en chirurgie bariatrique
- Une transposition du concept de jumeau numérique à la planification chirurgicale
- Une démarche translationnelle entre biomécanique fondamentale et pratique chirurgicale

À terme, ce travail pourrait ouvrir la voie à un outil de planification préopératoire personnalisé.

7. Déroulement de la thèse

7.1 Année 1

- Validation éthique (CPP)
- Analyse bibliographique
- Recueil imagerie
- Début acquisition biomécanique

7.2 Année 2

- Analyse morphométrique complète
- Validation protocole biomécanique humain
- Développement module simulation

7.3 Année 3

- Intégration complète du jumeau numérique
- Simulations multi-scénarios
- Analyse statistique
- Rédaction et publications

8. Encadrements

- Thierry BEGE, MCU-PH, chirurgien viscéral, AP-HM, thierry.bege@ap-hm.fr
- Catherine MASSON, DR, Biomécanique expérimentale LBA-UGE, catherine.masson@univ-eiffel.fr
- Wei WEI, IR, Biomécanique numérique LBA-UGE, wei.wei@univ-eiffel.fr

9. Lieu de déroulement de la thèse

Laboratoire de Biomécanique Appliquée UMR T24, Université Gustave Eiffel-AMU, Marseille

10. Bibliographie

1. Toniolo I. et al. *Patient-specific stomach biomechanics before and after laparoscopic sleeve gastrectomy*. Surg Endosc. 2022.
2. Toniolo I., Fontanella CG., Foletto M., Carniel EL. *Biomechanical investigation of the stomach following different bariatric surgery approaches*. Bioengineering. 2020.
3. Fontanella CG. et al. *Computational models for the mechanical investigation of stomach tissues and structure*. Ann Biomed Eng. 2019.
4. Desprez C. et al. *Pyloric distensibility measurement predicts symptomatic response*. Gastrointest Endosc. 2019.
5. Shimamura Y. et al. *Characterization of intragastric pressure waveform in endoscopic pressure study system*. Dig Endosc. 2021.
6. Michalakis K., le Roux CW. *Gut hormones and leptin: impact on energy control and changes after bariatric surgery*. Obes Surg. 2012.
7. Villard PF. et al. *Finite element modeling of gastrointestinal tissues: current state and future directions*. Ann Biomed Eng. 2018.
8. Viceconti M., Hunter P., Hose R. *Big data, big knowledge: big data for personalized healthcare*. IEEE J Biomed Health Inform. 2015.