

# Précision du positionnement implantaire en chirurgie naviguée dynamique : apport des lunettes de réalité augmentée

Étude in vitro

SOUVIRAA Mathias<sup>1,2</sup>, MENSE Chloé<sup>1,3</sup>, MOZZICONACCI Léa<sup>1,4</sup>, RUQUET Michel<sup>1,5</sup>, SILVESTRI Frédéric<sup>1,3</sup>



Hôpitaux Universitaires de Marseille ap-hm

- 1 École de Médecine Dentaire, Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales, Marseille
- 2 Interne en Médecine Bucco-Dentaire, Service de Réhabilitations Orales, Hôpital de la Timone, Marseille
- 3 MCU-PH, Service de Réhabilitation Orale et Chirurgicale, Hôpital de la Timone, Marseille
- 4 CCU-AH, Service de Réhabilitation Orale et Chirurgicale, Hôpital de la Timone, Marseille
- 5 PU-PH, Service de Réhabilitation Orale et Chirurgicale, Hôpital de la Timone Marseille



## Introduction & objectif

Le succès à long terme d'un traitement implantaire repose en grande partie sur la **précision du positionnement implantaire**. Même chez des praticiens expérimentés, le taux de complications liées à un positionnement inadéquat lors d'une pose à main levée peut atteindre **10 %**.

La **CAIS** (Computer-Aided Implant Surgery, chirurgie implantaire assistée par ordinateur) regroupe les systèmes statiques, guidés par un guide chirurgical, et les systèmes dynamiques. La **CAIS dynamique** s'affranchit de tout guide physique et affiche en temps réel position, angulation et profondeur du foret.

Un écueil majeur réside dans la **dissociation spatiale** entre le site opératoire et l'écran externe : le praticien alterne en permanence son regard, source de fatigue, de perte de précision et de risque opératoire. Les **lunettes de réalité augmentée** superposent les données de navigation au champ visuel.

**Objectif** : évaluer la précision du positionnement implantaire obtenue avec la navigation dynamique et déterminer si l'adjonction de lunettes AR modifie significativement cette précision, comparativement à un retour sur écran seul.

## Matériels & méthodes

Étude **in vitro**, École de médecine dentaire d'Aix-Marseille Université, janvier 2026. Avis du CER d'Aix-Marseille Université n°2026-02-19-015.

**Modèles imprimés standardisés**, identiques pour tous les participants, issus de la fusion de fichiers DICOM (CBCT) et STL (empreinte numérique) d'un patient édenté de 35 et 45.

**30 participants** (16 femmes, 14 hommes ; âge médian 25 ans, 23–48) — étudiants de 6<sup>e</sup> année, DESU d'implantologie et enseignants hospitalo-universitaires. 10 déclaraient une expérience en implantologie, aucun n'avait utilisé de système de CAIS naviguée auparavant.

**Chaque participant a réalisé 3 poses d'implants** (Axiom PX Anthogyr®, Ø 4 mm, L 12 mm) :

- pose à **main levée** en 35 ;
- pose avec **Straumann Falcon™** sans lunettes AR en 45 ;
- pose avec **Straumann Falcon™** + **lunettes AR** (Epson Moverio BT-45C) en 45.

**Évaluation de la précision** : chaque implant posé a été comparé à sa planification initiale (coDiagnostix®) en quatre étapes :

- scan-bodies vissés sur les implants, puis numérisation du modèle à l'aide du scanner de laboratoire 3Shape E4® ;
- repositionnement virtuel de chaque implant posé dans Blue Sky Plan® à partir des scan-bodies ;
- superposition du modèle planifié et du modèle réalisé, puis mesure automatisée des écarts en **Python** ;
- contrôle des mesures à l'aide du logiciel Zeiss Inspect® par un ingénieur indépendant.

**Critères de jugement** : déviation coronaire, déviation apicale, déviation angulaire (principaux) et enfouissement (secondaire). Tests appariés non paramétriques (Wilcoxon, correction de Holm), seuil  $p < 0,05$ , taille d'effet  $r = Z/\sqrt{N}$ .



Pièce à main instrumentée et caméra de suivi optique du système Straumann Falcon™



Écran de navigation Falcon™ : position, angulation et profondeur du foret en temps réel

## Résultats

### DÉVIATION AXIALE

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Main levée               | 5,26° |
| Navigation (écran)       | 1,72° |
| Navigation + lunettes AR | 2,03° |

### DÉCALAGE APICAL

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| Main levée               | 1,88 mm |
| Navigation (écran)       | 1,39 mm |
| Navigation + lunettes AR | 1,27 mm |

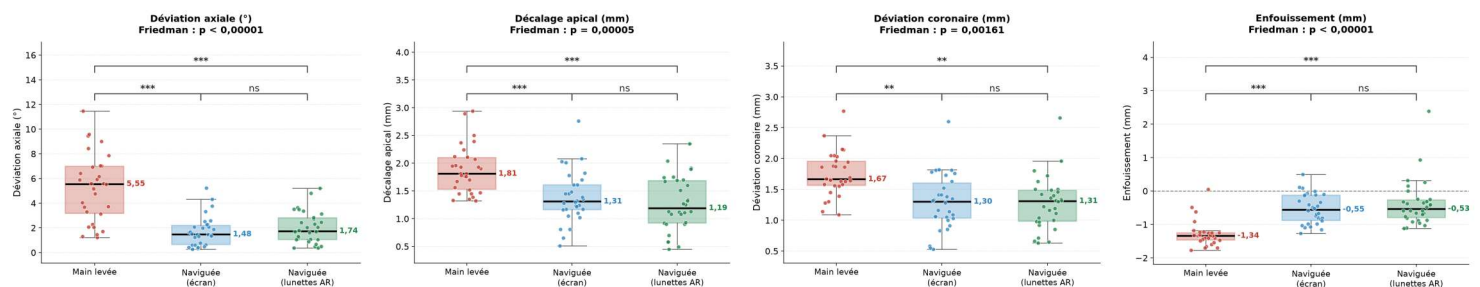
### DÉVIATION CORONAIRE

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| Main levée               | 1,75 mm |
| Navigation (écran)       | 1,29 mm |
| Navigation + lunettes AR | 1,28 mm |

### ENFOUISSEMENT

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Main levée               | -1,29 mm |
| Navigation (écran)       | -0,53 mm |
| Navigation + lunettes AR | -0,38 mm |

Valeurs médianes (n = 30). Aucune différence significative entre navigation sur écran et navigation avec lunettes AR. Une valeur négative d'enfouissement signifie un enfouissement moins important que la planification.



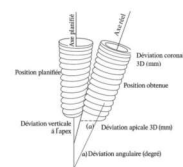
Valeurs médianes par technique (n = 30). \*\*\*  $p < 0,001$ ; ns : non significatif.

Les **deux modalités naviguées** se distinguent significativement de la pose à main levée sur les quatre paramètres, avec des tailles d'effet fortes ( $r = 0,64$  à  $0,85$ ). 26 modèles sur 30 étaient améliorés sous chacune des deux modalités.

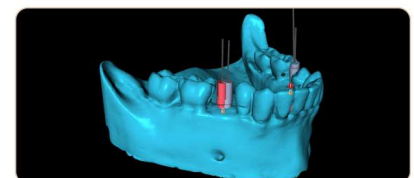
La dispersion diminue également : l'écart-type de la déviation axiale passe de 2,76° à 1,21° et 1,19°. La valeur maximale atteignait 11,47° en main levée contre 5,24° et 5,21° sous guidage ; cinq modèles dépassaient 8° à main levée, **aucun** avec la navigation.

En main levée, 29 modèles sur 30 présentaient un implant **moins profond que planifié** — un biais systématique, et non une dispersion aléatoire.

**Aucune différence significative** entre navigation sur écran et navigation avec lunettes AR, pour aucun des quatre paramètres ( $r \leq 0,19$ ).



Paramètres de déviation mesurés entre implant planifié et implant posé.



Superposition de l'implant planifié et de l'implant posé sur le modèle numérisé.

## Discussion & conclusion

Cette étude confirme la **supériorité des deux modalités naviguées** par rapport à la chirurgie à main levée pour les quatre paramètres de précision étudiés. L'effet du guidage porte principalement sur l'axe implantaire et sur la profondeur d'enfouissement, de manière plus modeste sur les déviations linéaires coronaire et apicale.

Elle démontre en parallèle l'**absence de différence significative** entre navigation sur écran et navigation avec lunettes AR, résultat cohérent avec les rares données cliniques disponibles.

Ce résultat ne doit pas être interprété comme une absence de valeur ajoutée des lunettes AR, mais comme la confirmation qu'elles constituent une **solution intéressante et non pénalisante** pour la précision. Elles constituent une alternative au service du confort opératoire, de la fluidité du geste et de l'expérience d'apprentissage.

**Limites** : étude in vitro, système de navigation, dispositif AR et système implantaire uniques, absence de randomisation de l'ordre des interventions, groupe hétérogène. Des études cliniques prospectives randomisées sont nécessaires pour confirmer et étendre ces résultats.

## Références bibliographiques

1. Naeini EN, Atashkadeh M, De Bruyn H, D'Haese J. Narrative review regarding the applicability, accuracy, and clinical outcome of flapless implant surgery with or without computer guidance. Clin Implant Dent Relat Res. 2020;22(4):454-67.
2. Parra-Tresserra A, Marqués-Guash J, Ortega-Martínez J, Basilio-Monné J, Hernández-Alfaro F. Current state of dynamic surgery. A literature review. Med Oral Patol Oral Cir Bucal. 2021;e576-81.
3. Ferraro M, Shusterman A, Mangano C, Mangano FG. Clinical integration of artificial intelligence and mixed reality-based dynamic navigation for implant placement in the anterior maxilla. J Dent. 2026;171:106579.
4. Zhou M, Zhou H, Li SY, Zhu YB, Geng YG. Comparison of the accuracy of dental implant placement using static and dynamic computer-assisted systems: an in vitro study. J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2021;122:343-8.
5. Jorba-García A, González-Barnadas A, Camps-Font O, Figueiredo R, Valmaseda-Castellón E. Accuracy assessment of dynamic computer-aided implant placement: a systematic review and meta-analysis. Clin Oral Investig. 2021;25(5):2479-94.