

NANTES UNIVERSITÉ
UNITÉ DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE

ANNEE 2023

N°

Chirurgie guidée statique et dynamique en implantologie

THÈSE POUR LE DIPLOME D'ÉTAT DE
DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

présentée
et soutenue publiquement par

MARCHAIS Jean-Eudes

Le 11/07/2023 devant le jury ci-dessous :

Président : M. Le Professeur Yves AMOURIQ
Assesseur : M. Le Professeur Laurent LE GUEHENNEC
Assesseur : M. Le Docteur Gildas RETHORE

Directeurs de thèse :
M. Le Docteur Alain HOORNAERT
M. Le Docteur Charles ALLIOT

	Présidente Pr. BERNAULT Carine
	Doyen Pr. SOUEIDAN Assem
	Assesseurs Pr GAUDIN Alexis Pr LE GUEHENNEC Laurent Pr LESCLOUS Philippe

Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

ALLIOT-LICHT Brigitte AMOURIQ Yves CHAUX Anne-Gaëlle GAUDIN Alexis LABOUX Olivier LE GUEHENNEC Laurent	LESCLOUS Philippe LOPEZ Serena PEREZ Fabienne SOUEIDAN Assem WEISS Pierre
---	---

Professeur des Universités

BOULER Jean-Michel

Maitre de conférences

VINATIER Claire

Professeur Emérite

GIUMELLI Bernard

Enseignants Associés

GUIHO Romain (Professeur Associé) LOLAH Aoula (MCU Associé) MAITRE Yoann (MCU Associé)	IDRI Katia (Assistante Associée)
--	----------------------------------

Maitres de conférences des Universités - Praticiens Hospitaliers	Chef de Clinique des Universités - Assistant des Hôpitaux
AMADOR DEL VALLE Gilles ARMENGOL Valérie BLERY Pauline BODIC François CLOITRE Alexandra DAJEAN-TRUTAUD Sylvie ENKEL Bénédicte HOORNAERT Alain HOUCHMAND-CUNY Madline JORDANA Fabienne LE BARS Pierre NIVET Marc-Henri PRUD'HOMME Tony RENARD Emmanuelle RENAUDIN Stéphane RETHORE Gildas SERISIER Samuel STRUILLOU Xavier VERNER Christian	BLEU Oriane CLOUET Roselyne EVRARD Lucas GUILLEMIN Maxime HASCOET Emilie HEMMING Cécile HIBON Charles IBN ATTYA Zakarie OYALLON Mathilde QUINSAT Victoire Eugenie PREVOT Diane REMAUD Thomas

Praticiens Hospitaliers

DUPAS Cécile	HYON Isabelle
--------------	---------------

Par délibération, en date du 6 décembre 1972, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'il n'entend leur donner aucune approbation, ni improbation.

Remerciements

A Monsieur le Professeur Yves AMOURIQ

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier
Docteur de l'Université de Nantes, Habilité à Diriger les Recherches
Département de Prothèses
Chef de Service d'Odontologie Restauratrice et Chirurgicale

- NANTES -

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de cette thèse.

Pour la qualité des enseignements théorique et clinique que vous m'avez prodigués pendant mes années d'études.

Veillez recevoir, Monsieur le Professeur, l'expression de ma plus grande considération et de mon plus profond respect.

A Monsieur le Docteur Alain HOORNAERT

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier
Docteur de l'Université d'Orsay
Département de Sciences Anatomiques
Chef du Département d'Implantologie

- NANTES -

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de diriger cette thèse.

Pour votre disponibilité et vos conseils précieux dans la rédaction de ce travail.

Veillez trouver ici, l'expression de ma plus grande reconnaissance et de mon plus profond respect.

A Monsieur le Docteur Charles ALLIOT

Ancien Assistant Hospitalier Universitaire des Centres de Soins
d'Enseignement et de Recherche Dentaires
Département de Parodontologie

- NANTES -

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de diriger cette thèse.

Pour m'avoir fait confiance, pour m'avoir accompagné et guidé dans ce travail.

Pour votre considération.

Veillez accepter ici, ma plus profonde gratitude.

A Monsieur le Professeur Laurent LE GUEHENNEC

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier
Docteur de l'Université de Nantes, Habilité à Diriger les Recherches
Chef du Département de Prothèse

- NANTES -

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.

Pour votre pédagogie, votre rigueur et votre volonté de faire progresser l'étudiant et le praticien que vous accompagnez et formez.

Pour votre considération et votre respect.

Veillez trouver ici, Monsieur le Professeur, ma considération distinguée.

A Monsieur le Docteur Gildas RETHORE

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier
Docteur de l'Université de Rennes 1
Département de Sciences Anatomiques

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.

Pour votre disponibilité et votre envie de transmettre vos connaissances.

Veillez recevoir ici mes plus sincères remerciements.

Sommaire :

I.	Généralités en implantologie.....	12
II.	Chirurgie guidée statique ou navigation statique.....	15
A.	Principe	15
B.	Protocoles	16
1.	Stéréolithographie	16
2.	Laboratoire.....	17
3.	Scans intra-oraux	18
III.	Chirurgie guidée dynamique ou navigation dynamique.....	19
A.	Principe	19
B.	Protocole clinique	20
1.	Etape 1 : CBCT pré-opératoire	20
2.	Etape 2 : Planification	20
3.	Etape 3 : Calibration ou concaténation	20
4.	Etape 4 : Temps chirurgical.....	23
5.	Plateau technique requis	26
IV.	Revue de la littérature	27
A.	Tableaux.....	30
B.	Discussion et hypothèses concernant la précision en chirurgie guidée	42
1.	Analyse des données recueillies dans la littérature.....	42
2.	Discussion sur la précision en chirurgie guidée :	47
C.	Avantages et inconvénients de la chirurgie guidée statique et dynamique.....	50
1.	Temps global	50
2.	Temps chirurgical.....	50
3.	Courbe d'apprentissage	51
4.	Kits implantaires	51
5.	Visibilité.....	52
6.	Posture et plateau technique	52
7.	Alignement.....	52
8.	Flexibilité dans le plan de traitement	53
9.	Coût lié à l'investissement initial	53
10.	Coûts liés à l'utilisation du système	53

11.	Le patient	54
D.	Indications des différentes techniques.....	56
1.	En fonction des restaurations en bouche	56
2.	Edentement encastré de faible étendue	56
3.	Limitation d'ouverture buccale et zones postérieures	56
4.	Site implantaire	57
5.	En pratique.....	57
V.	Conclusion.....	59
VI.	Annexes.....	60
A.	Etudes	60
B.	Bibliographie	77
C.	Registre des Tableaux	83
D.	Table des figures	83

I. Généralités en implantologie

La réhabilitation prothétique idéale doit apporter sustentation, stabilisation et rétention, et aussi empêcher les blessures gingivales. En 1985, Branemark a proposé un protocole décrivant la thérapie implantaire. (1) En 2022 il est dit que les solutions implantaires sont idéales pour retrouver esthétique et fonction. (2)

La perte dentaire entraîne une résorption osseuse et peut engendrer une perte de repères pour le clinicien. Cela peut mettre à mal la capacité du chirurgien à réaliser le placement implantaire optimal. (3)

Les écarts entre la position idéale de l'implant et la position réelle de l'implant génèrent des coûts et des pertes de temps de par la conception de pièces sur mesure et les variations dans les méthodes prothétiques pour s'adapter à la situation clinique ; cela expose également à des complications biomécaniques et biologiques. (4–6)

Une modification du profil d'émergence et des limites avec des excès de ciment résiduels après la pose peut créer une incapacité à maintenir une hygiène correcte, ce qui entraîne une inflammation des tissus péri-implantaires que l'on appelle péri-implantite. (7–10)

Si l'angulation de l'implant est telle que la transmission des forces occlusales n'est pas axiale, alors il y a une augmentation des contraintes sur la prothèse, l'implant et l'os qui prédispose entre autres à un risque fracturaire ou de perte de la prothèse. (11,12)

Ces conséquences biologiques et biomécaniques peuvent aller jusqu'à entraîner la perte implantaire. (10)

Il est possible de planifier la position tridimensionnelle optimale de l'implant en se basant sur des principes biologiques et prothétiques. (3,13)

Le but n'est pas seulement d'avoir un implant ostéo-intégré, mais de placer l'implant en fonction de la prothèse qui sera réalisée dans une position idéale d'un point de vue biomécanique. (10)

De la pose conventionnelle à main levée dans les zones présentant un volume osseux et une densité osseuse maximale, il y a eu passage à la pose guidée par la prothèse, puis à la chirurgie guidée et finalement aux techniques de chirurgie implantaire assistée par ordinateur. (2)

La chirurgie implantaire assistée par ordinateur ou implantologie assistée par ordinateur (IAO ou CAIS en anglais) utilise l'outil informatique dans l'optique d'améliorer la précision du placement implantaire. (14) L'usage de l'IAO permet trois applications distinctes et indépendantes les unes des autres (15) :

- la planification du plan de traitement ;
- la chirurgie guidée lors de la pose des implants ;
- la préparation d'une prothèse unitaire, partielle ou totale, avant même que la chirurgie n'ait eu lieu.

La planification et la chirurgie guidée correspondent à la navigation. Le principe de la navigation en implantologie est d'utiliser l'imagerie du patient avec un logiciel de planification implantaire pour simuler virtuellement le placement implantaire et déterminer la position implantaire optimale dans les 3 dimensions de l'espace. L'imagerie 3D utilisée correspond le plus souvent à celle obtenue avec un CBCT, le fichier DICOM est exploitable dans un logiciel de planification. (16,17) En alliant photographie, scan intra-oral et CBCT, le praticien crée un clone digital du patient, ce qui permet une étude approfondie de son cas clinique. (18)

Une fois que la position implantaire optimale est déterminée, il est possible d'utiliser un système de navigation pour réaliser chirurgicalement ce qui a été planifié. Les systèmes les plus souvent utilisés sont dits statiques ou dynamiques. (19)

En navigation statique, un guide physique avec un kit chirurgical sur mesure impose un axe à l'opérateur. En navigation dynamique, un suivi optique en temps réel permet de guider l'opérateur via un écran de navigation. Lorsqu'on allie planification digitale et pose conventionnelle alors il s'agit de navigation mentale ou pose à main levée. (20–22)

Il existe par ailleurs des systèmes faisant appel à la robotique ou la réalité augmentée (superposition de la réalité et d'éléments calculés par un système informatique en temps réel ; sons, images 2D ou 3D). (23–26)

L'utilisation des techniques assistées par ordinateur statiques n'a pas d'influence sur le taux de survie des implants, en comparaison avec les techniques conventionnelles mais permet d'améliorer le placement. (27)

La navigation pourrait être de la routine et ne pas être réservée à « un cas clinique particulier ». Pour que le clinicien utilise les systèmes de guides sur chaque patient nécessitant une pose d'implant, il faut lui fournir de bonnes raisons d'adopter cette technologie : amélioration de la précision, diminution des coûts et du temps nécessaire à la pose implantaire, gain d'ergonomie. (5)

Les systèmes de navigation statique et dynamique ont déjà été comparés par le passé, cependant les publications cliniques sur la navigation dynamique en implantologie connaissent un véritable essor depuis 2017. (28,29)

Le but de cette thèse est de décrire la planification et la chirurgie en navigation statique et dynamique, ainsi que la précision de ces systèmes, puis de présenter leurs avantages et inconvénients afin de poser des indications pour leur utilisation.

II. Chirurgie guidée statique ou navigation statique

A. Principe

En chirurgie guidée statique, un guide chirurgical est conçu lors de la planification puis utilisé lors de la chirurgie pour permettre la pose implantaire optimale. Ce guide peut être à appui dentaire, muqueux ou osseux ; une autre solution consiste à utiliser des mini-implants pour stabiliser le guide chirurgical.

Pour assurer la bonne position du guide, il est possible d'utiliser un index occlusal qui permet de placer le guide dans une position reproductible. (30)

Le guide placé en bouche est perforé, il présente des gaines de guidage, ce sont des douilles ; des tubes métalliques à travers lesquels le chirurgien va faire passer ses instruments. Des cuillères ou « drill keys » correspondant à la séquence implantaire sont parfois également utilisées afin de guider le chirurgien dans sa pose implantaire ; il s'agit de pièces métalliques qui viennent compléter les gaines et augmentent le guidage.



Figure 1: Guide chirurgical avec douilles en place (30)

Exemples de systèmes disponibles sur le marché : Nobel-Guide, Dentsply-Simplant

B. Protocoles

Les guides statiques sont produits en CFAO (par exemple par stéréolithographie) ou manuellement en laboratoire de prothèse (en utilisant des outils de positionnement et des foreuses). (31)

1. Stéréolithographie

Vercruyssen et al (30) décrivent deux techniques, la méthode historique qui correspond à un scan avec un guide radiologique radio-opaque et la technique en double-scan.

En double-scan, il y a un premier scan guide radiologique en bouche et un second scan guide radiologique seul. Des éléments radio-opaques sont sur le guide afin de pouvoir le visualiser et de pouvoir fusionner les 2 scans.

Il est alors possible de faire la planification puis la conception du guide en résine polymère par stéréolithographie, c'est-à-dire que le guide est conçu couche par couche par addition de matière. Les tubes métalliques sont ajoutés à la fin. Le guide est alors transmis au chirurgien qui va pouvoir l'essayer en bouche, à la compression, les tissus mous doivent pâlir.

Selon Vercruyssen et al, le protocole peut être résumé ainsi :

Etape 1. Guide radiologique avec dents radio-opaques (simple scan) ou marqueurs en gutta percha (double scan)

Etape 2. (Cone beam) Computed tomography du patient avec le guide radiologique et l'index occlusal en bouche. Scan du guide radiologique seul (double scan)

Etape 3. Planification implantaire dans le logiciel.

Etape 4. Production du guide chirurgical par stéréolithographie

Etape 5. Essayage du guide chirurgical en bouche et préparation d'un nouvel index chirurgical

Etape 6. Chirurgie. Fixation du guide avec des vis. Forage implantaire en utilisant des clés de diamètre croissant.

2. Laboratoire

Vercruyssen et al décrivent également une technique faisant appel au laboratoire de prothèse initialement décrite par Fortin et al (14). En utilisant un système mécanique, le guide radiologique est transformé en guide chirurgical. Pour cela, le guide chirurgical présente un cube préfabriqué, appelé X-cube qui se situe devant les lèvres guide en place. Le X-cube est traversé par 2 tubes en titane qui permettent le positionnement du guide sur une machine. Grâce aux données de la planification, le guide radiologique est foré, cela le transforme en guide chirurgical.

Le protocole peut être résumé ainsi :

Etape 1. Production d'un guide radiologique avec des dents radio-opaques + X-cube.

Etape 2. (Cone beam) Computed tomography du patient avec le guide radiologique.

Etape 3. Planification implantaire dans le logiciel.

Etape 4. Forage des positions implantaïres sur le guide radiologique avec une foreuse contrôlée numériquement (complètement automatisée). Le guide radiologique devient le guide chirurgical.

Etape 5. Le guide est placé en bouche dans la même position que lors de l'imagerie pré-opératoire. Chirurgie.

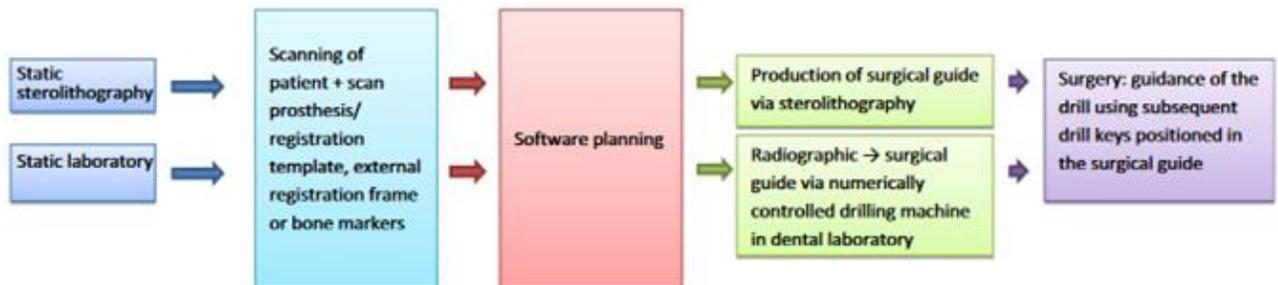


Figure 2 : Protocole des guides chirurgicaux statiques (30)

3. Scans intra-oraux

Lin et al (32) décrivent un protocole de navigation statique qui utilise les scans intra-oraux effectués avec des caméras optiques chez les patients présentant un édentement partiel. Un scan CBCT peut être fusionné avec une empreinte optique de la bouche du patient par alignement des surfaces dentaires via un algorithme. Il est alors possible d'avoir un protocole complètement digital de la planification jusqu'à la chirurgie ; ce qui correspond à un gain de temps et simplifie les procédures, limitant ainsi les erreurs humaines.

Toutefois, en présence d'artéfacts métalliques (couronnes) ou d'un nombre inadéquat de dents résiduelles, il n'est pas possible de se passer de guide radiologique.

Le protocole peut être résumé ainsi :

Etape 1. Scan CBCT et scan intra oral

Etape 2. Concaténation grâce aux dents ou au guide radiographique

Etape 3. Planification implantaire dans le logiciel.

Etape 4. Production du guide chirurgical par stéréolithographie

Etape 5. Chirurgie guidée statique

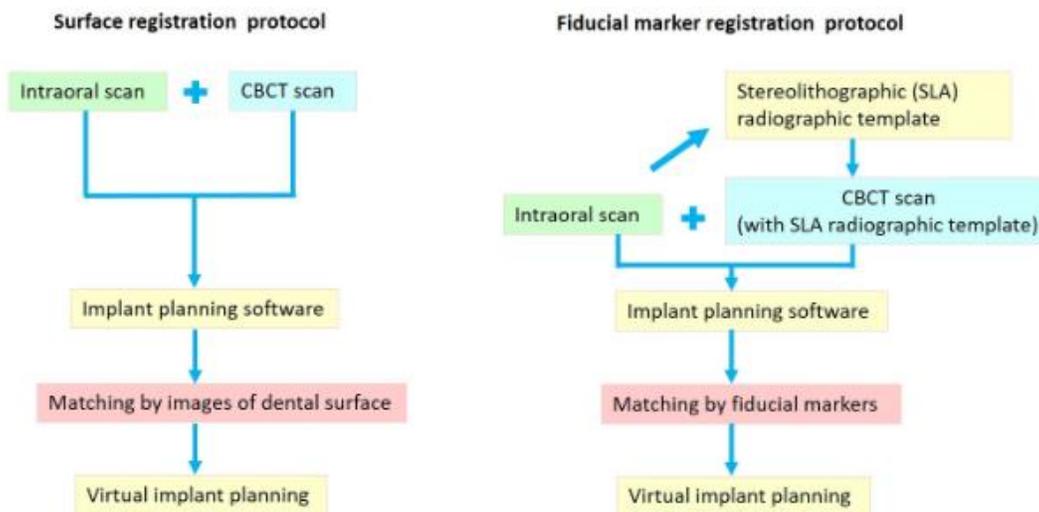


Figure 3 : Protocoles de planification implantaire digitale (32)

III. Chirurgie guidée dynamique ou navigation dynamique

A. Principe

La navigation dynamique est aussi appelée robotique passive ou encore "image guided implantology". En navigation dynamique, il y a un suivi en temps réel du patient et de l'instrument de l'opérateur par une caméra. Ce suivi permet de représenter la position du foret implantaire vis-à-vis du patient mais aussi de se repérer par rapport à la planification en temps réel sur un écran. A l'aide d'un jeu de cibles sur l'écran de navigation, le praticien est guidé visuellement dans sa pose implantaire.



Figure 4 : Chirurgie en navigation dynamique (33)

Exemples de systèmes disponibles sur le marché : ImplaNav, Navident, X-guide

B. Protocole clinique

1. Etape 1 : CBCT pré-opératoire

Les techniques de navigation dynamique reposent sur l'imagerie du patient, il faut réaliser un scan CBCT qui permettra d'obtenir un fichier DICOM. Il faut s'assurer avant la réalisation de cette imagerie, d'avoir des repères de référence. Ces repères sont nécessaires pour la reconnaissance et le suivi de l'arcade du patient en temps réel. Ils sont aussi appelés « trackers », traceurs, capteurs ou marqueurs (33,34) et sont radio-opaques, ainsi lors de la prise du scan CBCT pré-opératoire leur position est enregistrée.

2. Etape 2 : Planification

Le fichier DICOM est importé dans un logiciel de planification implantaire. Il est alors possible de placer et orienter les implants virtuellement dans une position permettant la réhabilitation prothétique. Les implants dans le logiciel de planification ont les mêmes dimensions que ceux qui seront implantés par la suite ; ils ont donc le même diamètre au niveau du col et à l'apex, la même longueur et la même forme. (5)

3. Etape 3 : Calibration ou concaténation

Afin d'effectuer la chirurgie en navigation dynamique, il faut relier le site chirurgical avec l'imagerie mais aussi l'instrument vis-à-vis du patient dans le système de navigation ; il s'agit de la calibration ou encore de la concaténation.

Calibration entre site chirurgical et imagerie

La précision du lien entre imagerie et site chirurgical a l'impact le plus significatif sur le système de navigation puisque tout découle de ce lien. Plusieurs méthodes ont été décrites en chirurgie craniofaciale : des implants osseux (plaques et vis), des gouttières occlusales, des repères anatomiques et des scans des surfaces au laser. (35)

La position du marqueur par rapport au site chirurgical doit être prise en considération. Il faut que le marqueur soit le plus proche possible pour maximiser la précision, sans pour autant gêner le chirurgien qui réalise l'intervention. Plus le marqueur est proche (loin), plus les déviations de position sont faibles (importantes), il en va de même pour la déviation angulaire. (35)

Les gouttières occlusales (gouttières thermoplastiques en résine) sont une solution non-invasive, stable et permettant une « registration » de haute précision ; les gouttières occlusales semblent suffisantes pour la navigation dynamique au maxillaire comme à la mandibule.

Les gouttières occlusales sont généralement dento-portées, et donc utilisées chez les patients avec un édentement partiel. Lorsque le nombre de dents restantes est insuffisant (édenté partiel ou complet), il est possible d'utiliser des mini implants pour supporter la gouttière. (36)



Figure 5 : Tracker patient fixé avec le X-Clip et tracker chirurgical sur le contre-angle (33)

Plusieurs auteurs décrivent des systèmes sans gouttière. (37–40)

La “cusp registration” est une alternative sans marqueur qui repose sur les cuspidés et sillons des dents de l’arcade présentant un édentement partiel. Cette alternative ne nécessite pas l’utilisation d’instrument ou d’outil supplémentaire.

La technologie Trace Registration repose sur l’anatomie du patient et utilise des structures présentes en bouche telles que les dents ou certaines restaurations en guise de marqueurs. Le protocole utilisé est le protocole « Trace and Place ».(38,41)

Trace : Après la planification, des traceurs optiques sont utilisés pour que la caméra repère les arcades (JawTracker et HeadTracker). Ensuite il y a enregistrement à partir d’une dent-marqueur sur 15 cm à l’aide d’un Tracer ; il s’agit d’un « surface contact scan » sur 3 à 6 zones de l’arcade. Cela permet de faire le lien entre l’arcade du patient physique et sur le CBCT. La « trace registration » dure en tout 1 à 2 minutes. Il est possible de vérifier le bon positionnement en plaçant la « boule d’enregistrement » et en comparant avec la position indiquée sur l’écran.

Place : chirurgie naviguée correspondant à la planification ; calibration puis vérification de la position des instruments comme précédemment – ne pas bouger les marqueurs optiques au risque d'engendrer des erreurs pour le système de navigation

D'autres auteurs évoquent l'utilisation de mini-implants qui sont implantés transitoirement afin de servir de support du marqueur. (21)

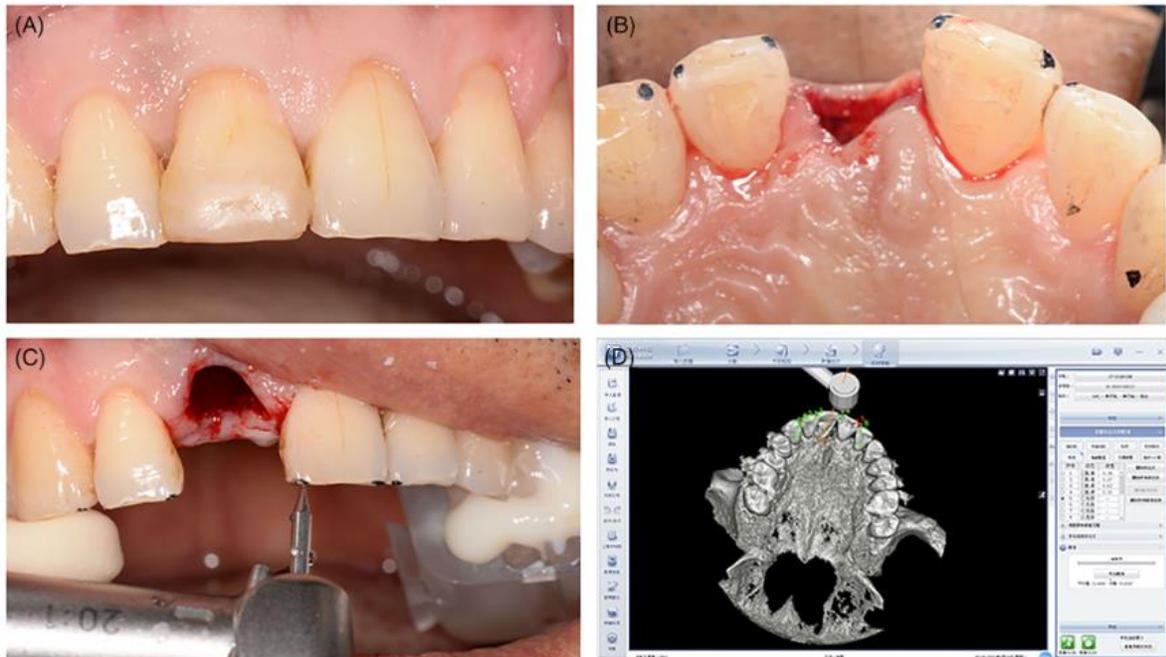


FIGURE 4 The process of cusp registration. (A) before operation; (B) the cusp (or fossa) chosen near operation area; (C) cusp registration in oral; and (D) cusp registration in software

Figure 6 : La cusp registration (40)

*(A) avant l'opération ; (B) la cuspidé (ou le sillon) choisi proche du site opératoire ;
(C) cusp registration en bouche ; et (D) cusp registration dans le logiciel*

Calibration entre patient et instruments

En chirurgie dynamique grâce à des capteurs, le système relie le patient et les outils chirurgicaux par triangulation. (34)

Une caméra (souvent à infra-rouge) reconnaît les traceurs et permet la localisation spatiale des instruments vis-à-vis du patient par triangulation. Il y a ensuite une retranscription instantanée de cette position sur l'écran affichant l'imagerie du patient avec la planification. (5,42)

Autrement dit, la navigation dynamique fait appel à une technologie de détection des mouvements ou "motion tracking" pour effectuer le suivi en temps réel des instruments et du patient par la caméra à l'aide de marqueurs sur l'arcade du patient et sur l'instrument. (43)

4. Etape 4 : Temps chirurgical

Ensuite lors de la chirurgie, il faut calibrer la longueur de chaque foret avant de pouvoir les utiliser. Hormis la calibration, il s'agit de la séquence normale pour préparer le site implantaire.



Figure 7 : Calibration de l'instrument (33)

Certains systèmes ne nécessitent pas de calibration pour chaque instrument, puisqu'il y a une bibliothèque des instruments dans le logiciel de navigation avec leur longueur, diamètre, etc. (44)

Le chirurgien utilise l'écran de navigation pour guider la position et l'angulation du forage implantaire. Le praticien a alors des informations en temps réel sur sa position par rapport à celle planifiée concernant le point d'émergence ou centrage, l'angulation et la profondeur verticale, à l'aide de jeux de cibles et de codes couleur le plus souvent.

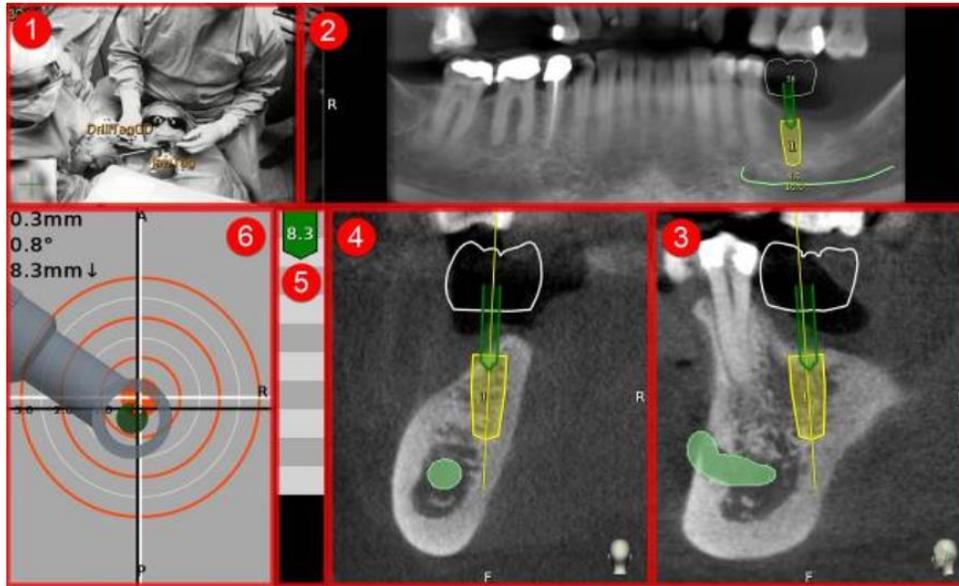


Figure 8 : Vues visibles par l'opérateur sur l'écran de navigation lors de l'ostéotomie (36)

(1) Flux vidéo de la caméra ; (2) Vue panoramique ; (3) Coupe mésio-distale ;
 (4) Coupe linguo-vestibulaire ; (5) Indicateur de profondeur ; (6) Cible

- 1 Patient's Anterior
- 2 Drill
- 3 Drill's Tip
- 4 Patient's Right
- 5 Patient's Posterior
- 6 Central Axis of planned osteotomy
- 7 Vertical distance between drill's tip and apex of planned osteotomy
- 8 Angle between drill and central axis of planned osteotomy
- 9 Horizontal distance between drill's tip and central axis of planned osteotomy

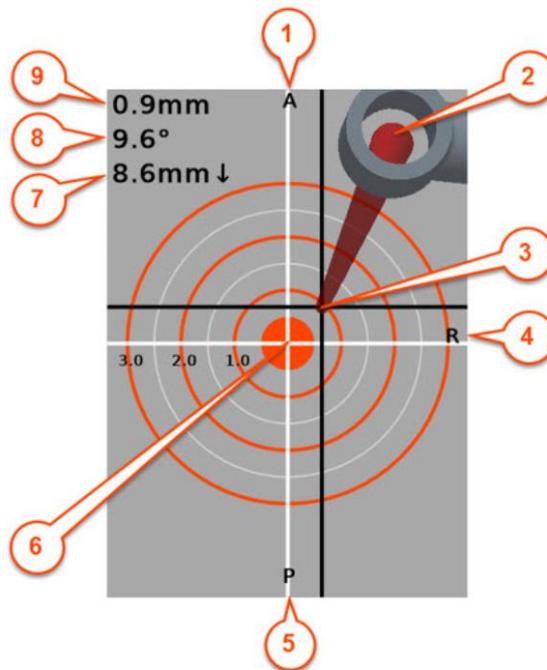


Figure 9 : Cible de l'écran de navigation (36)

Il y a une coordination en temps réel entre les mains et les yeux du chirurgien par la visualisation en 3D de la préparation du site implantaire et des structures anatomiques adjacentes importantes. Si nécessaire, des changements peuvent être apportés à la planification lors du temps chirurgical ; cela englobe la taille de l'implant, sa longueur, sa largeur, sa forme ainsi que les changements de position afin de permettre un placement précis de l'implant.

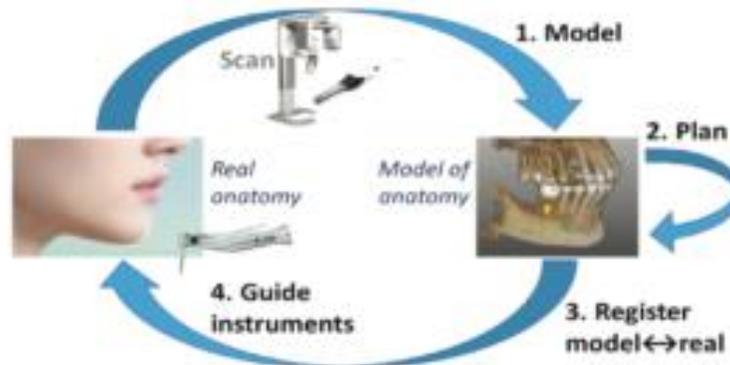


Figure 10 : Le protocole de navigation dynamique (33)

Le protocole en navigation dynamique peut être résumé ainsi (30,45,46) :

Etape 1. Scan du patient avec les capteurs/marqueurs en bouche

Etape 2. Planification implantaire dans le logiciel.

Etape 3. Lien entre imagerie et patient puis patient et instruments grâce aux capteurs/marqueurs

Etape 4. Chirurgie en navigation dynamique

Le protocole ou « workflow » pourrait être complètement digital. (47)

5. Plateau technique requis

Un système de navigation dynamique correspond à 5 éléments principaux : une unité centrale avec une interface permettant d'avoir le logiciel de planification puis de guidage ; une pièce à main avec un traceur ; un marqueur sur le patient ; une caméra permettant de détecter les différents marqueurs/traceurs et un chariot pour transporter l'unité centrale et la caméra. (36)

Il n'y a pas besoin de systèmes de forage ou d'instruments spécifiques pour procéder à la navigation dynamique.



Figure 11 : Plateau technique d'un système de navigation (40)

1 – Marqueur ; 2 – Capteur infra-rouge (caméra optique) ; 3 – Interface du système de navigation

La caméra est souvent à infra-rouge, mais il est possible d'utiliser la lumière ambiante.

La caméra surplombe généralement le bloc opératoire mais dans le système de navigation DENACAM (Mininavident AG, Liestal, Suisse), la caméra est attachée à l'instrument de l'opérateur. (36,47)

IV. Revue de la littérature

La navigation statique en implantologie a été décrite dans la littérature, plusieurs méta-analyses sur la précision du positionnement implantaire en navigation statique in vivo existent.

La navigation dynamique en implantologie connaît un véritable essor dans son développement mais la littérature disponible traitant de la précision du positionnement implantaire en navigation dynamique in vivo est encore restreinte.

Que peut-on dire de la précision du positionnement implantaire en navigation dynamique in vivo ?
Que dit la littérature sur la précision du positionnement implantaire en chirurgie guidée statique ?

Nous avons formulé une question PICO, telle que ci-dessous :

Population	In vivo chez l'Homme, édenté partiel/complet
Intervention	Pose d'implant avec navigation dynamique ± statique
Comparison	Planification vs situation clinique
Outcome accuracy	Planification vs situation clinique

Les recherches ont été effectuées sur la base de données PubMed.

Pour décrire la précision de la navigation dynamique in vivo, seuls les résultats issus de la recherche sur la base de données PubMed ont été retenus. La recherche a été effectuée en anglais en retenant les publications de 2014 à 2022 avec l'utilisation de mots clés tels que « dynamic navigation, dental implant, accuracy » pour délimiter la recherche.

Exemple : dynamic navigation dental implant accuracy

En navigation dynamique, les références présentant les critères suivants ont été retenues :

- Etude in vivo chez l'Homme
- Implants des maxillaires
- Utilisation de la navigation dynamique
- Plus de 10 patients inclus dans l'étude
- Plus de 30 implants posés
- Comparaison à la planification avec CBCT post-opératoire
- Présenter au moins une valeur concernant la précision *

En navigation dynamique, les références présentant les critères suivants n'ont pas été retenues :

- Etude in vitro, in vivo sur des modèles animaux ou post-mortem
- Avis d'experts
- Procédure insuffisamment détaillée
- Implants zygomatiques, ptérygoïdes ou orthodontiques
- Patients ayant eu une chirurgie de reconstruction faciale
- Cas clinique déjà évoqué dans un article précédent
- Absence d'utilisation de la navigation dynamique

Pour décrire la précision de la chirurgie guidée statique in vivo, seules les études comparatives retenues lors de la recherche concernant la précision de la chirurgie guidée dynamique et des essais cliniques randomisés ont été inclus. La recherche a été effectuée en anglais en retenant les publications de 2014 à 2022 avec l'utilisation de mots clés tels que « guided, dental implant, accuracy » pour délimiter la recherche.

Exemple : guided dental implant accuracy

En navigation statique, les références présentant les critères suivants ont été retenues :

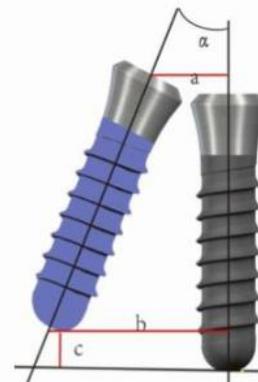
- Etude clinique randomisée chez l'Homme analysée dans une revue de la littérature ou méta analyse OU étude clinique comparative entre chirurgie guidée statique et dynamique
- Implants des maxillaires
- Utilisation de la chirurgie guidée statique
- Plus de 10 patients inclus dans l'étude
- Plus de 30 implants posés
- Comparaison à la planification avec CBCT post-opératoire
- Présenter au moins une valeur concernant la précision *

En navigation statique, les références présentant les critères suivants n'ont pas été retenues :

- Etude in vitro, in vivo sur des modèles animaux ou post-mortem
- Avis d'experts
- Procédure insuffisamment détaillée
- Implants zygomatiques, ptérygoïdes ou orthodontiques
- Patients ayant eu une chirurgie de reconstruction faciale
- Cas clinique déjà évoqué dans un article précédent
- Absence d'utilisation de la chirurgie guidée statique

* Les résultats affichés dans les études traitant de chirurgie guidée statique ou dynamique devaient présenter au moins une des valeurs suivantes :

- a : la déviation ou erreur par rapport à la planification au niveau du point d'entrée ou du col implantaire
- b : la déviation ou erreur par rapport à la planification au niveau de l'apex
- c : la différence de profondeur par rapport à la planification
- α : la déviation angulaire par rapport à l'axe souhaité



Pour chacune des publications retenues, nous tâcherons d'identifier les biais et la puissance des études menées.

Selon la HAS dans son rapport de 2013 (48), la gradation de l'évidence scientifique s'appuie l'existence de données dans la littérature, le niveau de preuve des études disponibles et la cohérence des résultats. La gradation des recommandations ne présume pas obligatoirement du degré de force de ces recommandations, il peut exister des recommandations fortes malgré l'absence d'un appui scientifique. L'appréciation de la force des recommandations repose sur le niveau d'évidence scientifique et l'interprétation des experts.

Tableau 1 – Grade des recommandations de la HAS (48)

Grade des recommandations	Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature
A Preuve scientifique établie	Niveau 1 - essais comparatifs randomisés de forte puissance ; - méta-analyse d'essais comparatifs randomisés ; - analyse de décision fondée sur des études bien menées.
B Présomption scientifique	Niveau 2 - essais comparatifs randomisés de faible puissance ; - études comparatives non randomisées bien menées ; - études de cohortes.
C Faible niveau de preuve scientifique	Niveau 3 - études cas-témoins.
	Niveau 4 - études comparatives comportant des biais importants ; - études rétrospectives ; - séries de cas ; - études épidémiologiques descriptives (transversale, longitudinale).

A. Tableaux

L'analyse des articles sélectionnés est détaillée dans les annexes sous la forme suivante :

- 1. Titre :**
- 2. Auteurs :**
- 3. Année de publication :**
- 4. Type d'étude :**
- 5. Nombre de patients :**
- 6. Nombre d'opérateurs :**
- 7. Type d'édentement :**
- 8. Nombre d'implants :**
- 9. Type de procédure :**
- 10. Objectif et hypothèse de départ :**
- 11. Résultats :**
- 12. Biais :**

Cette liste peut évoluer en fonction des articles.

Article	Type de navigation /Système et logiciel	Type d'étude	Nombre de patients	Nombres d'implants	Utilisation de la navigation
1 Block et al 2017	dynamique (X-Guide, X-Nav Technologies)	prospective	100 patients	100 cas	totale
2 Block et al 2017	dynamique (X-Guide, X-Nav Technologies) et mentale	prospective	478 patients	714 implants	partielle et totale
3 Stefanelli et al 2019	dynamique (Navident, ClaroNav Inc)	retrospective	89 arcades	231 implants	partielle et totale
4 Kaewsiri et al 2019	statique (coDiagnostiX software, Dental Wings Inc , Straumann)et dynamique (IRIS-100, EPED Inc)	clinique randomisée	60 patients	60 implants	totale
5 Aydemir 2020	dynamique (X-Guide, X-Nav Technologies) et mentale	clinique randomisée	30 patients	86 implants	totale
6 Stefanelli et al 2020	dynamique (Navident 2.0, ClaroNav)	retrospective	59 patients	136 implants	non précisé
7 Stefanelli et al 2020	dynamique (Navident 2.0, ClaroNav)	cas cliniques	13 patients	77 implants	non précisé
8 Wu et Zhou et al 2020	dynamique (Dental Implant Navigation System, Suzhou Digital-health care Co. Ltd) et statique (3shape software)	retrospective	54 patients	95 implants	non précisé
9 Yimarj et al 2020	dynamique (Iris-100, EPED Inc) et statique (coDiagnostiX software, Dental Wings Inc , Straumann)	clinique randomisée	30 patients	60 implants	totale
10 MengZhang et al 2021	dynamique (Dental Implant Navigation System, Suzhou Digital-health care Co. Ltd)	restrospective	12 patients	48 implants	totale
11 Ma et al 2022	dynamique (Dcarer, Suzhou Digital-health care Co. Ltd)	retrospective	64 patients	99 implants	totale
12 Jaemsuwan et al 2022	dynamique (IRIS 100, EPED Inc), statique (coDiagnostiX software, Dental Wings Inc , Straumann) et mentale	prospective	13 patients	60 implants	totale
13 Kiatkroekkrai et al 2020	statique (coDiagnostiX software, Dental Wings Inc, T Dental Lab)	clinique randomisée	47 patients	60 implants	totale
14Smitkarn et al 2019	statique (coDiagnostiX software, Dental Wings Inc)	clinique randomisée	52 patients	60 implants	totale
15Younes et al 2018	statique (Simplant, Dentsply Sirona Implants)	clinique randomisée	32 patients	71 implants	pilote et totale
16Varga et al 2020	statique (SMART Guide, dicomLAB Dental) et mentale	clinique randomisée	101 patients	207 implants	pilote, partielle et totale
17Vercruyssen et al 2014	statique (Simplant, Dentsply Sirona Implants ; guides : Materialise Universal et Facilitate)	clinique randomisée	59 patients	311 implants	pilote, partielle et totale

Tableau 2 : Résumé des 17 études sélectionnées

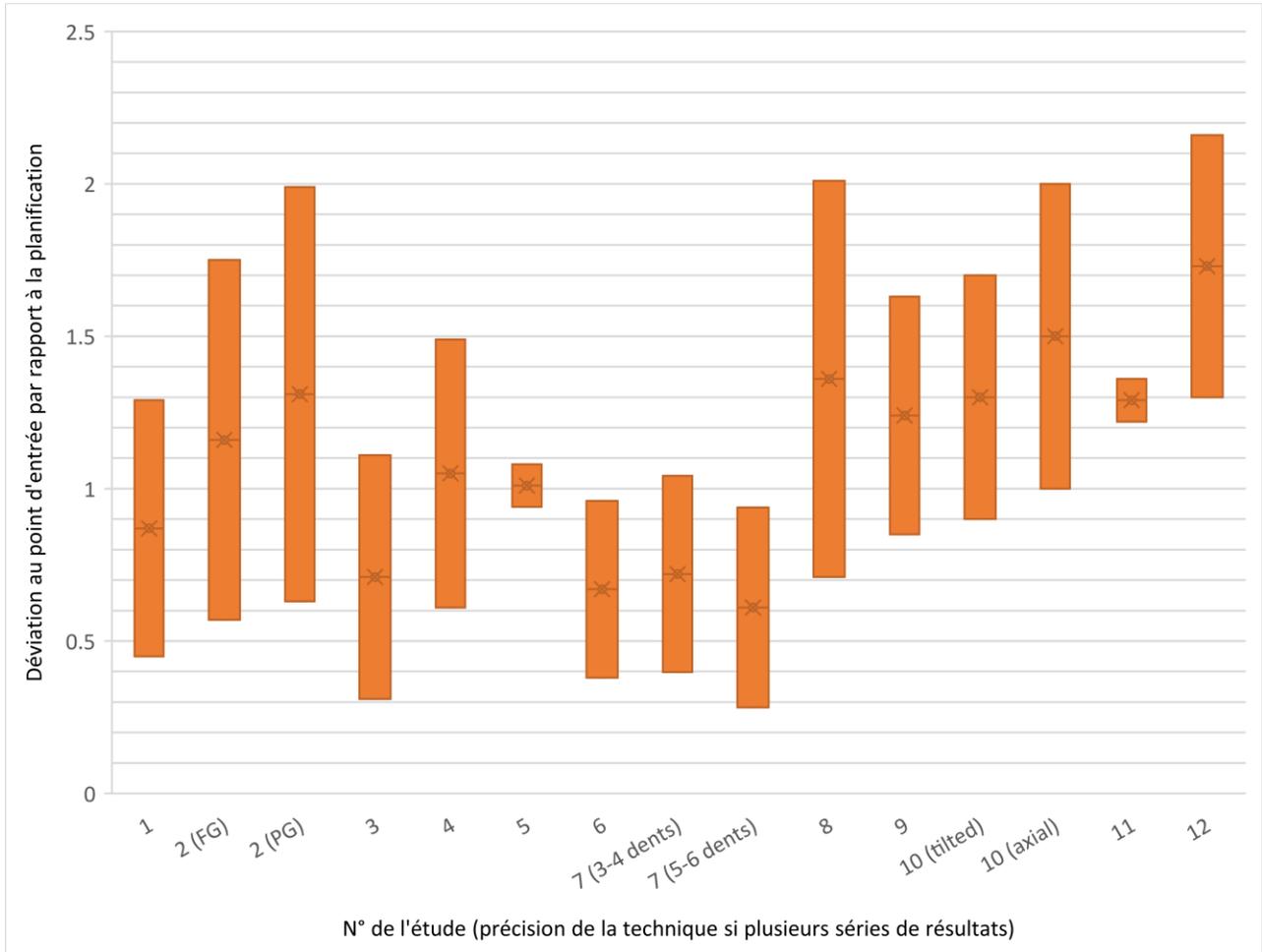
Article	Système d'exploitation	a erreur point d'entrée (mm)	b erreur à l'apex (mm)	α erreur d'angulation (deg)	c prodonfeur (mm)
1 Block et al 2017	X-Guide	0.87 ± 0.42	1.09 ± 0.66	3.62 ± 2.73	0.96 ± 0.66
2 Block et al 2017	X-Guide (full guided)	1.16 ± 0.59	1.29 ± 0.65	2.97 ± 2.09	0.78 ± 0.60
	X-Guide (partial guided)	1.31 ± 0.68	1.52 ± 0.78	3.43 ± 2.33	0.90 ± 0.74
3 Stefanelli et al 2019	Navident	0.71 ± 0.40	1.00 ± 0.49	2.26 ± 1.62	
4 Kaewsiri et al 2019	Iris-100	1.05 ± 0.44	1.29 ± 0.50	3.06 ± 1.37	
5 Aydemir 2020	X-Guide	1.01 ± 0.07	1.83 ± 0.12	5.59 ± 0.39	
6 Stefanelli et al 2020	Navident	0.67 ± 0.29	0.99 ± 0.33	2.5 ± 1.04	0.55 ± 0.25
7 Stefanelli et al 2020	Navident (3-4 dents)	0.72 ± 0.32	1.17 ± 0.31	3.10 ± 1.02	0.66 ± 0.29
	Navident (5-6 dents)	0.61 ± 0.33	0.88 ± 0.37	2.41 ± 0.98	0.50 ± 0.28
8 Wu et Zhou et al 2020	Navident et statique (3shape software)	1.36 ± 0.65	1.48 ± 0.65	3.71 ± 1.32	
9 Yimarj et al 2020	Iris-100	1.24 ± 0.39	1.58 ± 0.56	3.78 ± 1.84	
10 MengZhang et al 2021	Dental Implant Navigation System (axial)	1.5 ± 0.5	1.3 ± 0.7	3.2 ± 1.5	
	Dental Implant Navigation System (incliné)	1.3 ± 0.4	1.1 ± 0.5	3.1 ± 1.0	
11 Ma et al 2022	Dcarer	1.29 ± 0.07	1.43 ± 0.08	3.29 ± 0.17	0.85 ± 0.71
12 Jaemsuwan et al 2022	IRIS-100	1.73 ± 0.43	1.86 ± 0.82	5.75 ± 2.09	

Tableau 3 : Mesures de la précision en chirurgie guidée dynamique parmi les études sélectionnées

Article	Guide	a erreur point d'entrée (mm)	b erreur à l'apex (mm)	α erreur d'angulation (deg)	c prodonfeur (mm)
4 Kaewsiri et al 2019	Straumann	0.97 ± 0.44	1.28 ± 0.46	2.84 ± 1.71	
8 Wu et Zhou et al 2020	3shape software	1.22 ± 0.70	1.33 ± 0.73	4.34 ± 2.22	
9 Yimarj et al 2020	Straumann	1.04 ± 0.67	1.54 ± 0.79	4.08 ± 1.69	
12 Jaemsuwan et al 2022	Straumann	1.40 ± 0.72	1.66 ± 0.61	4.98 ± 2.16	
13 Kiatkroekkrai et al 2020	T Dental Lab (scan intra-oral)	0.87 ± 0.49	1.10 ± 0.53	2.42 ± 1.47	0.59 ± 0.48
	T Dental Lab (scan extra-oral)	1.01 ± 0.56	1.38 ± 0.68	3.23 ± 2.09	0.69 ± 0.54
14 Smitkarn et al 2019	coDiagnostiX software	0.9 ± 0.8	1.2 ± 0.9	2.8 ± 2.6	
15 Younes et al 2018	Simplant (pilot guided)	1.12 ± 0.10	1.43 ± 0.18	5.95 ± 0.87	
	Simplant (full guided)	0.73 ± 0.10	0.97 ± 0.19	2.30 ± 0.92	
16 Varga et al 2020	SMART Guide (pilot guided)	1.57 ± 0.91	1.58 ± 1.09	5.71 ± 3.68	
	SMART Guide (partial guided)	1.37 ± 0.79	1.59 ± 0.86	4.30 ± 3.33	
	SMART Guide (full guided)	1.40 ± 0.54	1.59 ± 0.59	3.04 ± 1.51	
17 Vercruyssen et al 2014	Materialise Universal (soutien osseux)	1.6 (.92)	1.65 ± 0.82	3.79 ± 2.36	
	Materialise Universal (soutien muqueux)	1.23 ± 0.60	1.57 ± 0.71	2.86 ± 1.60	
	Facilitate (soutien muqueux)	1.38 ± 0.64	1.6 ± 0.70	2.71 ± 1.36	
	Facilitate (soutien osseux)	1.33 ± 0.82	1.5 ± 0.72	3.2 ± 2.7	

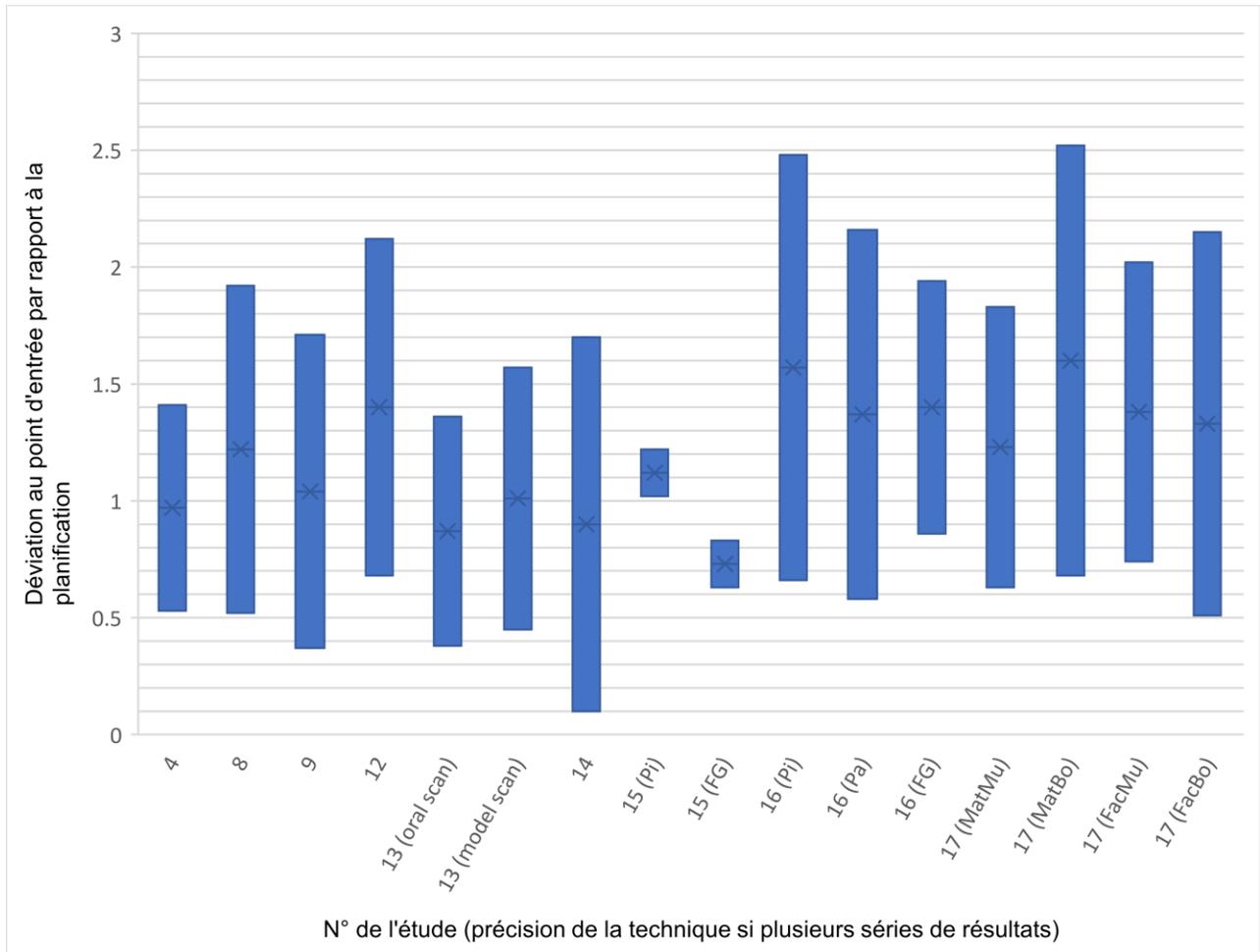
Tableau 4 : Mesures de la précision en chirurgie guidée statique parmi les études sélectionnées

Tableau 5 : Déviation au point d'entrée par rapport à la planification en chirurgie guidée dynamique



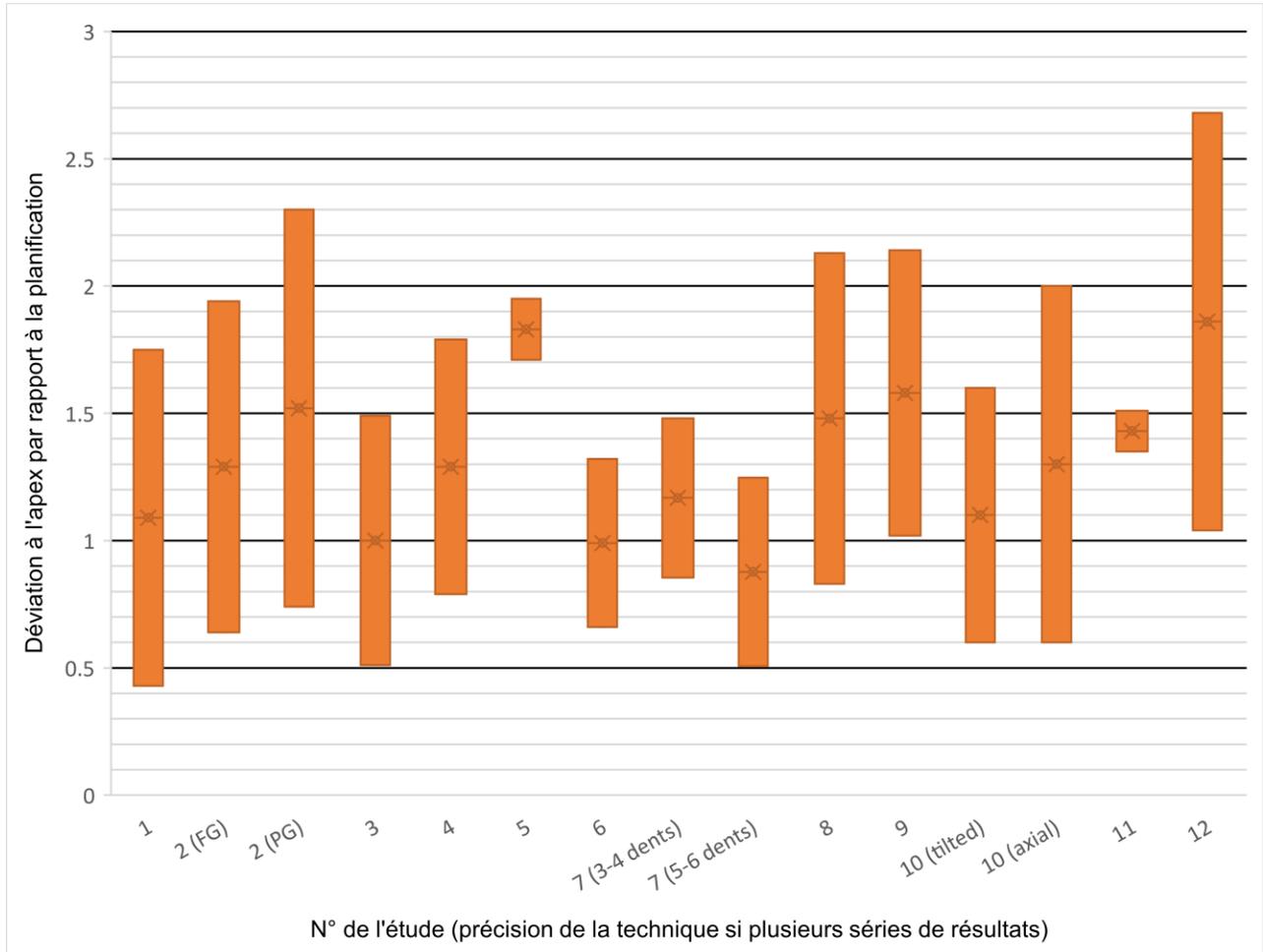
La moyenne de la déviation au point d'entrée (en mm) et la dispersion des données sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 6 : Déviation au point d'entrée par rapport à la planification en chirurgie guidée statique



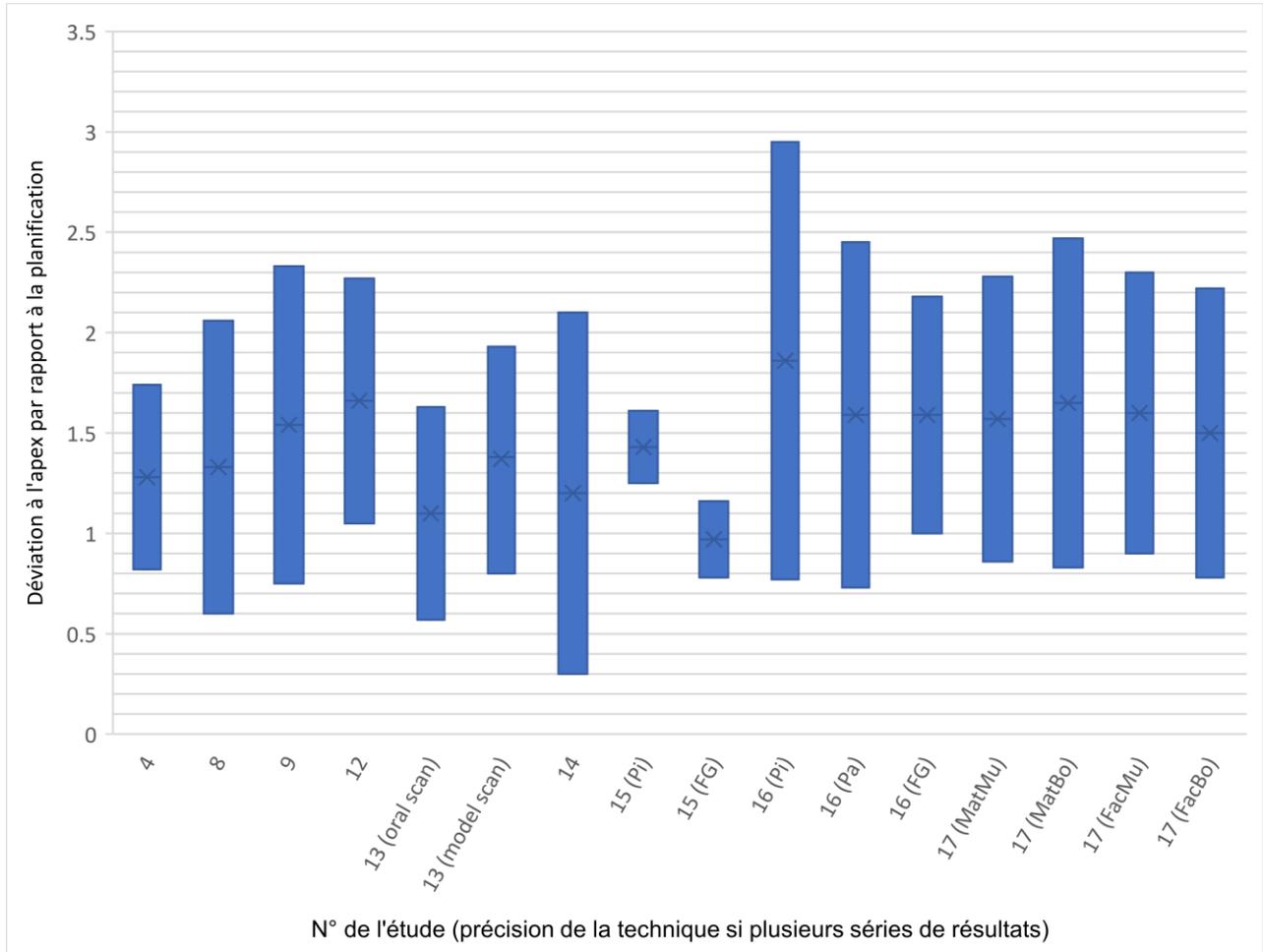
La moyenne de la déviation au point d'entrée (en mm) et la dispersion des données sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 7 : Déviation à l'apex par rapport à la planification en chirurgie guidée dynamique



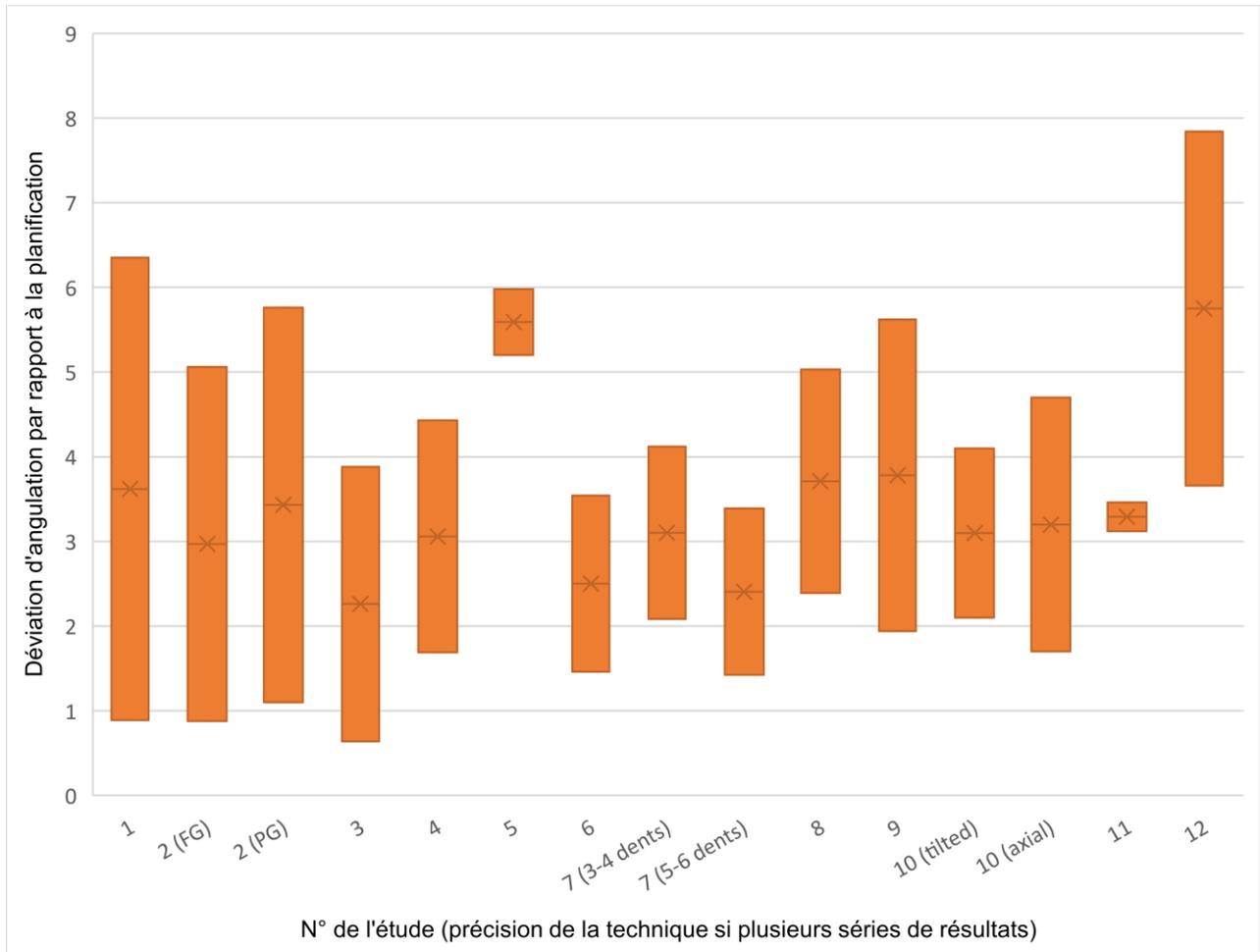
La moyenne de la déviation   l'apex (en mm) et la dispersion des données sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 8 : Déviation à l'apex par rapport à la planification en chirurgie guidée statique



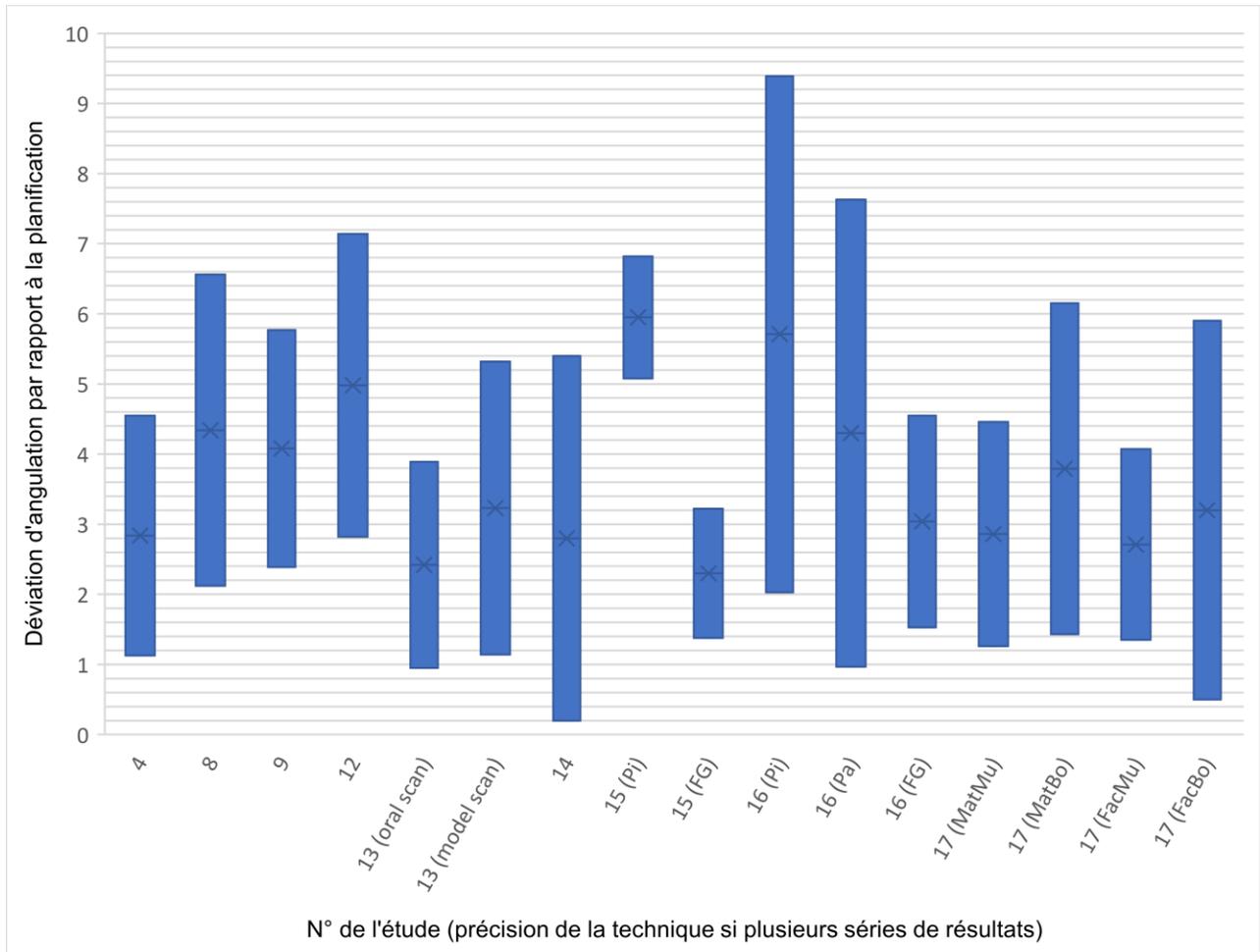
La moyenne de la déviation à l'apex (en mm) et la dispersion des données sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 9 : Déviation angulaire par rapport à la planification en chirurgie guidée dynamique



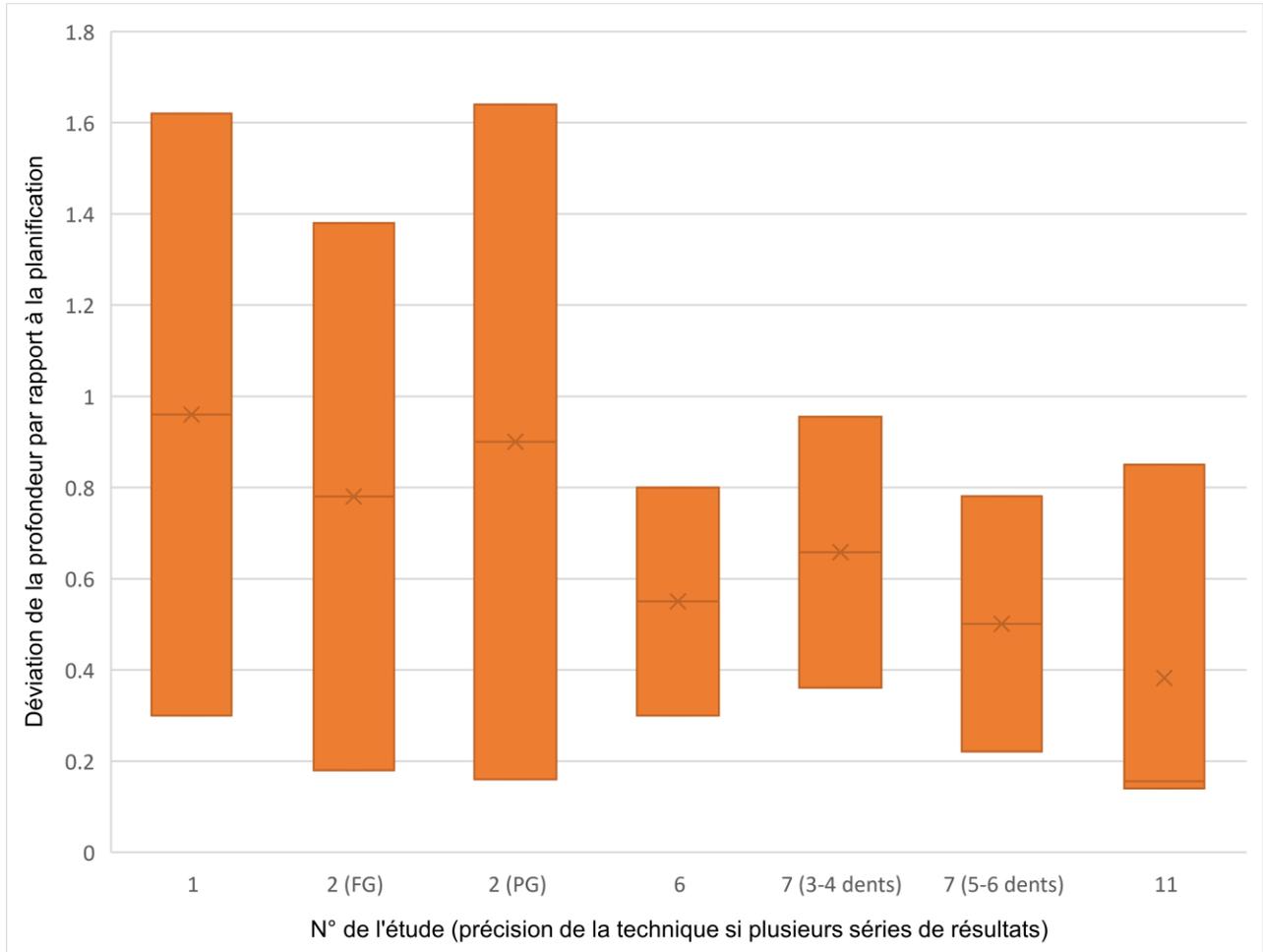
La moyenne de la déviation angulaire (en degré) et la dispersion des données sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 10 : Déviation angulaire par rapport à la planification en chirurgie guidée statique



La moyenne de la déviation angulaire (en degré) et la dispersion des données sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 11 : Différence de profondeur par rapport à la planification en chirurgie guidée dynamique



La moyenne de la différence de profondeur (en mm) et la dispersion des données sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 12 : Moyennes des déviations dans les études incluses et dans la littérature

	Moyennes des déviations en navigation dynamique	Moyennes des déviations en chirurgie guidée statique	Déviations en navigation dynamique selon la méta-analyse de Tahmaseb 2018	Déviations en chirurgie guidée statique selon la méta-analyse de Jorba-Garcia 2021	Déviations à main levée selon la méta-analyse Tahmaseb 2014
<i>Déviations au point d'entrée</i>	0.61 - 1.73 mm	0.73 - 1.60 mm	1.2 mm	1.03 mm	1.38 mm
<i>Déviations à l'apex</i>	0.88 - 1.86 mm	0.87 - 1.86 mm	1.4 mm	1.34 mm	1.74 mm
<i>Déviations de l'angulation</i>	2.26 - 5.75 °	2.30 - 5.95 °	3.5 °	3.68 °	5.03 °

Le tableau ci-dessus présente la plage de valeurs des moyennes des déviations dans les études incluses et les moyennes des déviations décrites dans la littérature.

B. Discussion et hypothèses concernant la précision en chirurgie guidée

1. Analyse des données recueillies dans la littérature

Précision de la navigation dynamique

Les études traitant de la précision du positionnement implantaire en navigation dynamique in vivo sont récentes.

A notre connaissance, en 2017, Block et al (42), sont les premiers à avoir mesuré in vivo la précision du positionnement implantaire avec l'aide de la navigation dynamique au cours de leur étude de cohorte. (36,44)

En 2019, Kaewsiri et al (49) publient le premier essai clinique randomisé sur la précision du positionnement implantaire avec l'aide de la navigation dynamique in vivo. (44)

Comparaison de la précision entre navigation dynamique et pose à main levée

Les études n°1 (42), 2 (5), 5 (50) et 12 (21) comparent la chirurgie guidée dynamique à la pose à main levée ; la navigation dynamique est significativement plus précise que la navigation mentale.

Comparaison de la précision entre chirurgie guidée statique et dynamique

Les études n°1 (42), 3 (36) et 6 (38) évoquent la littérature pour comparer la navigation dynamique à la chirurgie guidée statique. La navigation dynamique serait au moins aussi précise que la chirurgie guidée statique.

Les études n° 4 (49), 8 (51), 9 (22) et 12 (21) ont comparé chirurgie guidée statique et dynamique au cours de leur étude clinique. Aucune de ces études ne met en évidence de différence significative entre navigation statique et dynamique ; la navigation dynamique a au moins la même précision que les guides statiques. Peu importe le type, le diamètre ou la longueur de l'implant, indifféremment de l'expérience des chirurgiens ou du site implantaire ou de l'édentement (partiel ou complet), le niveau de précision est similaire.

Comparaison de la précision en navigation dynamique selon le type de marqueurs

Les études n°6 (38), 7 (41) et 11 (40) décrivent un protocole où la calibration entre site chirurgical et imagerie se fait à l'aide des dents, cuspides ou sillons de la bouche du patient plutôt qu'avec une gouttière ; il s'agit de Trace Registration ou Cusp Registration.

La précision augmente lors de l'enregistrement d'un nombre de dents plus important. Selon l'enregistrement de 3-4 dents ou 5-6 dents, il y aurait une différence statistiquement significative pour toutes les variables (point d'entrée, apex, profondeur et angle). Cependant, les impacts de cette différence sont probablement négligeables d'un point de vue clinique.

L'alignement avec des marqueurs anatomiques est aussi précis que les méthodes dynamiques avec gouttière ou que les guides statiques. De plus, les valeurs extrêmes sont diminuées drastiquement car il y a la possibilité de réenregistrer et de recalibrer en temps réel.

Comparaison de la précision selon l'implantation immédiate ou conventionnelle

En 2022, Ma et al ont cherché à évaluer la précision du placement implantaire en navigation dynamique lors d'une implantation immédiate. Il n'y aurait pas de différence significative entre implantations immédiate et conventionnelle lors de la pose d'un seul implant, hormis la déviation tridimensionnelle à l'apex si l'implant est placé dans l'alvéole. (40)

Comparaison entre utilisations partielle et totale de la navigation dynamique

Les études n°2 (5) et 3 (36) ont comparé la précision du positionnement implantaire suite à une utilisation partielle ou totale du guide pour la pose implantaire.

L'utilisation est dite totale ou « full-guided » lorsque la navigation est utilisée pour le positionnement complet de l'implant. L'utilisation est dite partielle ou « half-guided » quand le site implantaire est préparé avec guidage mais que l'implant est mis en place manuellement pour au moins 50% de sa longueur. Il y a un recours à l'usage partiel lorsque le torque généré par l'implant est supérieur à celui offert par la PAM ou le moteur ; ou lorsque le chirurgien a besoin de visualiser directement la profondeur de l'implant lors de sa mise en place.

La comparaison de la pose implantaire à main levée et en navigation dynamique suite à une ostéotomie en navigation dynamique montre que la précision de la chirurgie guidée dynamique est supérieure à celle de la navigation manuelle concernant la pose implantaire.

Entre utilisations partielle et totale, il y a des différences de précision statistiquement significatives sauf pour l'angulation et le point d'entrée. L'utilisation totale est significativement plus précise que l'utilisation partielle.

Comparaison du parallélisme en chirurgie guidée statique et dynamique

Les études n°9 (22) et 12 (21) ont comparé le parallélisme obtenu entre plusieurs implants posés en chirurgie guidée statique et dynamique. Il n'y a pas de différence entre navigation statique et dynamique en termes de parallélisme entre deux implants. Les deux systèmes permettent un placement précis et peuvent aider le chirurgien à obtenir un parallélisme adéquat entre les implants qu'il pose.

Comparaison de la précision en fonction de l'édentement en chirurgie guidée dynamique

Les études n°3 (36) et 12 (21) étudient l'influence du type d'édentement sur la précision du placement implantaire.

L'étude n°12 (21) décrit plus de déviations chez les patients édentés complets que chez les patients édentés partiels.

L'étude n°3 (36) présente des résultats quasiment identiques chez l'édenté partiel avec utilisation d'une gouttière et chez l'édenté complet avec des mini implants comme supports de traceurs. Les marqueurs sur mini implants seraient plus rapides et simples à utiliser que les marqueurs avec une gouttière, cependant c'est une alternative plus invasive.

Comparaison de la précision en chirurgie guidée dynamique selon le site implantaire

Les études n°3 (36) et 8 (51) ne trouvent pas de différence en fonction du site implantaire en navigation dynamique, que ce soit entre maxillaire et mandibule ou entre les différents sextants.

L'étude n°6 (38) trouve une différence significative en faveur de la mandibule concernant les erreurs de positionnement à l'apex, autrement aucune différence entre le maxillaire et la mandibule.

L'étude n°8 (48) ne trouve pas de différence significative entre chirurgie guidée statique et dynamique au niveau des prémolaires. Par contre, avec la navigation dynamique, il y aurait plus de déviation apicale en antérieur et moins d'angulation au niveau des molaires.

Comparaison de la précision en chirurgie guidée dynamique selon l'axe de l'implant

L'étude n°10 (52) de Meng et al évalue la précision du positionnement d'implant incliné volontairement en secteur postérieur maxillaire. Il y aurait un niveau de précision similaire que l'implant soit incliné ou non.

Précision de la chirurgie guidée statique

Comparaison de la précision entre guide statique et main levée

Les études n°13 (53), 14 (54), 15 (55), 16 (56) et 17 (57) sur la chirurgie guidée statique trouvent toutes une amélioration significative de la précision du placement implantaire ; et ce peu importe le type d'édentement ou l'utilisation faite du guide.

Comparaison de la précision en fonction de l'utilisation du guide statique

Les études n°15 (55), 16 (56) et 17 (57) ont comparé la précision du placement implantaire en fonction de l'utilisation faite du guide statique.

Chaque degré de guidage apporte une précision supplémentaire à la pose implantaire. Plus le chirurgien est guidé, plus la correspondance entre planification et réalisation chirurgicale est grande.

Les utilisations partielle et totale permettent d'atteindre un niveau de précision satisfaisant. Le forage pilote, autrement n'utiliser le guide que pour le premier foret n'est pas suffisant, peu importe le support du guide car il peut ensuite y avoir des déviations au cours de l'ostéotomie. Cette aide lors du premier forage peut néanmoins se révéler avantageuse lorsque la chirurgie guidée est contre-indiquée ; si la crête alvéolaire est trop fine par exemple., Pour bénéficier au plus de ce premier forage guide, il faudrait réaliser une insertion passive des forets suivants.

Comparaison entre guide statique conçu par scan intra et extra oral

L'étude n°13 (53) de Kiatkroekkrai et al compare la précision du positionnement implantaire avec des guides statiques conçus à l'aide de scan intra ou extra oral.

Il n'y aurait pas de différence de précision relative au type de scan utilisé pour concevoir le guide chirurgical. Le scan intra oral est au moins aussi précis.

Les scans extra-oraux semblent être plus utilisés que les scans intra-oraux pour la confection de guides statiques. Le scan du modèle retranscrira les éventuelles déformations de l'empreinte ; cependant cela évite les difficultés du scan intra-oral liées à la salive et l'espace intraoral ou même les potentielles déformations liées à une application de poudre pour certains systèmes.

Comparaison de la précision obtenue avec un guide statique selon le type de soutien

L'étude n°17 (57) ne met en évidence aucune différence entre soutien osseux et muqueux.

Comparaison de la précision d'un guide statique selon le guide

En 2014, Vercruyssen et al (57) déclarent être les premiers à publier une étude clinique randomisée comparant plusieurs systèmes de guides. Ils ne trouvent pas de différence entre les différents systèmes utilisés. Pourtant parmi les deux guides utilisés, un seul a un stop physique, l'autre nécessite un contrôle visuel continu.

Comparaison de la précision avec un guide statique selon le site implantaire

Les études n°14 (54) et 17 (57) s'accordent pour dire que l'arcade et la position de l'implant (en antérieur ou en postérieur, à droite ou à gauche) ont une influence significative sur la précision lors de l'utilisation d'un guide statique.

L'étude n°14 nous déclare que les implants placés au maxillaire en secteur postérieur à droite sont plus susceptibles d'avoir une déviation plus importante que des implants placés à la mandibule en secteur plus antérieur à gauche.

L'étude n°17 décrit plus de déviation à la mandibule qu'au maxillaire ; et montre au maxillaire une déviation plus importante en postérieur gauche.

Comparaison de la précision d'un guide statique selon le type d'implant

L'étude n°14 (54) explique qu'en chirurgie guidée statique, les implants plus courts et de diamètre plus petit sont plus susceptibles d'être déviés par rapport à la planification comparément à des implants plus longs et plus larges.

2. Discussion sur la précision en chirurgie guidée :

Idéalement, pour répondre aux exigences cliniques un système de guide devrait présenter une déviation entre 0.5 et 1.5 mm. Plus la procédure chirurgicale est complexe, plus l'écart à la planification devrait être élevé. La littérature semble indiquer qu'il faille accepter une imprécision dynamique inévitable de 2.0 mm, et ce peu importe le type de guidage. (2,35,57–59)

Sources d'erreur

La déviation implantaire en chirurgie guidée est la somme de potentielles erreurs lors de l'acquisition de l'imagerie (qualité, mouvement du patient), son exploitation (notamment la concaténation entre imagerie et site chirurgical), la conception du guide, le support du guide, le niveau du guidage lors de l'ostéotomie et de la pose implantaire, et l'erreur liée à l'opérateur. Certaines erreurs peuvent être liées à l'évaluation post-opératoire de la précision. (60–62,51,63,22,36,19)

Il y a un manque d'homogénéité dans les revues systématiques lié à l'utilisation de différents guides et séquences implantaires, ce qui limite la capacité à extrapoler les résultats. (22,49)

Comparaison à la précision obtenue in vitro

Les études in vitro effectuées sur des cadavres ou des mannequins, présentent ainsi un meilleur accès, un meilleur contrôle visuel, une absence de mouvement du patient, une absence de tissus mous, de salive, de sang. Ces éléments peuvent influencer les conditions chirurgicales et donc la précision du placement implantaire. C'est donc sans surprise que l'on peut s'attendre à une précision supérieure décrite dans les études in vitro, et de la même manière dans les études systématiques traitant de ces dernières. (51,64)

Densité osseuse

La densité osseuse peut avoir une influence sur la précision en chirurgie guidée La préparation du site implantaire dans les zones avec une asymétrie de la densité osseuse pourrait entraîner une déviation du foret vers 'chemin de moindre résistance'. Suite à des extractions, lorsque qu'il y a un septum inter radiculaire dense, il serait plus judicieux d'attendre 3 mois après l'avulsion de manière à obtenir une cicatrisation osseuse convenable avec une homogénéité/symétrie de la densité osseuse. (42,49–51,65–67)

Erreur en navigation statique

La navigation statique est considérée comme une méthode très précise, cependant de nombreuses études sont biaisées car elles évoquent des cas unitaires avec un support dentaire idéal de chaque côté de l'édentement. Nous savons qu'en chirurgie guidée statique, plus l'édentement est limité, meilleure est la précision. (21,22,42,53–55,68)

La source d'erreur la plus importante en navigation statique serait les erreurs intrinsèques telles qu'un guide inadapté à l'arcade, une fracture du guide ou une inadaptation des douilles et des forets utilisés. Parmi les autres sources d'erreurs, on peut citer celles liées à la chirurgie, comme un mauvais positionnement du guide ou l'interférence de l'arcade antagoniste avec les instruments lors du forage ou de l'implantation. (22,61,69)

La stabilité du guide est un facteur crucial lors d'une pose implantaire. Les revues systématiques de la littérature suggèrent que les guides dento-portés soient plus précis. (70–73)

Les guides à support muqueux peuvent être mal positionnés à cause du gonflement des tissus mous avec l'anesthésie ou à cause de la résilience des muqueuses. (21,74–76)

Les guides statiques stabilisés par des mini implants semblent offrir une précision supérieure à celle obtenue avec les autres types de soutien des guides. (21,57,72,77)

Erreur en navigation dynamique

Tous les systèmes de navigation dynamique ne sont pas équivalents. (63)

La navigation dynamique permet d'éliminer les échecs liés à une fracture ou à un mauvais positionnement d'un guide physique. (36)

Parmi les sources d'erreurs per-opératoires en navigation dynamique, il est possible de citer un déplacement des marqueurs sur l'arcade ou sur l'instrument, une calibration erronée ou une manipulation imprécise de l'instrument. (63)

Les erreurs du système de suivi en temps réel sont appelées TRE (target registration error). Les TRE correspondent à un écart entre l'imagerie et la réalité clinique. Les TRE sont au minimum de 0.4 mm en se rapprochant le plus possible de l'arcade et augmentent en s'éloignant. Ces erreurs peuvent rester sous 0.5 mm avec les systèmes dento-portés. (19,78,79)

La précision en navigation dynamique dépend notamment de la position, du type et du nombre de marqueurs utilisés. Il est essentiel d'assurer la précision à chaque étape pour éviter une accumulation d'erreurs. (22,63)

Des erreurs dans le positionnement de la pointe du foret sur le CBCT peuvent apparaître à chaque étape, à cause d'assomptions sur la géométrie de la réalité faite par le logiciel de modélisation ou du bruit enregistré par les capteurs ou d'écart à la concaténation à cause de changements de types mécaniques, thermiques ou optiques depuis la dernière concaténation. Les erreurs de placement ou d'adaptation de la gouttière lors de l'imagerie ou de l'alignement engendrent une perte de précision du système. De plus, il ne faut pas d'interférence entre marqueur et arcade en occlusion ou marqueur et instrument (36,38,41)

Le succès de la transcription de la position implantaire virtuelle chirurgicalement repose sur la coordination entre l'œil et la main du chirurgien pour interpréter les données de l'écran de navigation tout en les retranscrivant lors du forage et de l'implantation en faisant appel à la motricité fine. (19,36,80) Le manque de précision au point d'entrée en secteur postérieur pourrait être due à une visibilité amoindrie et à la zone aveugle pour le chirurgien du côté mésial de l'édentement. Or la navigation dynamique repose sur un contrôle visuel. De plus, le mouvement de rotation de la main humaine et du poignet pourrait également influencer la déviation en navigation dynamique. (49)

C. Avantages et inconvénients de la chirurgie guidée statique et dynamique

La navigation est utilisée en implantologie pour plusieurs raisons (36,42,49,81) :

- effectuer la retranscription de la planification sur l'arcade et bénéficier d'une phase prothétique plus aisée grâce à des implants mieux placés
- éviter d'importantes structures anatomiques comme le nerf alvéolaire inférieur et réduire les risques iatrogènes ;
- minimiser les lambeaux et être moins invasif ;
- placer précisément plusieurs implants en les angulant et en les espaçant correctement ;
- pour la pose d'implant unitaire malgré un accès réduit lorsque les besoins esthétiques sont élevés, tout en réduisant l'inconfort, le temps au fauteuil, les comorbidités (infection, saignement) et en permettant une meilleure cicatrisation
- améliorer l'ergonomie pour le praticien et réduire le stress per-opérateur

1. Temps global

La production des guides statiques nécessite du temps et du travail au laboratoire de prothèse (quelques jours généralement), ce qui n'est pas compatible avec les cabinets à forte charge de travail. La navigation dynamique permet à l'implantologue d'évaluer la possibilité de réhabilitation implantaire, de réaliser l'imagerie du patient, de planifier la position implantaire et d'effectuer la chirurgie implantaire le même jour sans délai. (36,41,45,49,51,81)

2. Temps chirurgical

La chirurgie implantaire assistée par ordinateur permet une réduction du temps chirurgical, que ce soit en statique ou en dynamique. (36,81)

Kaewsiri et al (49) en 2019 décrivent qu'il n'y a statistiquement pas de différence de temps chirurgical pour la pose implantaire en statique et en dynamique, qu'il y ait, une levée de lambeau ou un comblement associé à l'implantation, ou non.

Cependant, un inconvénient considérable de la navigation dynamique est le temps de "registration" ou appariement qui peut prendre 2 à 5 minutes ; alors que le guide offre un guidage mécanique des forets et de l'implant sans temps additionnel pour effectuer des ajustements.

Toutefois, l'alignement à l'aide de marqueurs anatomiques permet un gain de temps. De plus, certains systèmes ne nécessitent pas d'appariement pour chaque nouveau foret. (22,40,44,49)

L'expérience de l'opérateur avec chaque système influence sûrement le temps consacré à la chirurgie ; le développement de systèmes optimisés et l'utilisation répétée de tels systèmes devraient permettre de réduire ce temps. (21,52)

3. Courbe d'apprentissage

La précision du placement implantaire en utilisant un guide statique n'est pas significativement différente entre les praticiens débutants et confirmés. Les erreurs de positionnement du guide muco-supporté sont plus accrues chez les praticiens débutants. Il y aurait cependant une courbe d'apprentissage avec les guides statiques, qui est diminuée en observant un praticien expérimenté utiliser des guides statiques. (82–84)

Il existe une courbe d'apprentissage pour maîtriser la navigation dynamique ; le praticien progresse jusqu'à ce que sa courbe de progression forme un plateau. Il y a une influence de l'expérience de l'opérateur sur sa courbe d'apprentissage ; il est possible de réduire sa courbe d'apprentissage à l'aide de la simulation clinique et d'entraînement sous la supervision d'un praticien maîtrisant la navigation dynamique. Il faudrait entre 20 et 50 poses implantaires avant que les différences de précision entre les chirurgiens deviennent minimales. (36,42,51,85–87)

4. Kits implantaires

En navigation statique, il faut avoir un kit implantaire spécifique pour le guide et parfois une fixation particulière, ce qui occasionne des coûts, du temps et du travail au laboratoire de prothèse. La navigation dynamique repose sur des systèmes open-source ; la chirurgie peut être effectuée avec les instruments utilisés en routine et les kits de forages de plusieurs groupes implantaires. Il y a une indépendance vis-à-vis des séquences implantaires. De plus la taille de l'implant n'est pas limitée en navigation dynamique ; alors qu'elle l'est en chirurgie guidée statique. (2,36,49,88)

5. Visibilité

Quand un guide statique est utilisé, la présence du guide peut limiter la visualisation de la position de l'implant vis-à-vis de la crête osseuse, on parle de « blind technique ». Avec la navigation dynamique, il est toujours possible de voir la position de l'implant sur l'écran ou en bouche, sans interférence du guide. En plus de permettre une vision directe du site opératoire, la navigation dynamique offre une bonne perception de la qualité osseuse lors du forage (similaire à la méthode à main levée). Il est également possible de s'assurer de la précision du système avant et pendant l'ostéotomie, ce qui est n'est pas faisable avec un guide statique. En effet, on peut évaluer cela rapidement en touchant avec le bout du foret des zones anatomiques visibles et en contrôlant la représentation sur l'imagerie. Il est donc plus simple de faire du full-guided en navigation dynamique. (2,5,36,44,61)

6. Posture et plateau technique

La navigation dynamique apporte une amélioration de la posture du clinicien du fait d'une meilleur visibilité grâce à l'écran. Toutefois, il faut prêter simultanément attention à l'écran et à la bouche du patient. De plus la navigation dynamique nécessite un champ libre entre les caméras et les capteurs. Le plateau technique requis pour la navigation dynamique occupe plus d'espace que celui nécessaire pour la chirurgie guidée statique. (5,38,49,55,89,90)

7. Alignement

L'utilisation d'un guide en chirurgie guidée statique ou de marqueurs sur une gouttière en navigation dynamique présente plusieurs inconvénients, notamment le temps de préparation de la gouttière thermoformée, l'acquisition des compétences nécessaire pour préparer la gouttière et la nécessité d'un CBCT gouttière en place. L'alignement à l'aide de marqueurs anatomiques est plus pratique lors de sa mise en pratique clinique, cela permet un protocole complètement digital sans gouttière préformée. (38,40,41,79)

8. Flexibilité dans le plan de traitement

En chirurgie guidée statique, la planification ne peut pas être changée facilement. Il ne peut pas y avoir de changement d'angulation, de taille, de profondeur ou d'implant. L'implant choisi ne peut pas facilement être changé. (5,61)

La chirurgie guidée dynamique présente l'avantage de pouvoir modifier la planification en per-opératoire pour s'adapter au retour tactile ou à des complications per-opératoires pour s'adapter au retour tactile ou à des complications per-opératoires. La décision finale concernant la profondeur est souvent prise lors de la chirurgie ; l'écart de profondeur avec la planification serait la déviation la moins atténuée par les guides ; la possibilité de changer la profondeur lors de l'intervention est un avantage qui est facilement ignoré. (2,5,10,36,42,44,49,81)

9. Coût lié à l'investissement initial

Le coût d'achat élevé des systèmes de navigation dynamique est également un facteur important à prendre en considération. Pour passer de la chirurgie à main levée planifiée à la chirurgie guidée statique, il faut seulement se procurer un kit implantaire spécifique et de quoi réaliser des empreintes pour le laboratoire de prothèses. Un guide chirurgical serait disponible à un prix moins élevé que la navigation dynamique pour le praticien comme pour les patients. La chirurgie dynamique serait donc un investissement plus important sur le court terme. (2,21,49,51)

10. Coûts liés à l'utilisation du système

La production des guides statiques nécessite du temps et des coûts, ce qui n'est pas compatible avec les cabinets à forte charge de travail. La possibilité de réaliser planification et chirurgie le même jour avec les systèmes dynamiques engendrerait des économies. En chirurgie guidée dynamique, les coûts per-opératoires sont théoriquement plus bas. L'absence de coût de fabrication du guide en navigation dynamique et l'utilisation répétée de la navigation permettrait une économie sur le moyen ou long terme. La gouttière support de marqueurs génère cependant un coût pour le patient comme le praticien, dont on peut s'affranchir avec les marqueurs anatomiques. (5,36,40,41,44,45,51)

11. Le patient

Parmi les avantages de la navigation dynamique, on peut citer la réduction des comorbidités en augmentant la fréquence des chirurgies sans levée de lambeau. La chirurgie sans lambeau augmente significativement le confort du patient en diminuant les douleurs post-opératoires ainsi que les œdèmes au niveau du site chirurgical. De plus, l'utilisation d'antalgique est réduite suite à ces chirurgies moins invasives. (42,44,81)

La chirurgie guidée statique peut également permettre de se passer de lambeaux, toutefois c'est impossible lorsque le guide est à soutien osseux. De plus, si le guide est stabilisé par mini implants, alors le système de guide est plus invasif. (2,49,81)

La navigation dynamique permettrait aussi d'éviter la surchauffe des rotatifs utilisés liée à l'accès restreint du spray d'eau avec les guides statiques. Il y aurait ainsi moins de lésions osseuses liées à une surchauffe. (36,49,61,81,91)

Tableau 13 : Résumé des avantages et inconvénients des guides statiques et dynamiques (33)

	1.Guide Statique	2.Guide dynamique
Délai d'anticipation de la chirurgie	8J à 21J	10 à 20 minutes
Influence de la qualité de fabrication sur la précision	Importante	Sans influence
Accès visuel au champ opératoire	Faible ou nul	Total
Sensibilité tactile de l'opérateur	Dégradée	Totale
Temps mise en place du matériel (guide/tag)	Appui dentaire: 5' Appui muqueux: 10' Appui osseux: 15'	1' à 5'
Dimension du lambeau pour un appui osseux	Importante	Sans influence
Accessibilité en zone molaire et rétro molaire	Très délicate	Aisée
Influence de l'ouverture buccale	Problématique	Sans influence
Altération de l'irrigation	Importante	Sans influence
Nécessite de trousse de chirurgie spécifique	Oui	Non
Ancillaire de chirurgie spécifique (C/A)	Oui	Non avec Navident Oui avec X-guide
Traçabilité vidéo des interventions	Non	Oui avec Navident Non avec X-guide
Comparaison post-op planification/position implant	Non	Oui avec Navident Non avec X-guide
Tarif logiciel de planification	0€ à 12000€	36900€ (matériel complet)
Prix en rapport avec le nb d'implants	Oui	Non
Prix par intervention (base de calcul : 50 implants/an sur 5ans)	180€ à 600€	190 €
Courbe d'apprentissage au logiciel de planification	Oui	Oui
Courbe d'apprentissage lors de la chirurgie	Faible	Importante
Adaptation à des aléas per-chirurgicaux	Impossible	Aisée

D. Indications des différentes techniques

1. En fonction des restaurations en bouche

L'utilisation de la chirurgie guidée n'est pas possible si les marqueurs ou le guide ne peuvent pas être dans une position stable sur l'arcade ou qu'un changement en bouche a eu lieu depuis le CBCT pré-opératoire (couronne provisoire, fracture, version, égrèssement, etc). (5)

La qualité et la définition du CBCT scan a un impact majeur sur l'alignement ; s'il y a un nombre important de restaurations métalliques sur une arcade, alors l'utilisation des cuspidés pour l'alignement n'est généralement pas un bon choix. (40)

Pour l'alignement avec des marqueurs anatomiques, il n'est pas évident d'utiliser :

- les éléments radio-clairs (notamment certaines céramiques),
- les dents dont la mobilité n'est pas physiologique,
- ou les restaurations à base de résines composites en contact des tissus mous ou de la salive. (38)

2. Édentement encastré de faible étendue

En présence d'un espace interdentaire limité, soit un édentement unitaire de faible étendue (par exemple un site d'incisive mandibulaire), il est possible d'être guidée pour la pose complète avec la navigation dynamique. Ce n'est pas le cas en chirurgie guidée statique où la taille des forets sera limitée physiquement par le guide additionnellement à la taille de l'édentement. (36,41,49,81)

3. Limitation d'ouverture buccale et zones postérieures

Les dimensions des guides statiques font que leur utilisation est proscrite au niveau des deuxième molaires ou chez les patients avec une limitation d'ouverture buccale. La navigation dynamique peut être utilisée dans les régions des deuxième molaires et chez les patients présentant une limitation d'ouverture buccale puisque la longueur des instruments n'est pas majorée. Le praticien bénéficie d'une ergonomie augmentée puisqu'il est guidé malgré un espace inter-occlusal limité sans que le guide prenne physiquement de place en bouche. (2,5,36,41,44,49,81)

Dans les cas où il n'y a pas suffisamment de hauteur d'os au niveau du maxillaire postérieur, la navigation dynamique peut être utilisée pour placer les implants inclinés et éviter d'atteindre les sinus maxillaires et ne pas avoir à effectuer de greffe osseuse. (52)

4. Site implantaire

Il a été décrit précédemment que le site implantaire n'influence pas la précision en navigation dynamique, alors qu'une influence significative sur la précision a été mise en évidence lors de l'utilisation d'un guide statique.

Il est possible de suggérer l'utilisation préférentielle d'un type de guide en fonction de l'étendue de l'édentement et de sa localisation.

En secteur incisivo-canin, au maxillaire un système statique sera utilisé autant qu'un système dynamique, alors qu'à la mandibule, la chirurgie guidée dynamique sera plus souvent employée.

Au niveau des prémolaires, la chirurgie guidée sera indifféremment statique ou dynamique.

En secteur postérieur, la navigation dynamique sera vraisemblablement plus facilement mise en œuvre.

5. En pratique

Plusieurs auteurs déclarent que la chirurgie guidée devrait être le gold standard plutôt que la pose à main levée lorsqu'un placement parfait de l'implant est nécessaire. Nous savons que les guides statiques ne sont pas utilisés pour chaque cas implantaire mais seulement pour les cas les plus complexes et que la chirurgie guidée dynamique est encore assez peu répandue.

La chirurgie guidée, statique ou dynamique, peut être indiquée pour la pose de plusieurs implants supports d'une même prothèse.

Le choix de la technique utilisée dépendant de la préférence du praticien, de l'anatomie du patient, ainsi que des indications et limitations de chaque système. (5,22,55,56)

L'utilisation des guides statiques ou dynamiques ne dispense pas d'une formation sérieuse en implantologie à main levée. Cette formation à main levée est indispensable et doit être réalisée dans le cadre d'un D.U d'implantologie proposés par les Universités Françaises ou à défaut auprès d'institutions de formation privée. (33)

Le praticien expérimenté est en mesure de décider pour chaque cas, s'il souhaite s'aider de la navigation ou bien se contenter de la planification pour sa pose implantaire.

En 2022, Ochandiano et al (2) ont les premiers, combiné navigations statique et dynamique dans un protocole qui inclut planification virtuelle, impression 3D, navigation (statique et/ou dynamique), et comparaison à la planification à l'aide de la réalité augmentée. La technique de navigation utilisée a été individualisée pour chaque patient, statique conventionnelle, dynamique seule, forage en statique et pose implantaire en dynamique, etc. La navigation dynamique permet les modifications en per-opérateur, le guide statique sert de marqueur et permet aussi le guidage. La différence du guide statique utilisé par rapport à un guide statique conventionnel réside dans le fait qu'un degré de liberté pour les forets a été aménagé.

V. Conclusion

La navigation dynamique atteint un niveau de précision comparable à celui de la navigation statique. Cependant, les études cliniques et in vitro disponibles présentent de grands écarts les unes par rapport aux autres. Les études sont difficilement comparables car chaque système utilise des structures de références différentes. De nouvelles études devraient déterminer si les écarts observés sont dûs aux systèmes de navigation dynamique utilisés.

Des études multicentriques avec de plus grands échantillons devraient être réalisées et aborder notamment les résultats cliniques à long terme, le temps opératoire, ou la mise en charge immédiate chez les édentés complets. Devraient aussi être réalisées des études traitant de l'analyse des coûts, du rapport qualité-prix, ainsi que de l'influence de l'expérience de l'opérateur et de la courbe d'apprentissage entre les systèmes statiques et dynamiques. (21,46,47,49,51,52,55)

La chirurgie guidée (statique ou dynamique) permet aux implantologues de poser avec précision leurs implants.

A l'avenir, la chirurgie guidée deviendra peut-être l'outil de référence en vue de reproduire cliniquement la planification.

VI. Annexes

A. Etudes

Etude n°1 (42)

- **Titre** : Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation
- **Auteurs** : Michael S Block, Robert W Emery, Kathryn Lank, James Ryan
- **Année de publication** : 2017
- **Type d'étude** : prospective
- **Nombre de patients** : 100 (39% d'hommes, âge moyen 58 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 3
- **Type d'édentement** : partiel
- **Nombre de cas** : 100
- **Types de procédures** : navigation dynamique (80 cas), navigation mentale (20 cas)
- **Objectif et hypothèses de départ** : tester les hypothèses suivantes :
 - La précision du système de navigation dynamique utilisé est similaire à celle d'un guide statique
 - La précision du système de navigation dynamique utilisé est similaire à celle de la navigation mentale
 - Après 20 cas les différences de précision entre les praticiens deviennent minimales
- **Résultats** : précision similaire à celle des guides statiques mais supérieure à celle de à main levée ; les différences de précision entre les praticiens deviennent minimales après 20 cas
- **Biais** : l'auteur principal est rémunéré par X-Nav Technologies Inc, la cohorte représente la patientèle de chaque chirurgien et donc des échantillons différents. Le praticien n°2 a déjà une expérience de la navigation avec un autre système. Le praticien n°3 ne pose que 15 implants.

Etude n°2 (5)

- **Titre** : Implant Placement Is More Accurate Using Dynamic Navigation
- **Auteurs** : Michael S Block, Robert W Emery, Daniel R Cullum, Ali Sheikh
- **Année de publication** : 2017
- **Type d'étude** : prospective
- **Nombre de patients** : 478 (50,6% d'hommes, âge moyen 59 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 4
- **Type d'édentement** : partiel
- **Nombre d'implants** : 714
- **Types de procédures** : navigation dynamique complète (219) et partielle (373), navigation mentale (122 implants)
- **Objectif et hypothèse de départ** : mesurer et comparer la précision du système de navigation dynamique utilisé avec celle obtenue lors de la pose à main levée. H0 = précision supérieure à celle de à main levée
- **Résultat** : précision du système de navigation dynamique utilisé supérieure à celle de à main levée
- **Biais** : l'auteur principal est rémunéré par X-Nav Technologies Inc, la cohorte représente la patientèle de chaque chirurgien et donc des échantillons différents. 2 jours de formation pour les opérateurs.

Etude n°3 (36)

- **Titre** : Accuracy of a Dynamic Dental Implant Navigation System in a Private Practice
- **Auteurs** : Luigi V Stefanelli, Bradley S DeGroot, David I Lipton, George A Mandelaris
- **Année de publication** : 2019
- **Type d'étude** : rétrospective
- **Nombre d'arcades** : 89
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : partiel (61) ou complet (28)
- **Nombre d'implants** : 231
- **Types de procédures** : navigation dynamique complète et partielle
- **Objectifs** : évaluer la précision du système de navigation dynamique utilisé dans un échantillon large d'une clientèle de cabinet libéral. Evaluer les impacts de l'utilisation complète ou partielle du système de navigation dynamique, de l'arcade, du sextant, ainsi que du type d'édentement et de l'expérience de l'opérateur. Le nombre précis, l'âge et le sexe des patients ne sont pas détaillés.
- **Résultats** : excellente précision du système de navigation dynamique utilisé, impact significatif de l'expérience du praticien sur la précision. Peu de différences entre édenté complet et partiel. Pas de différence significative entre maxillaire et mandibule ou entre les différents sextants.
- **Biais** : les auteurs ont reçu des produits de la part de ClaroNav Inc., ils déclarent ne pas s'en être servi pour cette étude. Le protocole a été adapté pour 7 cas d'édentement complet. On ne retrouve pas l'impact de l'utilisation partielle ou complète dans les résultats. Un seul praticien pose les implants.

Etude n°4 (49)

- **Titre** : The accuracy of static vs. dynamic computer-assisted implant surgery in single tooth space: A randomized controlled trial
- **Auteurs** : Dechawat Kaewsiri, Soontra Panmekiate, Keskanya Subbalekha, Nikos Mattheos, Atiphan Pimkhaokham
- **Année de publication** : 2019
- **Type d'étude** : clinique randomisée
- **Nombre de patients** : 60 (26.7% d'hommes, âge moyen 55 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : partiel unitaire
- **Nombre d'implants** : 60
- **Types de procédures** : navigation statique (30) et navigation dynamique (30)
- **Objectif** : comparer la précision du positionnement implantaire en chirurgie guidée statique et dynamique
- **Résultat** : précision similaire entre navigation statique et dynamique
- **Biais** : risque de biais faible à modéré sur l'échelle Risk of bias de Cochrane. CBCT post-opératoire 1 semaine après la pose.

Etude n°5 (50)

- **Titre** : Accuracy of dental implant placement via dynamic navigation or the freehand method: A split-mouth randomized controlled clinical trial
- **Auteurs** : Ceyda Aktolun Aydemir, Volkan Arisan
- **Année de publication** : 2019
- **Type d'étude** : clinique randomisée
- **Nombre de patients** : 32 puis 30 (21.9% d'hommes, âge moyen 48.4 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : partiel bilatéral postérieur
- **Nombre d'implants** : 86 (initialement 92)
- **Types de procédures** : navigation dynamique complète (43), navigation mentale (43)
- **Objectif** : mesurer et comparer la précision du système de navigation dynamique utilisé avec celle obtenue lors de la pose à main levée.
- **Résultat** : précision du système de navigation dynamique utilisé supérieure à celle de à main levée
- **Biais** : risque de biais faible à modéré sur l'échelle Risk of bias de Cochrane. 2 patients (6 implants) perdus de vue. Un seul praticien pose les implants. CBCT post-opératoire après 3 mois.

Etude n°6 (38)

- **Titre** : Accuracy of a Novel Trace-Registration Method for Dynamic Navigation Surgery
- **Auteurs** : Luigi V Stefanelli, George A Mandelaris, Bradley S DeGroot, Gianluca Gambarini, Francesca De Angelis, Stefano Di Carlo
- **Année de publication** : 2020
- **Type d'étude** : rétrospective
- **Nombre de patients** : 59
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : partiel
- **Nombre d'implants** : 136
- **Type de procédure** : navigation dynamique
- **Objectifs** : évaluer la précision du système de navigation dynamique en utilisant la Trace Registration pour l'alignement, comparer cette précision avec celle obtenue en réalisant l'alignement avec des marqueurs sur une gouttière, mesurer l'impact du nombre de dents utilisées sur la précision du système de navigation dynamique
- **Résultats** : la trace registration est au moins aussi précise que l'utilisation de marqueurs sur une gouttière, utiliser 5-6 dents donne une meilleure précision qu'utiliser 3-4 dents
- **Biais** : les auteurs ont reçu des produits de la part de ClaroNav Inc., ils déclarent ne pas s'en être servi pour cette étude. Différents scanners CBCT ont été utilisés de manière non standardisée. L'âge et le sexe des patients ne sont pas détaillés.

Etude n°7 (41)

- **Titre** : Accuracy of Dynamic Navigation System Workflow for Implant Supported Full Arch Prosthesis: A Case Series
- **Auteurs** : Luigi V Stefanelli, George A Mandelaris, Alessio Franchina, Nicola Pranno, Michele Pagliarulo, Francesca Cera, Fabio Maltese, Francesca De Angelis, Stefano Di Carlo
- **Année de publication** : 2020
- **Type d'étude** : cas cliniques
- **Nombre de patients** : 13 (54% d'hommes, âge moyen 68 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : complet
- **Nombre d'implants** : 77
- **Types de procédures** : navigation dynamique
- **Objectifs et hypothèse de départ** : mesurer l'impact du nombre de dents utilisées sur la précision du système de navigation dynamique, évaluer la précision du système de navigation dynamique en utilisant la Trace Registration pour l'alignement. H0 = pas de différence de précision entre l'alignement avec 3-4 dents et l'alignement avec 5-6 dents
- **Résultats** : la trace registration est une méthode précise, utiliser 5-6 dents donne une meilleure précision qu'utiliser 3-4 dents
- **Biais** : Temps de suivi court (4 mois) pour les prothèses supra-implantaires. Citations d'autres études de l'auteur principal. Un seul praticien pose les implants. Les implants et pièces prothétiques de cette étude ont été fournis par A-Z Implant.

Etude n°8 (51)

- **Titre** : Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guide for dental implant placement
- **Auteurs** : Dong Wu, Lin Zhou, Jin Yang, Bao Zhang, Yanjun Lin, Jiang Chen, Wenxiu Huang, Yonghui Chen
- **Année de publication** : 2020
- **Type d'étude** : rétrospective
- **Nombre de patients** : 54 (59% d'hommes, âge moyen 37 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 3
- **Type d'édentement** : partiel
- **Nombre d'implants** : 95
- **Types de procédures** : navigation statique (57) et navigation dynamique (38)
- **Objectifs** : comparer la précision du système de navigation dynamique avec la navigation statique, évaluer l'impact de l'expérience du chirurgien ou du site implantaire sur la précision
- **Résultats** : précision similaire entre navigation statique et dynamique, pas d'influence du site implantaire sur la précision, pas d'influence de l'expérience du praticien une fois le système de navigation dynamique maîtrisé
- **Biais** : biais de sélection, échantillon trop faible

Etude n°9 (22)

- **Titre** : Comparison of the accuracy of implant position for two-implants supported fixed dental prosthesis using static and dynamic computer-assisted implant surgery: A randomized controlled clinical trial
- **Auteurs** : Paweena Yimarj, Keskanya Subbalekha, Kanit Dhanesuan, Kiti Siriwatana, Nikos Mattheos, Atiphan Pimkhaokham
- **Année de publication** : 2020
- **Type d'étude** : clinique randomisée
- **Nombre de patients** : 30 (23% d'hommes, âge moyen 60 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : partiel
- **Nombre d'implants** : 60
- **Types de procédures** : navigation statique (30) et navigation dynamique (30)
- **Objectifs** : comparer la précision du système de navigation dynamique avec la navigation statique, comparer le parallélisme entre deux implants posés en navigation statique ou dynamique
- **Résultats** : précision similaire entre navigation statique et dynamique pour la pose et le parallélisme
- **Biais** : Un seul praticien pose les implants.

Etude n°10 (52)

- **Titre** : Accuracy of intentionally tilted implant placement in the maxilla using dynamic navigation: a rétrospective clinical analysis
- **Auteurs** : T Meng, X Zhang
- **Année de publication** : 2021
- **Type d'étude** : rétrospective
- **Nombre de patients** : 12
- **Nombre d'opérateurs** : non renseigné
- **Type d'édentement** : partiel ou complet, postérieur
- **Nombre d'implants** : 48
- **Type de procédure** : navigation dynamique
- **Objectif** : évaluer la précision du positionnement d'implant incliné volontairement en secteur postérieur maxillaire
- **Résultat** : précision similaire implant incliné ou non
- **Biais** : le nombre d'opérateurs n'est pas renseigné. L'âge et le sexe des patients ne sont pas détaillés.

Etude n°11 (40)

- **Titre** : Comparison of the accuracy of two different dynamic navigation system registration methods for dental implant placement: A retrospective study
- **Auteurs** : Feifei Ma, Feng Sun, Tai Wei, Yu Ma
- **Année de publication** : 2022
- **Type d'étude** : rétrospective
- **Nombre de patients** : 64 (44% d'hommes, âge moyen 46.3 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 2
- **Type d'édentement** : partiel, secteurs antérieurs
- **Nombre d'implants** : 99
- **Type de procédure** : navigation dynamique
- **Objectifs** : évaluer la précision du positionnement d'implant avec alignement à l'aide d'une gouttière ou des cuspides, évaluer l'impact de l'implantation immédiate sur la précision de la navigation dynamique
- **Résultat** : pas de différence de précision selon la méthode d'alignement ou le moment d'implantation
- **Biais** : exclusion des secteurs postérieurs

Etude n°12 (21)

- **Titre** : Comparison of the accuracy of implant position among freehand implant placement, static and dynamic computer-assisted implant surgery in fully edentulous patients: a non-randomized prospective study
- **Auteurs** : S Jaemsuwan, S Arunjarosuk, B Kaboosaya, K Subbalekha, N Mattheos, A Pimkhaokham
- **Année de publication** : 2022
- **Type d'étude** : prospective
- **Nombre de patients** : 13 (69% d'hommes, âge moyen 66 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : complet
- **Nombre d'implants** : 60
- **Types de procédures** : navigation mentale, navigation statique et navigation dynamique
- **Objectif** : évaluer la précision du positionnement implantaire en navigation mentale, statique et dynamique chez des patients édentés complets
- **Résultats** : précision de la navigation dynamique similaire à celle de la navigation statique et supérieure à celle de la navigation mentale
- **Biais** : échantillon faible, attribution des patients à un protocole en fonction du nombre d'implants nécessaires. CBCT post-opératoire 1 semaine après la pose.

Etude n°13 (53)

- **Titre** : Accuracy of implant position when placed using static computer-assisted implant surgical guides manufactured with two different optical scanning techniques: a randomized clinical trial
- **Auteurs** : P. Kiatkroekkrai, C. Takolpuckdee, K. Subbalekha, N. Mattheos, A. Pimkhaokham
- **Année de publication** : 2020
- **Type d'étude** : clinique randomisée
- **Nombre de patients** : 47
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : unitaire encastré
- **Nombre d'implants** : 60
- **Type de procédure** : navigation statique
- **Objectif et hypothèse de départ** : comparer la précision du positionnement implantaire avec des guides statiques conçus à l'aide de deux protocoles différents (scan intra et extra oral). H0 = pas de différence
- **Résultat** : précision similaire avec les deux protocoles
- **Biais** : le type d'édentement choisi pour l'étude a limité la taille de l'échantillon. L'âge et le sexe des patients ne sont pas détaillés. Un seul praticien pose les implants.

Etude n°14 (54)

- **Titre** : The accuracy of single-tooth implants placed using fully digital-guided surgery and freehand implant surgery
- **Auteurs** : Palita Smitkarn, Keskanya Subbalekha, Nikos Mattheos, Atiphan Pimkhaokham
- **Année de publication** : 2019
- **Type d'étude** : clinique randomisée
- **Nombre de patients** : 52
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : unitaire encastré
- **Nombre d'implants** : 60
- **Types de procédures** : navigation statique (30) et navigation mentale (30)
- **Objectif et hypothèse de départ** : comparer la précision du positionnement implantaire à main levée et avec un guide statique chez des patients présentant un édentement unitaire encastré. H0 = précision de la navigation statique supérieure à celle de la navigation mentale
- **Résultat** : précision de la navigation statique supérieure à celle de la navigation mentale
- **Biais** : CBCT post-opératoire à 2 semaines, planification réalisée en sachant quelle navigation serait utilisée, randomisation. Le type d'édentement choisi pour l'étude a limité la taille de l'échantillon. L'âge et le sexe des patients ne sont pas détaillés. Un seul praticien pose les implants.

Etude n°15 (55)

- **Titre** : A randomized controlled study on the accuracy of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients
- **Auteurs** : Faris Younes, Jan Cosyn, Thomas De Bruyckere, Roberto Cleymaet, Eline Bouckaert, Aryan Eghbali
- **Année de publication** : 2018
- **Type d'étude** : clinique randomisée
- **Nombre de patients** : 32 (35% d'hommes, âge moyen 58 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : partiel
- **Nombre d'implants** : 71
- **Types de procédures** : navigation statique et navigation mentale
- **Objectifs** : comparer la précision du positionnement implantaire à main levée et avec un guide statique (fully guided) ; évaluer la précision de la pose implantaire après l'utilisation d'un guide dento-porté pour le forage pilote
- **Résultats** : la navigation statique (fully-guided) est plus précise que la navigation mentale. L'utilisation du guide uniquement pour le forage pilote est moins précise que la navigation statique mais plus précise que la navigation mentale.
- **Biais** : un guide n'a pas été reçu à temps, les valeurs ont été analysées en intention de traiter. Un patient a été perdu de vue. Biais de performance. Un seul praticien pose les implants. CBCT post-opératoire à 12 semaines.

Etude n°16 (56)

- **Titre** : Guidance means accuracy: A randomized clinical trial on freehand versus guided dental implantation
- **Auteurs** : Endre Varga Jr., Márk Antal, László Major, Ramóna Kiscsatári, Gábor Braunitzer, Jozsef Piffkó
- **Année de publication** : 2020
- **Type d'étude** : clinique randomisée
- **Nombre de patients** : 101 (49% d'hommes, âge moyen 41 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 2
- **Type d'édentement** : partiel
- **Nombre d'implants** : 207
- **Types de procédures** : navigation statique et navigation mentale
- **Objectif** : comparer la précision du positionnement implantaire à main levée et avec un guide statique utilisé pour le forage pilote, partiellement ou totalement
- **Résultat** : chaque degré de guidage en plus apporte une amélioration de la précision
- **Biais** : manque de puissance pour comparer toutes les techniques entre elles. Biais de performance. Utilisation des valeurs globales pour les déviations au point d'entrée et à l'apex (pas de composantes verticale et horizontale). Impossibilité de comparer la précision entre la pose au maxillaire et à la mandibule. CBCT post-opératoire 1 à 3 jours après la pose. Les kits chirurgicaux des implants ont été fournis par Alpha-Bio Tec., Ltd. et dicomLAB Dental, Ltd. L'auteur principal est employé par dicomLAB Dental, Ltd.

Etude n°17 (57)

- **Titre** : A randomized clinical trial comparing guided implant surgery (bone- or mucosa-supported) with mental navigation or the use of a pilot-drill template
- **Auteurs** : Marjolein Vercruyssen, Catherine Cox, Wim Coucke, Ignace Naert, Reinhilde Jacobs, Marc Quirynen
- **Année de publication** : 2014
- **Type d'étude** : clinique randomisée
- **Nombre de patients** : 59 (49% d'hommes, âge moyen 58 ans)
- **Nombre d'opérateurs** : 1
- **Type d'édentement** : complet
- **Nombre d'implants** : 311
- **Types de procédures** : navigation statique et navigation mentale
- **Objectif** : comparer la précision du positionnement implantaire en chirurgie guidée statique (muco et ostéo supporté) entre deux guides, la main levée et un guide pour le forage pilote chez l'édenté complet
- **Résultats** : les guides sont équivalents entre eux sauf le forage pilote qui est moindre. Les guides sont plus précis que la main levée.
- **Biais** : 3 implants ont été exclus de l'analyse. CBCT post-opératoire à 10 jours. Un seul praticien pose les implants.

B. Bibliographie

1. Brånemark PI, Zarb GA, Albrektsson T. Tissue-integrated Prosthesis: Osseointegration in Clinical Dentistry. Quintessence; 1985. 360 p.
2. Ochandiano S, García-Mato D, Gonzalez-Alvarez A, Moreta-Martinez R, Tousidonis M, Navarro-Cuellar C, et al. Computer-Assisted Dental Implant Placement Following Free Flap Reconstruction: Virtual Planning, CAD/CAM Templates, Dynamic Navigation and Augmented Reality. *Front Oncol.* 28 janv 2022;11:754943.
3. Henry PJ. A review of guidelines for implant rehabilitation of the edentulous maxilla. *J Prosthet Dent.* 1 mars 2002;87(3):281-8.
4. Cooper LF. Prosthodontic complications related to non-optimal dental implant placement. In: *Dental Implant Complications* [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2015 [cité 24 août 2022]. p. 539-58. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119140474.ch24>
5. Block MS, Emery RW, Cullum DR, Sheikh A. Implant Placement Is More Accurate Using Dynamic Navigation. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* juill 2017;75(7):1377-86.
6. Misch CE. *Contemporary Implant Dentistry.* Elsevier Health Sciences; 2007. 1121 p.
7. Katafuchi M, Weinstein BF, Leroux BG, Chen YW, Daubert DM. Restoration contour is a risk indicator for peri-implantitis: A cross-sectional radiographic analysis. *J Clin Periodontol.* févr 2018;45(2):225-32.
8. Staubli N, Walter C, Schmidt JC, Weiger R, Zitzmann NU. Excess cement and the risk of peri-implant disease - a systematic review. *Clin Oral Implants Res.* oct 2017;28(10):1278-90.
9. Schwarz F, Alcoforado G, Guerrero A, Jönsson D, Klinge B, Lang N, et al. Peri-implantitis: Summary and consensus statements of group 3. The 6th EAO Consensus Conference 2021. *Clin Oral Implants Res.* oct 2021;32 Suppl 21:245-53.
10. Kalaivani G, Balaji VR, Manikandan D, Rohini G. Expectation and reality of guided implant surgery protocol using computer-assisted static and dynamic navigation system at present scenario: Evidence-based literature review. *J Indian Soc Periodontol.* 2020;24(5):398-408.
11. Cavallaro J, Greenstein G. Angled implant abutments: a practical application of available knowledge. *J Am Dent Assoc* 1939. févr 2011;142(2):150-8.
12. Kao HC, Gung YW, Chung TF, Hsu ML. The influence of abutment angulation on micromotion level for immediately loaded dental implants: a 3-D finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants.* août 2008;23(4):623-30.
13. Buser D, Martin W, Belser UC. Optimizing esthetics for implant restorations in the anterior maxilla: anatomic and surgical considerations. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2004;19 Suppl:43-61.
14. Fortin T, Coudert JL, Champeboux G, Sautot P, Lavallée S. Computer-assisted dental implant surgery using computed tomography. *J Image Guid Surg.* 1995;1(1):53-8.
15. Davarpanah K, Demurashvili G, Daas M, Rajzbaum P, Capelle-Ouadah N, Szmukler-Moncler S, et al. [Computer-assisted implantology]. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* sept 2012;113(4):259-75.
16. BouSerhal C, Jacobs R, Quirynen M, van Steenberghe D. Imaging Technique Selection for the Preoperative Planning of Oral Implants: A Review of the Literature. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2002;4(3):156-72.

17. Guerrero ME, Jacobs R, Loubele M, Schutyser F, Suetens P, van Steenberghe D. State-of-the-art on cone beam CT imaging for preoperative planning of implant placement. *Clin Oral Investig.* mars 2006;10(1):1-7.
18. Dr Renaud Noharet - Cabinet de Chirurgie Dentaire — Dr Renaud Noharet- cabinet-dentiste-presquile-lyon [Internet]. Dr Renaud Noharet - Cabinet de Chirurgie Dentaire. [cité 29 déc 2022]. Disponible sur: <http://renaudnoharet.fr/p3371074/>
19. Widmann G, Bale RJ. Accuracy in computer-aided implant surgery--a review. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2006;21(2):305-13.
20. Gargallo-Albiol J, Barootchi S, Marqués-Guasch J, Wang HL. Fully Guided Versus Half-Guided and Freehand Implant Placement: Systematic Review and Meta-analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants.* déc 2020;35(6):1159-69.
21. Jaemsuwan S, Arunjaroensuk S, Kaboosaya B, Subbalekha K, Mattheos N, Pimkhaokham A. Comparison of the accuracy of implant position among freehand implant placement, static and dynamic computer-assisted implant surgery in fully edentulous patients: a non-randomized prospective study. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 23 juin 2022;S0901-5027(22)00220-X.
22. Yimarj P, Subbalekha K, Dhaneuan K, Siriwatana K, Mattheos N, Pimkhaokham A. Comparison of the accuracy of implant position for two-implants supported fixed dental prosthesis using static and dynamic computer-assisted implant surgery: A randomized controlled clinical trial. *Clin Implant Dent Relat Res.* déc 2020;22(6):672-8.
23. Réalité augmentée. In: Wikipédia [Internet]. 2022 [cité 29 déc 2022]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R%C3%A9alit%C3%A9_augment%C3%A9&oldid=195443641
24. Wu Y, Wang F, Fan S, Chow JKF. Robotics in Dental Implantology. *Oral Maxillofac Surg Clin N Am.* août 2019;31(3):513-8.
25. Ayoub A, Pulijala Y. The application of virtual reality and augmented reality in Oral & Maxillofacial Surgery. *BMC Oral Health.* 8 nov 2019;19(1):238.
26. Huang TK, Yang CH, Hsieh YH, Wang JC, Hung CC. Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry. *Kaohsiung J Med Sci.* 2018;34(4):243-8.
27. Vercruyssen M, van de Wiele G, Teughels W, Naert I, Jacobs R, Quirynen M. Implant- and patient-centred outcomes of guided surgery, a 1-year follow-up: An RCT comparing guided surgery with conventional implant placement. *J Clin Periodontol.* 2014;41(12):1154-60.
28. Mischkowski RA, Zinser MJ, Neugebauer J, Kübler AC, Zöller JE. Comparison of static and dynamic computer-assisted guidance methods in implantology. *Int J Comput Dent.* janv 2006;9(1):23-35.
29. Ruppin J, Popovic A, Strauss M, Spüntrup E, Steiner A, Stoll C. Evaluation of the accuracy of three different computer-aided surgery systems in dental implantology: optical tracking vs. stereolithographic splint systems. *Clin Oral Implants Res.* juill 2008;19(7):709-16.
30. Vercruyssen M, Fortin T, Widmann G, Jacobs R, Quirynen M. Different techniques of static/dynamic guided implant surgery: modalities and indications. *Periodontol 2000.* oct 2014;66(1):214-27.
31. Vercruyssen M, Jacobs R, Van Assche N, van Steenberghe D. The use of CT scan based planning for oral rehabilitation by means of implants and its transfer to the surgical field: a critical review on accuracy. *J Oral Rehabil.* juin 2008;35(6):454-74.

32. Lin CC, Wu CZ, Huang MS, Huang CF, Cheng HC, Wang DP. Fully Digital Workflow for Planning Static Guided Implant Surgery: A Prospective Accuracy Study. *J Clin Med*. 1 avr 2020;9(4):E980.
33. Les guides statiques VERSUS le guidage dynamique. PEUT-ON LES OPPOSER OU SONT-ILS COMPLÉMENTAIRES ? [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2022 [cité 20 nov 2022]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/guides-statiques-versus-guidage-dynamique-on-opposer-complementaires/>
34. Michael GABAI. DE LA CHIRURGIE GUIDÉE STATIQUE VERS LA CHIRURGIE NAVIGUÉE DYNAMIQUE [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2022 [cité 30 août 2022]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/de-la-chirurgie-guidee-statique-vers-la-chirurgie-naviguee-dynamique/>
35. Jiang T, Zhu M, Chai G, Li Q. Precision of a Novel Craniofacial Surgical Navigation System Based on Augmented Reality Using an Occlusal Splint as a Registration Strategy. *Sci Rep*. 24 janv 2019;9:501.
36. Stefanelli LV, DeGroot BS, Lipton DI, Mandelaris GA. Accuracy of a Dynamic Dental Implant Navigation System in a Private Practice. *Int J Oral Maxillofac Implants*. févr 2019;34(1):205-13.
37. Scheyer ET, Mandelaris GA, McGuire MK, AlTakriti MA, Stefanelli LV. Implant Placement Under Dynamic Navigation Using Trace Registration: Case Presentations. *Int J Periodontics Restorative Dent*. déc 2020;40(6):e241-8.
38. Stefanelli LV, Mandelaris GA, DeGroot BS, Gambarini G, De Angelis F, Di Carlo S. Accuracy of a Novel Trace-Registration Method for Dynamic Navigation Surgery. *Int J Periodontics Restorative Dent*. juin 2020;40(3):427-35.
39. Zhou W, Fan S, Wang F, Huang W, Jamjoom FZ, Wu Y. A novel extraoral registration method for a dynamic navigation system guiding zygomatic implant placement in patients with maxillectomy defects. *Int J Oral Maxillofac Surg*. janv 2021;50(1):116-20.
40. Ma F, Sun F, Wei T, Ma Y. Comparison of the accuracy of two different dynamic navigation system registration methods for dental implant placement: A retrospective study. *Clin Implant Dent Relat Res*. 10 mai 2022;
41. Stefanelli LV, Mandelaris GA, Franchina A, Pranno N, Pagliarulo M, Cera F, et al. Accuracy of Dynamic Navigation System Workflow for Implant Supported Full Arch Prosthesis: A Case Series. *Int J Environ Res Public Health*. 13 juill 2020;17(14):E5038.
42. Block MS, Emery RW, Lank K, Ryan J. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *Int J Oral Maxillofac Implants*. févr 2017;32(1):92-9.
43. Yves-Marie T. Intérêt clinique de la navigation implantaire dynamique : le point sur la littérature. Nantes: Université de Nantes; 2018.
44. Pellegrino G, Taraschi V, Andrea Z, Ferri A, Marchetti C. Dynamic navigation: a prospective clinical trial to evaluate the accuracy of implant placement. *Int J Comput Dent*. 2019;22(2):139-47.
45. Panchal N, Mahmood L, Retana A, Emery R. Dynamic Navigation for Dental Implant Surgery. *Oral Maxillofac Surg Clin N Am*. nov 2019;31(4):539-47.
46. Wei SM, Li Y, Deng K, Lai HC, Tonetti MS, Shi JY. Does machine-vision-assisted dynamic navigation improve the accuracy of digitally planned prosthetically guided immediate implant placement? A randomized controlled trial. *Clin Oral Implants Res*. 2 juin 2022;

47. Edelmann C, Wetzel M, Knipper A, Luthardt RG, Schnutenhaus S. Accuracy of Computer-Assisted Dynamic Navigation in Implant Placement with a Fully Digital Approach: A Prospective Clinical Trial. *J Clin Med.* 21 avr 2021;10(9):1808.
48. Niveau de preuve et gradation des recommandations de bonne pratique - État des lieux [Internet]. Haute Autorité de Santé. [cité 26 févr 2023]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/c_1600564/fr/niveau-de-preuve-et-gradation-des-recommandations-de-bonne-pratique-etat-des-lieux
49. Kaewsiri D, Panmekiate S, Subbalekha K, Mattheos N, Pimkhaokham A. The accuracy of static vs. dynamic computer-assisted implant surgery in single tooth space: A randomized controlled trial. *Clin Oral Implants Res.* juin 2019;30(6):505-14.
50. Aydemir CA, Arisan V. Accuracy of dental implant placement via dynamic navigation or the freehand method: A split-mouth randomized controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res.* mars 2020;31(3):255-63.
51. Wu D, Zhou L, Yang J, Zhang B, Lin Y, Chen J, et al. Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guide for dental implant placement. *Int J Implant Dent.* 24 nov 2020;6(1):78.
52. Meng T, Zhang X. Accuracy of intentionally tilted implant placement in the maxilla using dynamic navigation: a retrospective clinical analysis. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 21 sept 2021;S0901-5027(21)00324-6.
53. Kiatkroekkrai P, Takolpuckdee C, Subbalekha K, Mattheos N, Pimkhaokham A. Accuracy of implant position when placed using static computer-assisted implant surgical guides manufactured with two different optical scanning techniques: a randomized clinical trial. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 1 mars 2020;49(3):377-83.
54. Smitkarn P, Subbalekha K, Mattheos N, Pimkhaokham A. The accuracy of single-tooth implants placed using fully digital-guided surgery and freehand implant surgery. *J Clin Periodontol.* 2019;46(9):949-57.
55. Younes F, Cosyn J, De Bruyckere T, Cleymaet R, Bouckaert E, Eghbali A. A randomized controlled study on the accuracy of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. *J Clin Periodontol.* 2018;45(6):721-32.
56. Varga Jr. E, Antal M, Major L, Kiscsatári R, Braunitzer G, Piffkó J. Guidance means accuracy: A randomized clinical trial on freehand versus guided dental implantation. *Clin Oral Implants Res.* 2020;31(5):417-30.
57. Vercruyssen M, Cox C, Coucke W, Naert I, Jacobs R, Quirynen M. A randomized clinical trial comparing guided implant surgery (bone- or mucosa-supported) with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *J Clin Periodontol.* 2014;41(7):717-23.
58. Meyer U, Wiesmann HP, Runte C, Fillies T, Meier N, Lueth T, et al. Evaluation of accuracy of insertion of dental implants and prosthetic treatment by computer-aided navigation in minipigs. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 1 avr 2003;41(2):102-8.
59. Jiang W, Ma L, Zhang B, Fan Y, Qu X, Zhang X, et al. Evaluation of the 3D Augmented Reality-Guided Intraoperative Positioning of Dental Implants in Edentulous Mandibular Models. *Int J Oral Maxillofac Implants.* déc 2018;33(6):1219-28.
60. Mora MA, Chenin DL, Arce RM. Software tools and surgical guides in dental-implant-guided surgery. *Dent Clin North Am.* juill 2014;58(3):597-626.
61. Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res.* août 2005;16(4):495-501.

62. Raico Gallardo YN, da Silva-Olivio IRT, Mukai E, Morimoto S, Sesma N, Cordaro L. Accuracy comparison of guided surgery for dental implants according to the tissue of support: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res.* mai 2017;28(5):602-12.
63. 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.* mai 2021;25(5):2479-94.
64. Arisan V, Karabuda Z, Mumcu E, Ozdemir T. Implant Positioning Errors in Freehand and Computer-Aided Placement Methods: A Single-Blind Clinical Comparative Study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 4 févr 2013;28:190-204.
65. Kim YK, Park JY, Kim SG, Kim JS, Kim JD. Magnification rate of digital panoramic radiographs and its effectiveness for pre-operative assessment of dental implants. *Dento Maxillo Facial Radiol.* févr 2011;40(2):76-83.
66. Jacobs R, Quirynen M. Dental cone beam computed tomography: justification for use in planning oral implant placement. *Periodontol 2000.* oct 2014;66(1):203-13.
67. Ozan O, Orhan K, Turkyilmaz I. Correlation between bone density and angular deviation of implants placed using CT-generated surgical guides. *J Craniofac Surg.* sept 2011;22(5):1755-61.
68. Vercruyssen M, Coucke W, Naert I, Jacobs R, Teughels W, Quirynen M. Depth and lateral deviations in guided implant surgery: an RCT comparing guided surgery with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *Clin Oral Implants Res.* 2015;26(11):1315-20.
69. Cassetta M, Di Mambro A, Giansanti M, Stefanelli LV, Cavallini C. The intrinsic error of a stereolithographic surgical template in implant guided surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* févr 2013;42(2):264-75.
70. Schneider D, Marquardt P, Zwahlen M, Jung RE. A systematic review on the accuracy and the clinical outcome of computer-guided template-based implant dentistry. *Clin Oral Implants Res.* sept 2009;20 Suppl 4:73-86.
71. Marlière DAA, Demétrio MS, Picinini LS, De Oliveira RG, Chaves Netto HDM. Accuracy of computer-guided surgery for dental implant placement in fully edentulous patients: A systematic review. *Eur J Dent.* 2018;12(1):153-60.
72. Tahmaseb A, Wismeijer D, Coucke W, Derksen W. Computer Technology Applications in Surgical Implant Dentistry: A Systematic Review. *Int J Oral Maxillofac Implants.* janv 2014;29(Supplement):25-42.
73. Van Assche N, Vercruyssen M, Coucke W, Teughels W, Jacobs R, Quirynen M. Accuracy of computer-aided implant placement. *Clin Oral Implants Res.* oct 2012;23 Suppl 6:112-23.
74. Ersoy AE, Turkyilmaz I, Ozan O, McGlumphy EA. Reliability of Implant Placement With Stereolithographic Surgical Guides Generated From Computed Tomography: Clinical Data From 94 Implants. *J Periodontol.* 2008;79(8):1339-45.
75. Sun Y, Luebbbers HT, Agbaje JO, Schepers S, Politis C, Van Slycke S, et al. Accuracy of Dental Implant Placement Using CBCT-Derived Mucosa-Supported Stereolithographic Template. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2015;17(5):862-70.
76. Geng W, Liu C, Su Y, Li J, Zhou Y. Accuracy of different types of computer-aided design/computer-aided manufacturing surgical guides for dental implant placement. *Int J Clin Exp Med.* 2015;8(6):8442-9.

77. Arisan V, Karabuda CZ, Ozdemir T. Implant surgery using bone- and mucosa-supported stereolithographic guides in totally edentulous jaws: surgical and post-operative outcomes of computer-aided vs. standard techniques. *Clin Oral Implants Res.* sept 2010;21(9):980-8.
78. Casap N, Wexler A, Eliashar R. Computerized navigation for surgery of the lower jaw: comparison of 2 navigation systems. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* juill 2008;66(7):1467-75.
79. Luebbbers HT, Messmer P, Obwegeser JA, Zwahlen RA, Kikinis R, Graetz KW, et al. Comparison of different registration methods for surgical navigation in cranio-maxillofacial surgery. *J Cranio-Maxillo-fac Surg Off Publ Eur Assoc Cranio-Maxillo-fac Surg.* mars 2008;36(2):109-16.
80. Somogyi-Ganss E, Holmes HI, Jokstad A. Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system. *Clin Oral Implants Res.* août 2015;26(8):882-90.
81. Gargallo-Albiol J, Barootchi S, Salomó-Coll O, Wang HL. Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review. *Ann Anat Anat Anz Off Organ Anat Ges.* sept 2019;225:1-10.
82. Van de Wiele G, Teughels W, Vercruyssen M, Coucke W, Temmerman A, Quirynen M. The accuracy of guided surgery via mucosa-supported stereolithographic surgical templates in the hands of surgeons with little experience. *Clin Oral Implants Res.* déc 2015;26(12):1489-94.
83. Cassetta M, Bellardini M. How much does experience in guided implant surgery play a role in accuracy? A randomized controlled pilot study. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 1 juill 2017;46(7):922-30.
84. Rungcharassaeng K, Caruso JM, Kan JYK, Schutyser F, Boumans T. Accuracy of computer-guided surgery: A comparison of operator experience. *J Prosthet Dent.* sept 2015;114(3):407-13.
85. Jorba-García A, Figueiredo R, González-Barnadas A, Camps-Font O, Valmaseda-Castellón E. Accuracy and the role of experience in dynamic computer guided dental implant surgery: An in-vitro study. *Med Oral Patol Oral Cirugia Bucal.* 1 janv 2019;24(1):e76-83.
86. Kassite I, Bejan-Angoulvant T, Lardy H, Binet A. A systematic review of the learning curve in robotic surgery: range and heterogeneity. *Surg Endosc.* févr 2019;33(2):353-65.
87. Sun TM, Lee HE, Lan TH. The influence of dental experience on a dental implant navigation system. *BMC Oral Health.* 17 oct 2019;19(1):222.
88. D'haese J, Ackhurst J, Wismeijer D, De Bruyn H, Tahmaseb A. Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontol 2000.* févr 2017;73(1):121-33.
89. Pellegrino G, Mangano C, Mangano R, Ferri A, Taraschi V, Marchetti C. Augmented reality for dental implantology: a pilot clinical report of two cases. *BMC Oral Health.* 19 juill 2019;19(1):158.
90. Katsoulis J, Pazera P, Mericske-Stern R. Prosthetically driven, computer-guided implant planning for the edentulous maxilla: a model study. *Clin Implant Dent Relat Res.* sept 2009;11(3):238-45.
91. Liu SH, Cao CR, Lin WC, Shu CM. Experimental and numerical simulation study of the thermal hazards of four azo compounds. *J Hazard Mater.* 5 mars 2019;365:164-77.

C. Registre des Tableaux

Tableau 1 – Grade des recommandations de la HAS (47).....	29
Tableau 2 : Résumé des 17 études sélectionnées.....	31
Tableau 3 : Mesures de la précision en chirurgie guidée dynamique parmi les études sélectionnées.....	32
Tableau 4 : Mesures de la précision en chirurgie guidée statique parmi les études sélectionnées.....	33
Tableau 5 : Déviation au point d'entrée par rapport à la planification en chirurgie guidée dynamique.....	34
Tableau 6 : Déviation au point d'entrée par rapport à la planification en chirurgie guidée statique.....	35
Tableau 7 : Déviation à l'apex par rapport à la planification en chirurgie guidée dynamique.....	36
Tableau 8 : Déviation à l'apex par rapport à la planification en chirurgie guidée statique.....	37
Tableau 9 : Déviation angulaire par rapport à la planification en chirurgie guidée dynamique.....	38
Tableau 10 : Déviation angulaire par rapport à la planification en chirurgie guidée statique.....	39
Tableau 11 : Différence de profondeur par rapport à la planification en chirurgie guidée dynamique.....	40
Tableau 12 : Moyennes des déviations dans les études incluses et dans la littérature.....	41
Tableau 13 : Résumé des avantages et inconvénients des guides statiques et dynamiques (33).....	55

D. Table des figures

Figure 1: Guide chirurgical avec douilles en place (30).....	15
Figure 2 : Protocole des guides chirurgicaux statiques (30).....	17
Figure 3 : Protocoles de planification implantaire digitale (32).....	18
Figure 4 : Chirurgie en navigation dynamique (33).....	19
Figure 5 : Tracker patient fixé avec le X-Clip et tracker chirurgical sur le contre- angle (33).....	21
Figure 6 : La cusp registration.....	22
Figure 7 : Calibration de l'instrument (33).....	23
Figure 8 : Vues visibles par l'opérateur sur l'écran de navigation lors de l'ostéotomie (36).....	24
Figure 9 : Cible de l'écran de navigation (36).....	24
Figure 10 : Le protocole de navigation dynamique (33).....	25
Figure 11 : Plateau technique d'un système de navigation (40).....	26

MARCHAIS (Jean-Eudes) - Chirurgie guidée statique et dynamique en implantologie
83 f. ; 91 ref. ; 30 cm (Thèse : Chir. Dent. ; Nantes ; 2023)

Résumé :

L'implantologie évolue depuis les travaux de Bränemark dans les années 1970.

Actuellement, la navigation est surtout réservée aux cas complexes.

Pour que le clinicien utilise les systèmes de guides sur chaque patient nécessitant une pose d'implant, il faut lui fournir de bonnes raisons d'adopter cette technologie : amélioration de la précision, diminution des coûts et du temps nécessaire à la pose implantaire, gain d'ergonomie.

Nous nous sommes intéressés à la navigation avec des guides statiques et dynamiques.

Nous avons cherché à décrire la planification et la chirurgie en navigation statique et dynamique, ainsi que la précision de ces systèmes, puis de présenter leurs avantages et inconvénients afin de poser des indications pour leur utilisation.

RUBRIQUE DE CLASSEMENT : Implantologie

MOTS CLES MESH

Pose d'implant dentaire – Dental implantation.

Chirurgie assistée par ordinateur -Computer assisted, Surgery

JURY

Président : M. Le Professeur Yves Amouriq

Assesseur : M. Le Professeur Laurent Le Guéhennec

Assesseur : M. Le Docteur Gildas Réthoré

Co-directeurs de thèse : M. Le Docteur Alain Hoornaert et M. Le Docteur Charles Alliot