



HAL
open science

Nouvelle génération de prothèse totale de genou personnalisées et connectées : opportunités épidémiologiques et perception des opérateurs

Mathieu Le Stum

► To cite this version:

Mathieu Le Stum. Nouvelle génération de prothèse totale de genou personnalisées et connectées : opportunités épidémiologiques et perception des opérateurs. Médecine humaine et pathologie. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2024. Français. NNT : 2024BRES0019 . tel-04649294

HAL Id: tel-04649294

<https://theses.hal.science/tel-04649294>

Submitted on 16 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat de
L'UNIVERSITE
DE BRETAGNE OCCIDENTALE

ECOLE DOCTORALE N° 637
Sciences de la Vie et de la Santé
Spécialité : Santé Publique

Par
Mathieu LE STUM

**Nouvelle génération de Prothèse Totale de Genou personnalisées et connectées :
Opportunités épidémiologiques et perception des opérateurs.**

Thèse présentée et soutenue à Brest, le 28 mars 2024

Unité de recherche : Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale, LaTIM U1101

Rapporteurs avant soutenance :

Sébastien LUSTIG Professeur, Hospices Civils de Lyon – Université de Lyon
Nicolas SIRVEN Professeur, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique EHESP

Composition du Jury :

Président :	Valérie BURDIN	Professeur, Institut Mines Telecom Atlantique (IMTA)
Examineurs :	Sébastien LUSTIG	Professeur, Hospices Civils de Lyon – Université de Lyon
	Nicolas SIRVEN	Professeur, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique EHESP
Dir. de thèse :	Eric STINDEL	Professeur, CHU Brest – Université de Bretagne Occidentale
Co-dir. de thèse :	Myriam LE GOFF PRONOST	Directrice d'étude, Institut Mines Telecom Atlantique (IMTA)

Invité(s)

Frédéric DUBRANA Professeur, CHU Brest – Université de Bretagne Occidentale

La vie n'est pas une ligne droite. L'important n'est pas de tout faire dans l'ordre, mais de le faire, peu importe l'ordre.

Père Caill

Si tu ne vises rien, tu n'atteindras rien.

Shang-Chi et la légende des Dix anneaux

Remerciements

Je remercie tout d'abord l'Agence Nationale de la Recherche qui, dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir portant la référence ANR-17-RHUS-0005, a financé ce travail au travers du projet FollowKnee. Sans ce financement, le présent travail n'aurait pas pu être possible.

A Eric Stindel, merci d'avoir accepté de diriger ce travail au cours d'un petit café lors d'une pause à la journée CAMI, de m'avoir par la suite guidé, cadré, et empêché de partir dans des « dictées » de chiffres pour me concentrer sur le message, le fameux « story telling ». Merci également de m'avoir formé aux réunions hyper efficaces.

A Myriam Le Goff-Pronost, merci d'avoir accepté de co-diriger ce travail, d'y avoir apporté une touche de sciences humaines et sociales, de m'avoir évité de me disperser et d'avoir longuement échangé lors de nos points avec une oreille attentive. Merci de m'avoir renvoyé vers la rive du sujet lorsque je partais naviguer au large.

A Guillaume Dardenne, merci d'être également à l'origine de ce travail lors notre discussion lors de cette pause-café dans la cuisine du 3^e étage de l'IBRBS. Oui, il est temps d'arrêter de parler et de vraiment se lancer. Merci aussi pour ta question quotidienne « C'est quoi clairement l'objectif ? »

A Jean Michel Josselin et Frédéric Dubrana, merci de vos conseils et pistes donnés lors des CSI. Merci respectivement de m'avoir fait découvrir les méthodes d'élicitation des préférences et de m'avoir ouvert les portes du service de chirurgie orthopédique pour tester et diffuser les questionnaires. Merci aussi à M. Dubrana de m'avoir ouvert les portes du congrès de la SOO pour la diffusion de mon questionnaire et la mise en contact avec les internes Philippine et Louis, qui ont valeureusement contribué à la constitution de la cohorte des chirurgiens.

A Arnaud Clavé, Hoel Letissier, François Fazilleau et Thomas Gicquel, merci d'avoir supporté mes questions et longs échanges sur les pratiques médicales et les arthroplasties.

A Sébastien Lustig, Nicolas Sirven, merci d'avoir accepté de juger mon travail. Ce fut un honneur de vous avoir dans mon jury.

Merci à Valérie Burdin d'avoir accepté de présider mon jury, ce fut également un vrai honneur et reconnaissance pour moi.

Merci à Aziliz pour l'ensemble de nos discussions, échanges de documents et notre papier commun. De plus, sans toi R resterait encore un mystère.

Merci à Thomas et Ghislaine de m'avoir initié, dans le cadre de ce travail à la linguistique et de m'avoir fait prendre conscience qu'il n'y avait pas que les statistiques qui apportent de l'information.

Merci à Pauline et Ralph, mes stagiaires, d'avoir travaillé sur mes données complémentaires à la thèse et d'avoir ainsi ouvert la voie à deux futurs articles.

Merci à Ehouarn, Charles, Ludivine, Basile, Ilias, Mehran, Jean Rassaire, pour ces pauses « on refait le monde » au bâtiment 3 du CHU.

Merci à l'ensemble du laboratoire LaTIM U1101. Je pense fort à vous tous dans notre vie quotidienne de laboratoire mais énumérer tous les noms prendrait plusieurs pages ! Mais promis je continue à vous organiser les événements collectifs de vulgarisation scientifique, d'organiser des visites de lycéens, et nous continuerons de vérifier vos budgets, tout comme réfléchir sur l'environnement et son sauvetage, tout en refaisant le monde !

Un merci tout particulier à ma « petite » femme Anne Marie, qui m'a accompagné et supporté pendant ces quatre années de thèse, et qui m'a libéré du temps pour m'y consacrer. Je n'oublierai pas nos soirées travail, toi avec tes cahiers et moi mon ordinateur. Merci d'avoir été une oreille attentive et pleine de soutien pendant tout ce temps ; dans mes hauts, tout comme mes bas. Promis, on inverse les rôles pour les prochaines années.

Merci à Raphaël, Alexis et Antonin, de m'avoir apporté une touche d'innocence toute enfantine durant ce long travail. J'espère que vous êtes devenus des spécialistes du genou... et non, papa ne va pas pêcher des « Poisson » à son travail pour faire des maths.

Merci à mes parents, beaux-parents, mes sœurs, belles sœurs et beaux-frères, merci d'avoir été une écoute attentive mais toujours polie lors de mes essais de synthèse de la thèse en mode grand public et lors des repas familiaux.

Merci spécial aux cafetières du CHU 3^e étage et de l'IBRBS 1^{er} étage de nous avoir fait de si bons cafés qui ont permis tous les échanges de ces dernières années et ce travail.

Sommaire

Introduction	10
1 L'articulation du genou : vue globale	10
2 Les pathologies dégénératives affectant l'articulation du genou	14
2.1 Les traumatismes	14
2.2 La gonarthrose	15
2.3 Les arthrites	16
2.3.1 La polyarthrite rhumatoïde.....	16
2.3.2 Les autres formes d'arthrites.....	17
2.3.3 L'ostéonécrose.....	18
3 Traitements des gonalgies du genou : des approches conservatrices à l'acte chirurgical	19
3.1 Les traitements	19
3.2 Traitement chirurgical par arthroplastie	20
3.2.1 Généralité	20
3.2.2 Composition d'une prothèse totale de genou.....	21
3.3 La pose d'une prothèse totale de genou	22
3.3.1 La phase préopératoire.....	22
3.3.2 La phase opératoire	25
3.3.3 La phase post-opératoire	27
4 Les résultats moyens et long terme des prothèses totales de genou	27
5 Au-delà de l'insatisfaction : les problèmes graves.....	29
5.1 Les causes.....	30
5.2 Les facteurs influençant la chirurgie de révision	31
5.3 Conclusion.....	32
6 Evolution de l'offre et de la demande	32

6.1	Une population mondiale vieillissante, de plus en plus exposée au surpoids et l'obésité, et de moins en moins active physiquement	32
6.2	Une population jeune, souhaitant rester plus active	36
6.3	Un nombre de chirurgiens en faible progression et de plus en plus sollicités	37
6.4	Une pression accrue sur les systèmes de santé	39
6.5	Conclusion.....	42
7	Une réponse possible : Réduction du taux de reprise des prothèses totales de genou par numérisation (bloc opératoire, suivi patient) et automatisation. 42	
7.1	Les enjeux.....	42
7.2	Objets connectés et télémédecine vus par les patients et les médecins.....	43
7.3	De l'acceptabilité à l'acceptation.....	46
7.4	L'évaluation médico-économique	47
8	Conclusion	48
	Objectifs de la thèse.....	50
	Article 1.....	52
1	Titre	52
2	Objectif 1	52
3	Article	53
	Article 2.....	97
1	Titre	97
2	Objectif 2	97
3	Article	98
	Article 3.....	116
1	Titre	116
2	Objectif 3	116
3	Article	116
	Article 4.....	124
1	Titre	124

2	Objectif 4	124
3	Article	127
	Article 5.....	150
1	Titre	150
2	Objectif 5	150
3	Article	150
	Conclusion et perspective	163
1	Discussion	163
2	Synthèse	167
3	Limites	168
4	Perspective	169
5	Conclusion	173
	Travaux de valorisation relatifs à la thèse	174
1	Articles directement liés au travaux de thèse	174
2	Articles écrit en co-auteur principal et basés sur les méthodologies et données acquises lors de la thèse	174
3	Conférences nationales et internationales directement liés au travaux de thèse	175
	Références	176
	Annexes	182
1	Annexe 1	182

Liste des figures

Figure 1 : A. Vue d'ensemble de l'articulation du genou. B. Représentation de la membrane synoviale entourant l'articulation du genou, indiquée par le N°8. C. Représentation de la structure ligamentaire stabilisant l'articulation du genou.....	11
Figure 2 : A. Vue générale des cartilages permettant les mouvements de l'articulation du genou. B. Vue supérieur du ménisque.....	11
Figure 3 : A. Vue d'ensemble des axes HOC et XX'. B. Représentation d'un valgus prononcé...12	12
Figure 4 : A. Exemple de fracture du plateau tibial. B. Exemple de luxation du genou.....	13
Figure 5 : A. Vue schématique de l'évolution de l'arthrose. B. Représentation par radiographie	
Figure 6 : Représentation schématique de la polyarthrite rhumatoïde.....	16
Figure 7 : Les étapes d'une pose de prothèse totale de genou.....	20
Figure 8 : Composition d'une prothèse totale de genou avant et après implantation.....	21
Figure 9 : Exemple de logiciel de planification, (A) en 2D [31] et (B) 3D (FollowKnee App), fémur et tibia.....	23
Figure 10 : Différentes philosophies pour l'implantation d'une PTG.....	24
Figure 11 : Exemple de coupe osseuse réalisée à partir d'un guide de coupe.....	25
Figure 12 : Exemple (A) d'un système de navigation et (B) d'un robot chirurgical.....	26
Figure 13 : Pourcentage de patients pour chaque cause de révisions. Les patients sont stratifiés en trois groupes, fonction de la période de survenue de la révision : précoce, tardive et globale.....	30
Figure 14 : Part de la population âgée de plus de 65 ans et de plus de 80 ans, 2019 et 2050..	32
Figure 15 : A. Taux de surpoids mesuré (obésité comprise), chez les adultes, par sexe, 2019 (ou année la plus proche). B. Surpoids autodéclaré (incluant l'obésité) chez les jeunes âgés de 15 ans, 2009-10 et 2017-18.....	33
Figure 16 : A. Manque d'activité physique chez les adultes, par sexe, 2016. B. Proportion de jeunes de 11 ans et 15 ans qui pratiquent au moins 60 minutes d'activité physique modérée à vigoureuse par jour, 2017-18.....	35

Introduction

En tant qu'articulation primordiale pour la mobilité, le genou est soumis à de nombreuses contraintes tout au long de la vie, sources de pathologie de surcharges. En raison de l'inconfort ressenti, de la douleur et de la perte de mobilité qui en résultent, le traitement, parfois chirurgical, repose sur le remplacement prothétique des surfaces de glissements cartilagineuses. Cette procédure chirurgicale de résection osseuse a vu le jour au 19^e siècle et a depuis continué à se perfectionner grâce aux avancées technologiques de chaque époque. Le projet FollowKnee, auquel cette thèse contribue, s'inscrit dans cette continuité.

1 L'articulation du genou : vue globale

Très sollicité dans la vie courante, le genou, localisé dans le membre inférieur est une articulation reliant la cuisse à la jambe. Elle doit allier une parfaite stabilité à une grande mobilité.

Articulation robuste, pouvant supporter entre trois et quatre fois le poids du corps, c'est aussi une articulation charnière, qui par des mécanismes de roulement et de glissement permet les mouvements de la jambe.

L'articulation fémoro-tibiale est une articulation complexe, de type synoviale. Elle est constituée d'une partie osseuse comprenant le fémur (os de la cuisse) et le tibia (os de la jambe), ainsi que de cartilage qui recouvre les surfaces articulaires de ces os. La membrane synoviale, qui entoure l'articulation, sécrète un liquide, la synovie, qui lubrifie l'articulation et réduit la friction entre les surfaces articulaires (fig 1A, 1B).

Toutes ces structures sont renforcées par des ligaments solides qui maintiennent les os en place et stabilisent l'articulation en synergie avec les masses musculaires. Ces ligaments sont les ligaments croisés (antérieur et postérieur) et les ligaments collatéraux (médial et latéral) (fig 1A, 1C).

Le genou est également subdivisé en deux articulations. L'articulation fémorotibiale, entre le fémur et le tibia, considérée comme l'articulation portante principale. Elle permet les mouvements de flexion et d'extension de la jambe.

L'articulation fémoropatellaire, entre la rotule (patella) et le fémur. Cette articulation permet à la rotule de se déplacer le long d'une gorge (trochlée) située sur la face antérieure du fémur lors des mouvements de flexion et d'extension du genou. Elle permet d'exercer une traction directe en avant sur le tibia sans causer d'usure excessive du tendon.

Lors des mouvements, la fluidité et la résistance aux contraintes de pression sont assurées par les cartilages recouvrant les surfaces osseuses. Un contact direct de type os sur os est donc évité, et le glissement optimisé. Les surfaces des condyles fémoraux et du tibia sont rendues congruentes par la présence de deux fibrocartilages que sont les ménisques (médial et latéral). Un cartilage de type hyalin protège quant à lui les surfaces articulaires des os contre l'usure (condyles fémoraux et face supérieure des condyles tibiaux et face interne de la patella). Son étendue est fonction de l'amplitude du mouvement et son épaisseur, proportionnelle à la pression subie par unité de pression. Egalement déformable, il s'adapte rapidement (Figure 2).

Eu égard aux axes définissant les éléments squelettiques du membre inférieur, les mouvements de flexion et d'extension se réalisent autour d'un axe XX' traversant les condyles fémoraux. Cet axe forme (en moyenne) un angle de 81° avec l'axe du fémur et de 93° avec celui du tibia. De plus, il faut noter que l'axe longitudinal du fémur n'est pas exactement aligné avec celui du tibia, définissant le valgus physiologique du genou. Entre ces deux éléments, un angle obtus de $170-175^\circ$ est formé par rapport à l'axe mécanique du membre inférieur, qui relie les trois centres articulaires de la hanche (H), du genou (O) et de la cheville (C). Cet axe mécanique, appelé HKA dans la littérature internationale, s'aligne sur une même droite d'angle 180° (fig 3A). Les membres sont alors dits : normo-axés.

Le valgus physiologique du genou, dépendant donc de la largeur du bassin, varie entre les sexes. Il sera plus prononcé chez les femmes, en raison d'un bassin plus large (fig 3B).

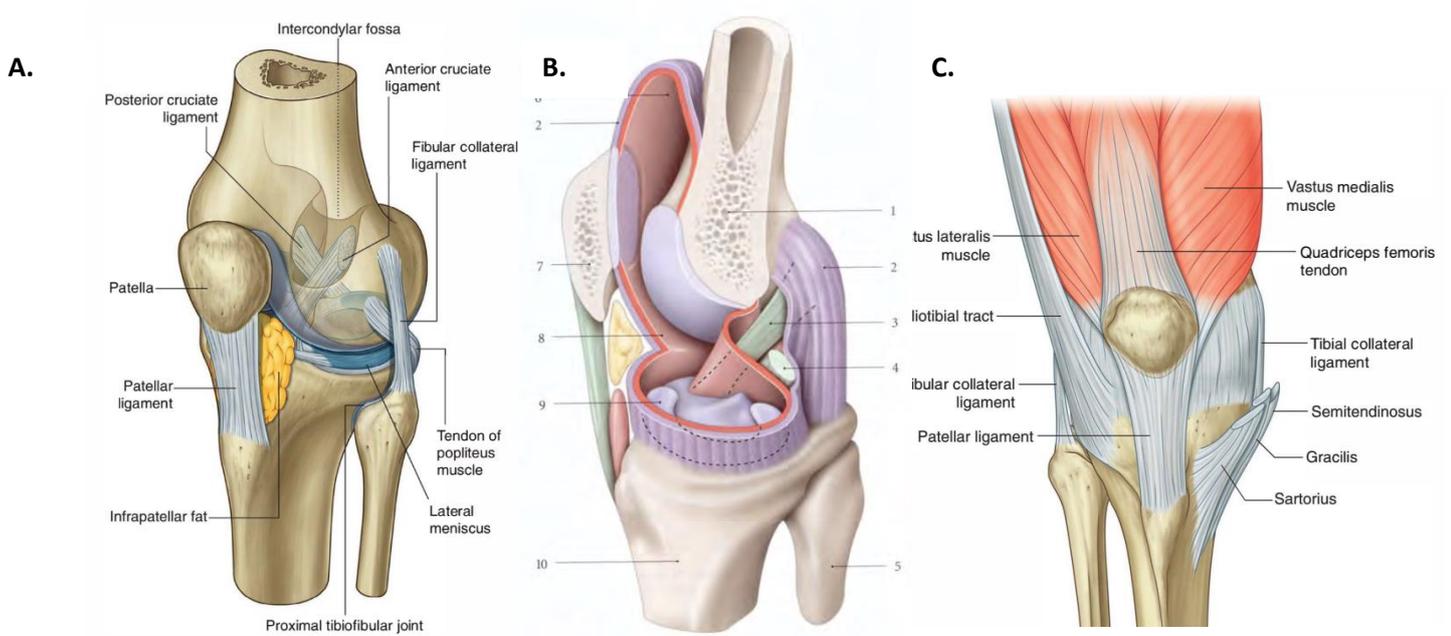


Figure 1 : **A.** Vue d'ensemble de l'articulation du genou [1]. **B.** Représentation de la membrane synoviale entourant l'articulation du genou, indiquée par le N°8 [2]. **C.** Représentation de la structure ligamentaire stabilisant l'articulation du genou [1]. Ces deux derniers éléments constituent la capsule articulaire.

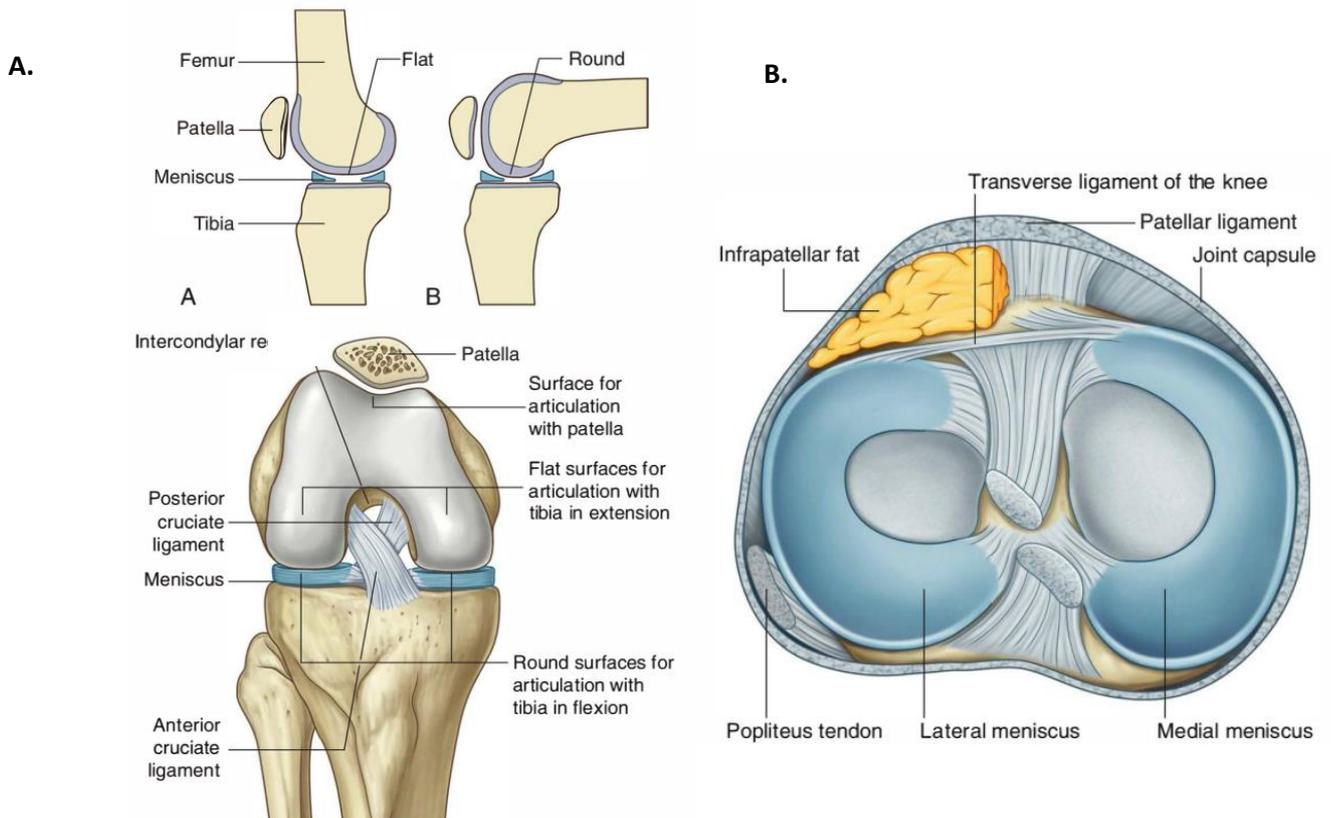


Figure 2 : **A.** Vue générale des cartilages permettant les mouvements de l'articulation du genou [1]. **B.** Vue supérieur du ménisque [1].

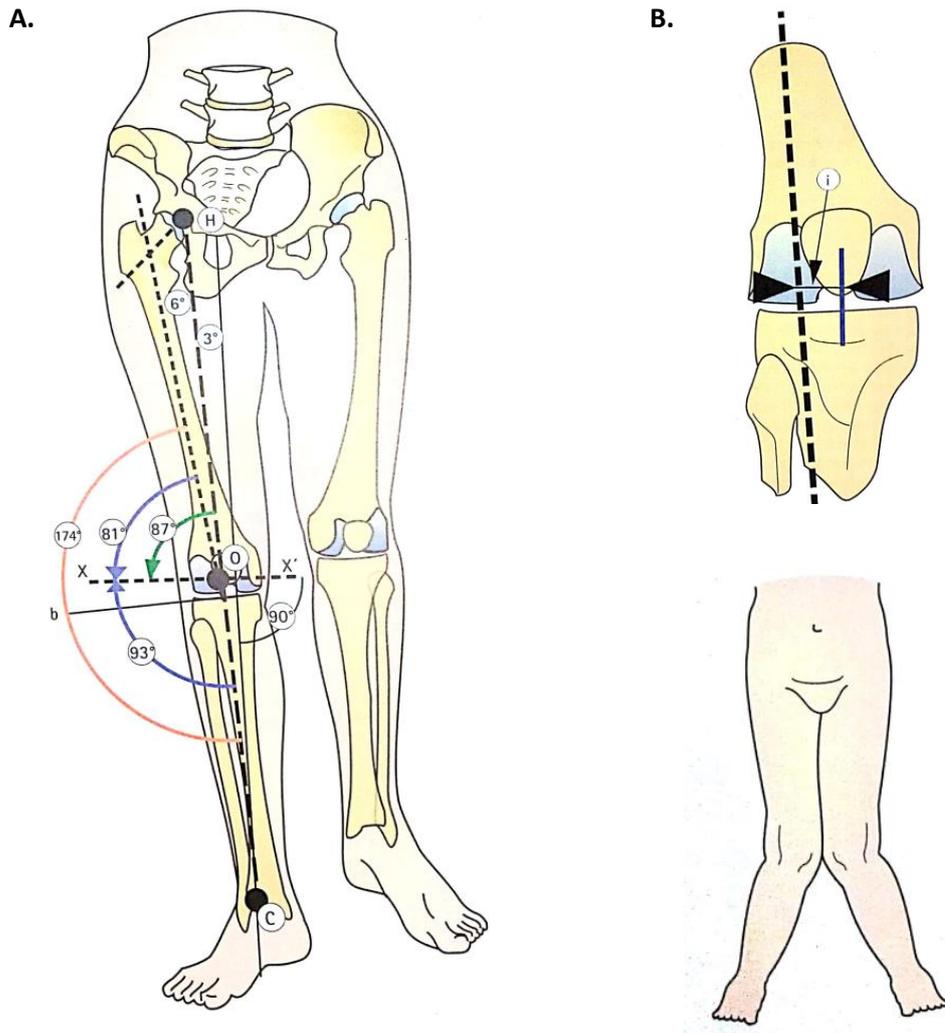


Figure 3 : **A.** Vue d'ensemble des axes HOC et XX' [3]. **B.** Représentation d'un valgus prononcé [3].

Le genou travaille essentiellement en compression sous l'action de la pesanteur, et accessoirement en rotation, autour de l'axe longitudinal de la jambe. Mécaniquement, le genou doit concilier deux impératifs contradictoires que sont la stabilité en extension complète et la mobilité en flexion. Dans le premier cas il s'agit d'une position au cours de laquelle le genou subit d'importants efforts liés au poids du corps et dans le second, il s'agit d'une mobilité nécessaire à la course et l'orientation du pied par rapport aux inégalités de terrain [3].

Ainsi est constituée et fonctionne naturellement l'articulation « normale ».

2 Les pathologies dégénératives affectant l'articulation du genou

Au fil des événements de la vie, et notamment de l'avancée en âge, il est possible de ressentir des douleurs localisées au niveau d'un ou des deux genoux : les gonalgies. Elles peuvent se manifester soudainement après un traumatisme (e.g. fracture, luxation ou entorse), ou plus progressivement (e.g. arthrose ou arthrites). Dans ce dernier cas, l'origine est plus probablement attribuable à des facteurs mécaniques ou inflammatoires [4].

2.1 Les traumatismes

Très sollicité dans la vie quotidienne et dans le sport, le genou est exposé à des fractures et/ou à des lésions ligamentaires. Ces traumatismes peuvent affecter les différents compartiments de l'articulation. Il peut s'agir d'une fracture du fémur ou du tibia (fig 4A), avec ou sans fracture du cartilage associé. Des elongations ou des ruptures des ligaments (e.g. entorse du genou, luxation) peuvent également se produire (fig 4B). Enfin, des lésions des ménisques (ruptures ou fissures) peuvent aussi survenir. La gravité de ces traumatismes peut varier, et entraîner à long terme des dysfonctionnements de l'articulation via l'application de contraintes anormales, venant en dérégler son fonctionnement normal, source d'arthrose post-traumatique [3,4].

Toutes les catégories d'âges sont susceptibles d'être touchées.

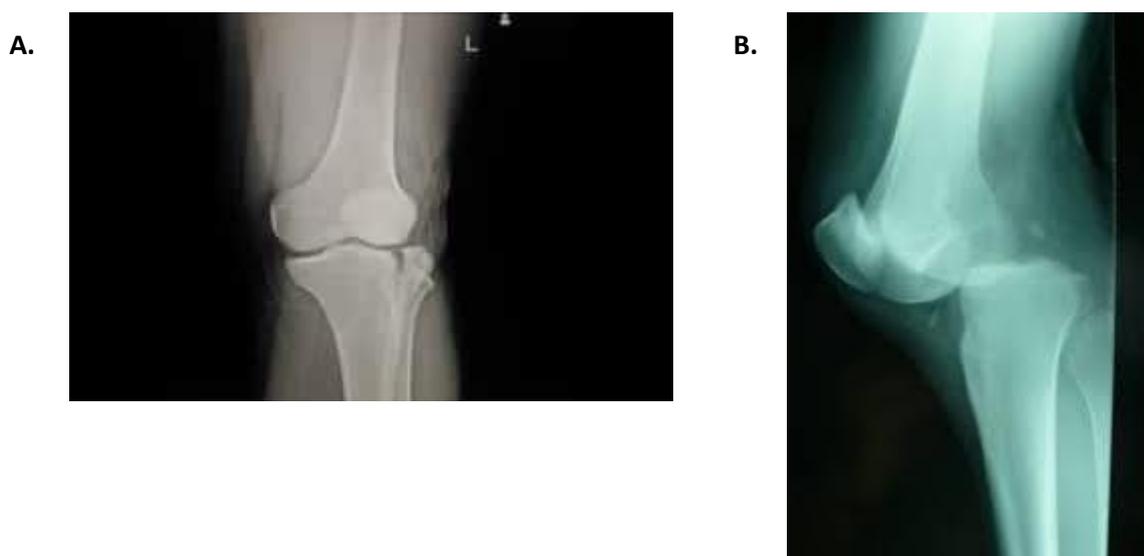


Figure 4 : **A.** Exemple de fracture du plateau tibial [5]. **B.** Exemple de luxation du genou [6].

2.2 La gonarthrose

La gonarthrose est un processus dégénératif progressif et continu de l'articulation du genou, via la dégénérescence graduelle du cartilage sous forme de fissures, puis d'érosions aboutissant à la mise à nu de l'os sous chondral. Cette dégradation cartilagineuse peut résulter de contraintes anormales ou répétées sur un cartilage normal, tout comme de contraintes normales sur un cartilage anormal (fig 5) [1,4].

L'étiologie de la gonarthrose n'est pas clairement établie mais elle serait principalement liée à une prédisposition génétique, l'âge (les hommes sont atteints plus jeune que les femmes), les excès, mais aussi l'absence, d'activité physique, les anomalies métaboliques et nutritionnelles (e.g. surpoids, obésité). La gonarthrose peut aussi survenir suite à des traumatismes répétés, des anomalies de la statique des membres inférieurs (e.g. genu varum, genu valgum ou instabilité ligamentaire chronique), une méniscectomie, une nécrose spontanée ou une maladie inflammatoire [1,3,4].

La gonarthrose se manifeste par des douleurs, des gonflements, des raideurs et des déformations articulaires, entraînant une diminution de la mobilité. Les signes radiologiques les plus fréquents sont le pincement articulaire (lié à l'amincissement du cartilage), l'éburnation (ou sclérose de l'os), le développement d'ostéophytes (excroissance osseuse) et la formation de kystes osseux [1,4]. C'est une maladie chronique invalidante. Elle ne régresse pas mais sa progression n'est pas linéaire. Elle alterne entre des phases lentes et rapide, ainsi que des phases de douleurs chroniques (douleurs modérées) et des crises de douleurs aiguës (douleurs intenses), au cours desquelles se produit la destruction du cartilage [7].

La gonarthrose est la gonalgie la plus fréquente après 40-50 ans et concerne 30% des 65-75 ans. Elle demeure plus rare avant 40 ans. Dans ce cas, elle touche préférentiellement les pratiquants de certains sports (e.g. sport de contact comme le football, le basketball, tennis ou la course à pieds. Liste non exhaustive) ou types de travaux (e.g. port de charges lourdes, travail accroupi...) qui sollicitent beaucoup les genoux [7].

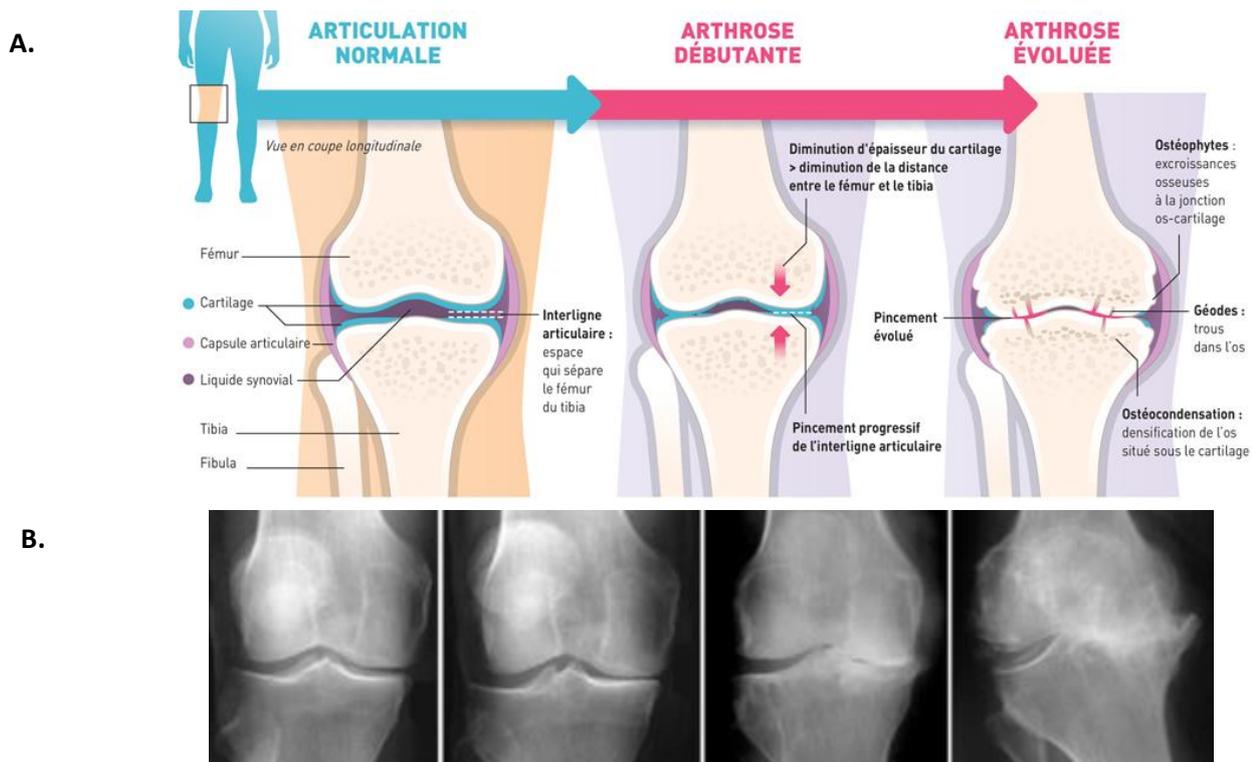


Figure 5 : **A.** Vue schématique de l'évolution de l'arthrose [8]. **B.** Représentation par radiographie [9]

2.3 Les arthrites

2.3.1 La polyarthrite rhumatoïde

La polyarthrite rhumatoïde est une maladie inflammatoire sévère qui affecte les articulations y compris le genou. C'est une maladie auto-immune, qui se caractérise plus spécifiquement par une inflammation de la membrane synoviale. Initialement, elle se manifeste par un enraidissement douloureux et un gonflement de l'articulation puis, évolue sous forme de poussée. Le genou s'altère alors rapidement. L'on observe alors une détérioration cartilagineuse, une destruction des os sous-jacents (par déminéralisation) ou des luxations (fig 6). Après plusieurs années d'évolution, la polyarthrite rhumatoïde finit par provoquer des déformations articulaires et des destructions de tendons [2,10,11].

La polyarthrite rhumatoïde est la forme d'arthrite la plus courante, touchant deux à trois fois plus de femmes que d'hommes (probablement en raison de l'effet des œstrogènes sur le système immunitaire). Elle touche entre 0,5% et 2% de la population mondiale [12]. Bien qu'elle puisse se

développer à tout âge, elle se manifeste généralement entre 30 et 50 ans, atteignant un pic autour de 45 ans.

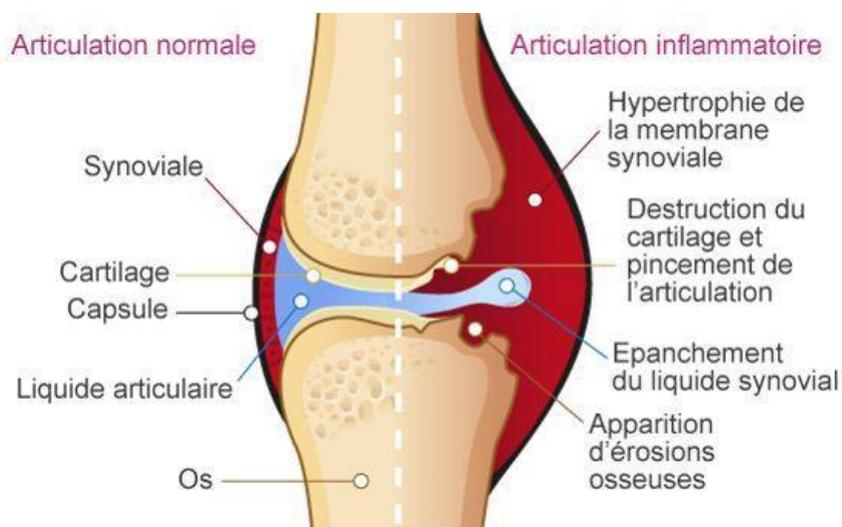


Figure 6 : Représentation schématique de la polyarthrite rhumatoïde [13].

2.3.2 Les autres formes d'arthrites

Outre la polyarthrite rhumatoïde qui est la plus répandue, il existe une dizaine de formes d'arthrite différentes. Ces affections peuvent toucher des personnes de tout âge, qu'il s'agisse d'enfants, d'hommes ou de femmes. Certaines formes, peuvent résulter d'une infection articulaire (arthrite septique), tandis que d'autres sont causées par des dépôts de microcristaux d'acide urique (responsables de la goutte) ou de cristaux de pyrophosphate de calcium (responsable de la chondrocalcinose).

Dans tous les cas, une réaction inflammatoire se déclenche, entraînant la production locale de substances toxiques. Cette réaction s'aggrave progressivement, entraînant la destruction des tissus constitutifs de l'articulation du genou.

2.3.3 L'ostéonécrose

L'ostéonécrose est caractérisée par un processus au cours duquel on observe une nécrose osseuse et médullaire plus ou moins étendue, qui constitue le processus pathologique prédominant. La cause principale de l'ostéonécrose est l'ischémie (i.e. défaut d'irrigation de l'organe concerné). Dans l'articulation du genou, des anomalies artérielles intra- ou extra-osseuses du condyle médial ont été suggérées comme facteur contribuant à cette condition [14].

Les ostéonécroses du genou se regroupent sous trois types différents : les ostéonécroses spontanées (survient en l'absence de facteurs de risque), les ostéonécroses post-arthroscopiques ou post-chirurgicales (surviennent après opération chirurgicale) et les ostéonécroses secondaires (e.g. consécutivement à des traumatismes, des traitements médicamenteux, tel que les corticoïdes, ou des maladies inflammatoires comme les pancréatites) [15].

Dans les deux premiers cas d'ostéonécroses, le condyle fémoral médial est concerné dans 88% des cas, puis le condyle fémoral latéral et enfin les plateaux tibiaux. La douleur survient soudainement en dehors de tout traumatisme, le patient pouvant même en préciser le moment précis. Elle est intense et de type mécanique. Dans le cas de l'ostéonécrose secondaire, la douleur est graduelle et modérée dans 60% des cas et survient majoritairement lors des mouvements et les portées de charges. Les lésions présentes sont également plus importantes [14–16].

L'évolution spontanée de l'ostéonécrose présente une grande variabilité, allant de la résolution complète des symptômes cliniques en quelques semaines ou quelques mois, à une arthrose secondaire qui progresse rapidement et conduit à une destruction ostéo-articulaire souvent en moins d'un an [15].

Les ostéonécroses touchent principalement les sujets âgés de plus de 60 ans et sont plus fréquentes chez les femmes. Les ostéonécroses secondaires font exception à ce tableau clinique, en touchant des patients plus jeunes avant 55 ans, et aussi bien le condyle fémoral médial que latéral ou d'autres sites du genou [14–16].

3 Traitements des gonalgies du genou : des approches conservatrices à l'acte chirurgical

3.1 Les traitements

Après avoir identifié l'origine d'une gonalgie par le biais d'une radiographie, d'un examen tomodensimétrique (CT-scan) ou d'une IRM, le traitement initial se concentre principalement sur des approches conservatrices. Celles-ci comprennent la perte de poids, l'éducation du patient, ainsi que l'utilisation d'orthèses telles que des genouillères et des cannes, de même que la rééducation fonctionnelle. Des traitements médicamenteux sont également utilisés pour soulager la douleur, comme des injections d'acide hyaluronique. Cependant, ces traitements visent principalement à ralentir la progression de l'arthropathie.

Lorsque les mesures conservatrices et les médicaments ne parviennent plus à soulager la douleur et à rétablir une fonction locomotrice satisfaisante, la décision de procéder à un geste chirurgical est discutée. Le traitement chirurgical concerne les patients qui ont suivi un traitement médical adéquat mais qui n'ont pas obtenu de résultats satisfaisants. Le choix de l'intervention chirurgicale dépend de la gravité des symptômes du patient, de son âge, et de son état physique.

La chirurgie du genou propose plusieurs options de traitement. L'arthroscopie du genou permet un nettoyage de l'intérieur de l'articulation par retrait des microparticules ostéo-cartilagineuses qui entretiennent l'inflammation. Son efficacité est toutefois transitoire sur quelques mois. La mosaïcplastie du genou permet une autogreffe du cartilage d'une zone saine, vers celle lésée. Le cartilage sain est prélevé sous forme de carotte et est ensuite transplanté sur la zone malade, dans le but de combler la perte de substance. L'ostéotomie est une procédure permettant de réaligner l'articulation en coupant le tibia pour corriger la déviation de l'axe de la jambe, répartissant ainsi mieux les contraintes dans le genou. Ces interventions chirurgicales sont considérées comme conservatrices, car elles visent à ralentir la progression de l'arthrose [17–19].

Cependant, lorsque l'arthrose est à un stade avancée, il sera procédé à un traitement radical de dernier recours qui vise à remplacer partiellement voire totalement l'articulation du genou par un implant prothétique en fonction des lésions anatomiques présentées par le patient [17,20].

En ce qui concerne les principales pathologies affectant le genou, l'arthrose représente environ 90% des cas nécessitant une arthroplastie, suivie de l'arthrite rhumatoïde (entre 4% et 7% selon

les pays), de l'ostéonécrose (environ 4,2%), et des traumatismes liés aux fractures (moins de 3%) [21–23].

Depuis la fin des années 90 jusqu'au milieu des années 2010, la prévalence de l'arthrose dans les actes d'arthroplastie du genou a augmenté d'environ 6-7% selon les pays [21–23]. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la prévalence de l'arthrose, principalement due au vieillissement de la population, et cette tendance devrait également se maintenir à la hausse dans les années à venir [24].

Au contraire, la prévalence de l'arthrite rhumatoïde a diminué de 6-7% en fonction des pays [21–23], tandis que celle de l'ostéonécrose a légèrement augmenté [23]. La diminution de la proportion d'arthroplasties liées à l'arthrite rhumatoïde s'explique principalement par l'amélioration des traitements de première intention [12,25]. En effet, on a constaté une diminution des arthroplasties chez les personnes de moins de 60 ans (qui sont les cibles des traitements de première intention), tandis que leur nombre a augmenté chez les personnes plus âgées, ce qui indique un report de l'intervention chirurgicale de quelques années [12].

3.2 Traitement chirurgical par arthroplastie

L'arthroplastie du genou consiste à remplacer les parties de l'articulation du genou lésées par la maladie, par une prothèse de genou, afin de rétablir une articulation fonctionnelle.

3.2.1 Généralité

L'intervention chirurgicale se réalise au bloc opératoire, sous anesthésie générale (ou rachianesthésie). Après avoir réalisé une découpe osseuse des parties endommagées, le chirurgien procède à la mise en place de l'implant préalablement sélectionné (fig 7). En fonction du compartiment de l'articulation touché, et de l'étendue de la lésion, le chirurgien peut opter pour une prothèse dite unicompartmentale ou totale.

Les prothèses unicompartmentales sont indiquées lorsqu'il y a une atteinte isolée d'un seul compartiment du genou. En revanche, les prothèses totales sont recommandées lorsqu'un ou plusieurs compartiments de l'articulation du genou sont touchés [20]. En raison de la forte prépondérance de la prothèse totale de genou par rapport à l'unicompartmentale [21], le travail présenté ci-après ne se focalisera que sur la première.

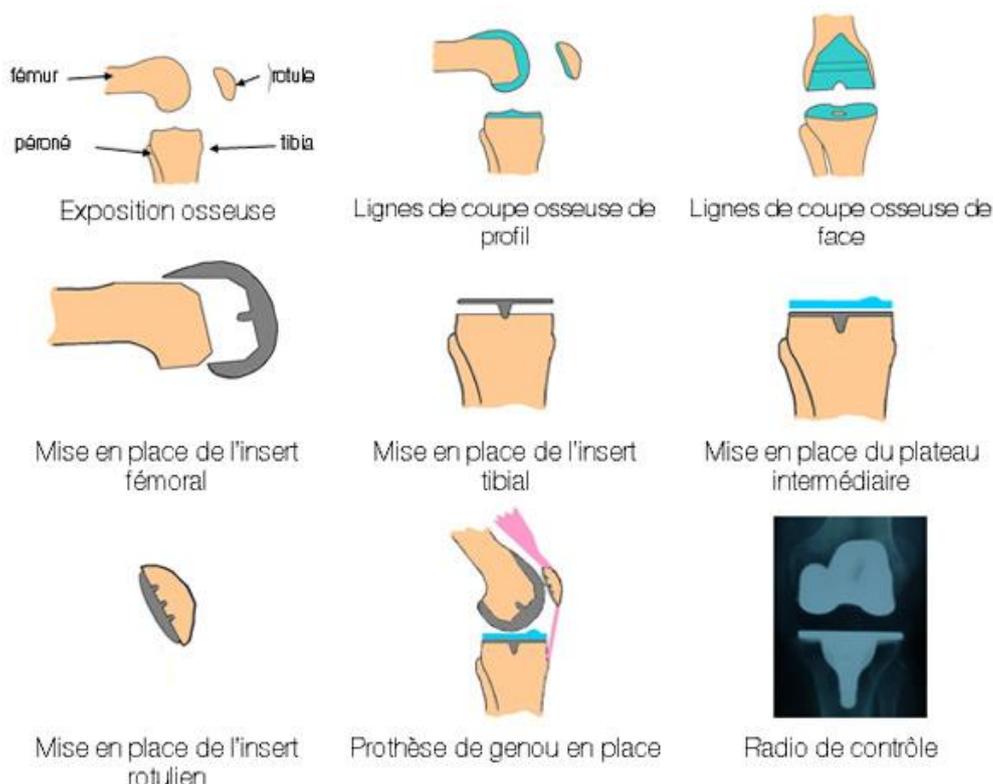


Figure 7 : Les étapes d'une pose de prothèse totale de genou [26].

3.2.2 Composition d'une prothèse totale de genou

Fruit d'une longue évolution d'essais et d'adaptations permanentes depuis la fin du 19^e siècle [27,28], les prothèses totales de genou, se composent généralement de quatre éléments: le plateau tibial, le bouclier fémoral, un insert en polyéthylène densifié ainsi qu'un bouton rotulien associé ou non à un métal back (fig 8).

Les deux premiers éléments sont en métal, le plus souvent un alliage de chrome-cobalt, tandis que les deux derniers sont en plastique densifié. Les parties métalliques de la prothèse sont insérées dans les os du tibia et du fémur, remplaçant ainsi les parties lésées. En fonction de la qualité de l'os, elles seront fixées par cimentation ou pas. L'insert en polyéthylène permet le glissement des deux surfaces. La partie rotulienne n'est mise que si cette dernière est dégradée.

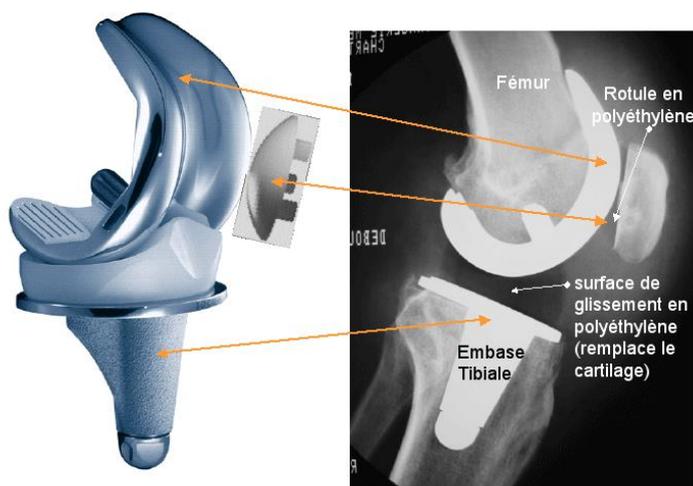


Figure 8 : Composition d'une prothèse totale de genou avant et après implantation [29]

3.3 La pose d'une prothèse totale de genou

Au-delà de la composition commune des prothèses totales de genou, le chirurgien prendra en considération d'autres paramètres spécifiques à chaque patient, et qui caractérisaient son articulation avant l'apparition de la maladie.

3.3.1 La phase préopératoire

3.3.1.1 La planification

La planification sera adaptée à chaque patient en fonction de la taille des structures osseuses et des déformations axiales induites par la pathologie sous-jacente.

En se basant sur l'examen radiologique ou tomodensimétrique (CT-scan) du membre inférieur, il effectuera une préparation préalable à l'opération pour en déterminer les caractéristiques propres et préparer le matériel nécessaire. Il déterminera ensuite le type de prothèses à poser (modèle et

taille) et, en conséquences, les coupes osseuses à réaliser et de la quantité d'os endommagé à réséquer.

Il est essentiel de prendre en compte avec précision les paramètres physiologiques et mécaniques propres à chaque individu, dans le but d'obtenir une fonctionnalité maximale de l'articulation après l'opération. Ces choix visent également à réduire les contraintes exercées sur la prothèse.

Ces procédures sont réalisées à l'aide de calques radiologiques ou de logiciels spécialisés en 2D ou 3D (fig 9).

3.3.1.2 La taille de la prothèse

Le choix de la taille de la prothèse dépend à la fois de la taille initiale du genou et de la surface d'os retirée. L'objectif est d'optimiser les débords et sur-recouvrements de la coupe et de minimiser les résections osseuses.

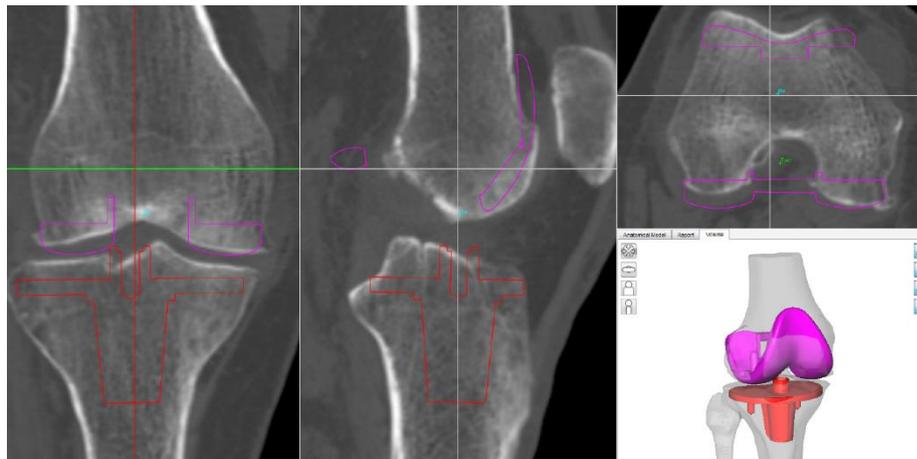
Pour ce faire, les fabricants de prothèses proposent, pour chaque patient, plusieurs tailles (généralement cinq à six), parmi lesquelles le chirurgien effectue une présélection lors de la phase préopératoire. La taille définitive sera choisie pendant l'opération. Il faut ici noter que ces prothèses, dites « sur étagère », ont toutes la même forme quel que soit le patient, seule la taille change.

Toutefois, grâce au développement de l'impression 3D au cours des dernières décennies, la conception et la fabrication de prothèse personnalisée, adaptée à la morphologie des patients, sont devenues possibles. Cette technologie est encore réservée à des cas spécifiques et n'est pas encore utilisée en opération de routine [20].

3.3.1.3 Les axes

Pour minimiser les contraintes sur la prothèse et améliorer la mobilité du genou, le chirurgien doit identifier les axes de force qui seront exercés sur la prothèse. Il existe différentes approches d'alignement (ou de ré-axage), basées soit sur des considérations mécaniques, soit sur la recherche d'une restauration optimale de l'anatomie préexistante du patient (fig 10) [30]. Ainsi en phase préopératoire, le chirurgien déterminera les angles selon lesquels les coupes osseuses seront effectuées. Ces dernières seront réalisées à l'aide d'une instrumentation réglable commune à tous les patients, ou de guides coupes personnalisés, imprimés en 3D en amont de l'opération.

A.



B.

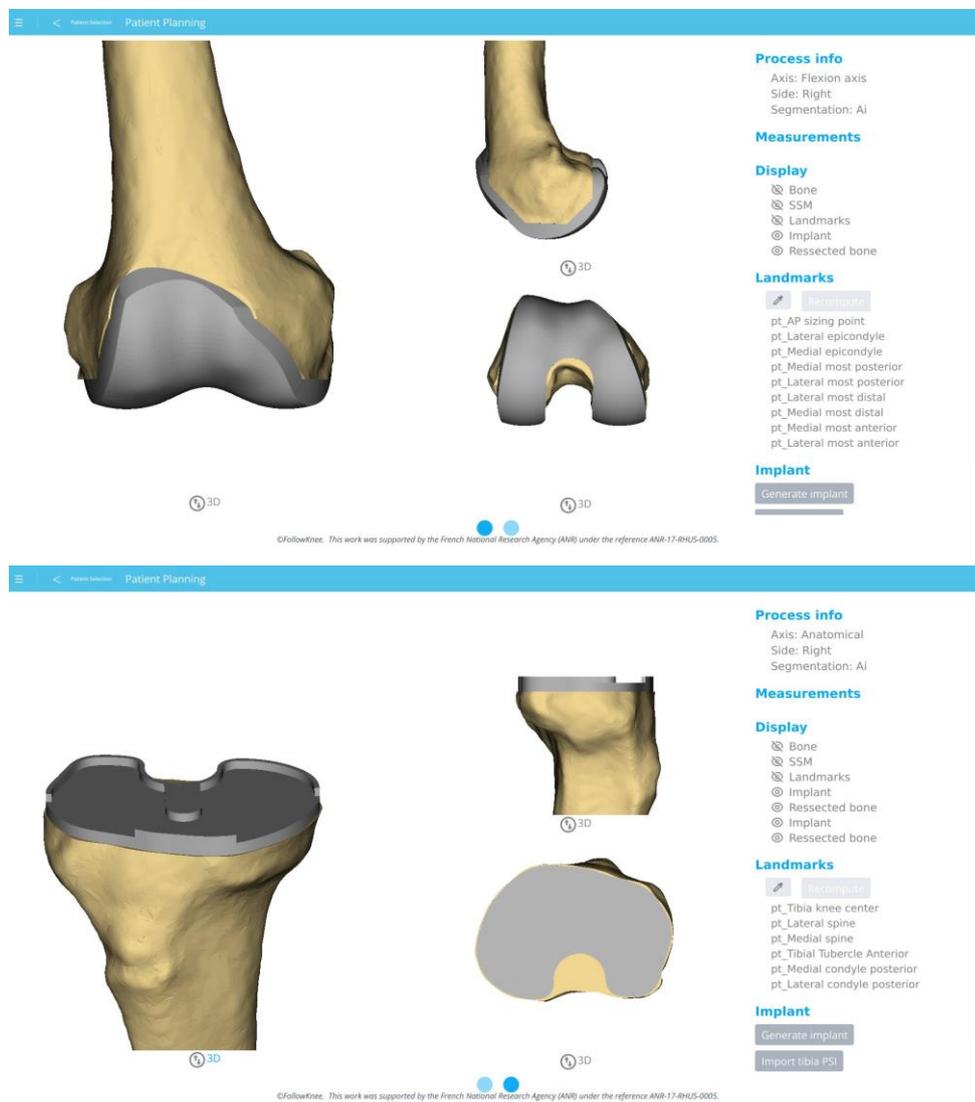


Figure 9 : Exemple de logiciel de planification, (A) en 2D [31] et (B) 3D (FollowKnee App), fémur et tibia.

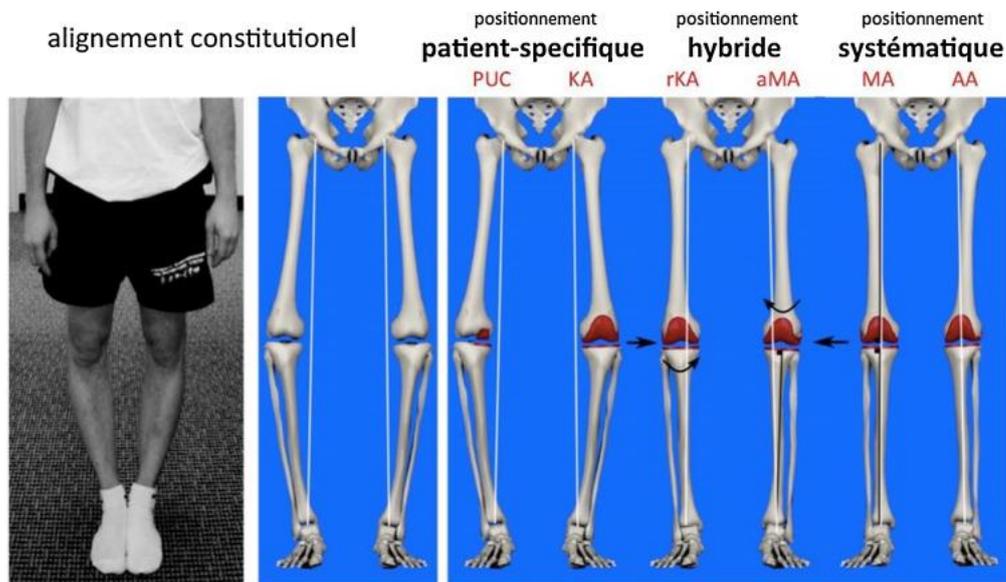


Figure 10 : Différentes philosophies pour l'implantation d'une PTG. Pour illustrer cette classification, un genou avec un varus constitutionnel sévère était sélectionné. MA : technique d'alignement mécanique ; AA : technique d'alignement anatomique ; aMA : technique d'alignement mécanique ajustée ; rKA : technique d'alignement cinématique restreinte ; PUC : prothèse unicompartmental.

3.3.2 La phase opératoire

Pendant la phase opératoire, une fois la peau et la membrane synoviale incisées, l'accès à la partie osseuse de l'articulation permettra les découpes des parties endommagées. Si l'instrumentation réglable est utilisée (fig 11), le choix des tailles et types sera effectué directement en salle d'opération, ce qui ne sera pas nécessaire dans le cas des guides de coupes personnalisés, déjà adaptés.

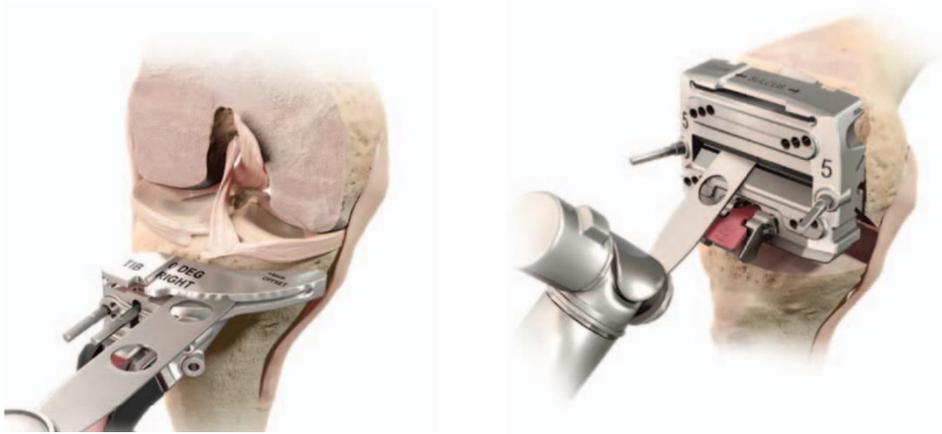


Figure 11 : Exemple de coupe osseuse réalisée à partir d'un guide de coupe [32].

Avant de procéder aux coupes, le chirurgien devra vérifier les mesures effectuées lors de la phase préopératoire et positionner correctement le matériel d'aide à la coupe. Pour ce faire, il pourra se servir d'instruments numériques tels que des stations de navigation ou des robots (fig 12). Grâce au positionnement de capteurs optiques, il pourra placer de manière précise les guides de coupe (navigation) ou effectuer directement la procédure de coupe (robot). Des ré-ajustements d'angles pourront être effectués par rapport au planning préopératoire. Ce contrôle est souhaitable pour obtenir la meilleure ré-axation possible de l'articulation.

Enfin, une fois les coupes effectuées, le chirurgien déterminera définitivement la taille de la prothèse à fixer, en prenant également en compte la tension ligamentaire spécifique au patient. Pour maintenir la prothèse sur l'os, la fixation se fera soit avec du ciment (Metacrylate de méthyle), soit sans ciment, en fonction de la qualité de l'os. Dans ce dernier cas, une structure trabéculaire présente sur la prothèse permettra à l'os de repousser à l'intérieur, assurant la stabilité de l'interface os-implant.

A.



B.



Figure 12 : Exemple (A) d'un système de navigation [33] et (B) d'un robot chirurgical [34]

3.3.3 La phase post-opératoire

L'objectif de la pose d'une prothèse étant de retrouver une mobilité fonctionnelle, une phase de rééducation sera nécessaire, couplée à un suivi régulier avec le chirurgien. Lors de ces rendez-vous, des scores fonctionnels et de suivi de la douleur seront établis. Un suivi renforcé sera mis en place au cours de la première année post-opératoire, année cruciale sur le devenir moyen et long terme de la prothèse implantée.

4 Les résultats moyens et long terme des prothèses totales de genou

Comme nous l'avons vu précédemment, l'objectif de la pose d'une prothèse totale de genou est la baisse de la douleur consécutive à la pathologie et une mobilité fonctionnelle retrouvée.

Les taux de survie supérieur à 90%, à 10 ans, des prothèses nous prouvent la bonne maîtrise de cette approche [35,36]. L'objectif ultime de toute arthroplastie du genou est « une prothèse oubliée » (i.e. le patient n'a pas l'impression d'avoir une prothèse). Toutefois, contrairement aux prothèses de hanche, pour lesquelles les taux d'oubli sont de l'ordre de 95% [37], l'insatisfaction concernant les prothèses totales de genou tourne autour de 20%-30% selon les études [38].

La satisfaction des patients concernant la pose d'une prothèse totale de genou repose principalement sur trois critères : les résultats fonctionnels, le niveau de douleur résiduelle et la réalisation de leurs attentes. Ces éléments seront évalués en fonction de leurs capacités à mener des activités de la vie quotidienne telles que monter et descendre les escaliers, sortir de leur voiture, rester debout, etc [38].

Il convient toutefois de souligner que les attentes des patients jeunes et sportifs vis-à-vis de l'amélioration fonctionnelle sont particulièrement significatives, car cela leur permettra de reprendre leurs activités sportives et leurs passions habituelles. Ces patients ont un fort désir de retrouver une mobilité optimale pour pouvoir pratiquer à nouveau leurs activités avec plaisir et sans limitation.

En général, les niveaux d'insatisfaction sont plus élevés chez les patients jeunes (moins de 60-65 ans) qui étaient physiquement actifs avant l'intervention. Les douleurs résiduelles sont également influencées par le sexe (plus fréquemment rencontrées chez les femmes). L'importance de la pathologie d'origine joue aussi un rôle, avec des taux d'insatisfaction plus élevés chez les patients ayant souffert d'une gonarthrose post-traumatique, contrairement à ceux atteints d'une arthrite inflammatoire ou d'une gonarthrose "classique" [38].

Face à cette insatisfaction, le questionnement des choix des chirurgiens sur l'amélioration fonctionnelle concernant la forme de la prothèse, les alignements et les techniques de contrôle des coupes osseuses peut se poser.

Ainsi, concernant les alignements, il a été démontré de meilleurs résultats fonctionnels avec l'alignement dit « cinématique » par rapport à l'alignement « mécanique », préférentiellement utilisé de nos jours. Toutefois, en raison de 7% à 40% des genoux présentant des configurations en varus particulières, l'alignement cinématique n'est pas adapté et présente un risque accru d'insatisfaction. L'inverse est également vrai concernant un alignement mécanique, sur des genoux non adaptés à ce dernier [30,38,39].

Le bon positionnement des pièces constitutives de la prothèse, en respectant les axes d'alignements préétablis est aussi d'une grande importance. De léger décalage dans les angles peuvent se solder par un inconfort secondaire. Cependant, il est fréquent d'observer des décalages entre le plan théorique établi lors de la planification préopératoire et ce qui est réalisé

pendant l'intervention. Ces différences entre la planification, le déroulement peropératoire et les résultats fonctionnels suscitent toujours des débats et des controverses [38].

Enfin, la dernière source d'insatisfaction réside dans la forme même de la prothèse utilisée. Actuellement, les chirurgiens se basent sur des prothèses standards dont la conception est basée sur des moyennes de mesures anthropométriques. Cela signifie qu'elles ne prennent pas en compte les variations des anatomies propres à chaque individu. Pour pallier cette limitation, des prothèses personnalisées ont été développées. Bien que prometteuses, elles restent encore sujettes à discussion concernant leur utilisation en routine, en dehors des cas particuliers de déformations sévères [40–43].

Comme nous pouvons le constater, l'insatisfaction concernant les résultats de l'implantation d'une prothèse de genou demeure élevée. Cette insatisfaction est due à un écart entre les attentes des patients et le résultat final, ainsi qu'à la nécessité de paramétrages plus précis en fonction de l'anatomie physique et fonctionnelle de chaque patient. En effet, certains patients peuvent être plus sensibles à de légers écarts d'angle, d'axe ou de forme de prothèse. En outre, en dehors des attentes des patients, ce mécontentement peut également résulter du design de la prothèse elle-même et du geste chirurgical. Les caractéristiques de la prothèse et le geste chirurgical peuvent également jouer un rôle crucial dans la satisfaction du patient.

Pour pallier ces problèmes, la recherche s'efforce de développer de nouveaux outils associés à une prise en charge plus personnalisée [27].

5 Au-delà de l'insatisfaction : les problèmes graves

En plus de l'inconfort, cette insatisfaction et ces douleurs résiduelles peuvent également être le symptôme de problèmes sous-jacents graves, susceptibles de compromettre directement la survie de la prothèse et nécessitant sa reprise et son remplacement. Dans de tels cas, une intervention chirurgicale supplémentaire, appelée reprise chirurgicale, est nécessaire, touchant environ 8% à 12% des cas selon les séries [25,36,44,45].

5.1 Les causes

Les principales causes de reprises chirurgicales sont les descellements (39,9%), l'infection (27,4%), l'instabilité (7.5%), les fractures autour de la prothèse (4,7%) et l'arthrofibrose (4,5%) (fig 13) [36].

Les descellements sont principalement dus à des problèmes de défaut d'alignement [35], qui entraînent des hyperpressions, sources d'usure et de réactions macrophagiques. Ils sont également dus à des problèmes de fixation des composants prothétiques. Depuis 2002, toutes causes confondues, c'est la cause de révision ayant le plus fort taux d'incidence [36].

L'infection est la principale cause de révision à court terme, et la deuxième cause à long terme observée internationalement depuis 2002 [36] (figure 13). Malgré les progrès réalisés dans le traitement prophylactique par antibiotiques et dans les processus de prévention, il reste encore des avancées à accomplir en matière de diagnostic précoce et précis des organismes infectieux en cause.

Bien que l'instabilité prothétique demeure la troisième cause de révision, son incidence a diminué depuis 2002 [36]. Cette amélioration est principalement attribuable aux progrès des techniques opératoires, à l'évolution du design des prothèses (par exemple, une augmentation de l'utilisation de prothèses postéro-stabilisées) et à l'optimisation de la tension ligamentaire.

En ce qui concerne l'usure du polyéthylène, qui était considérée comme la principale cause de révision à long terme en 2002 [36], plusieurs études indiquent une diminution de son incidence au cours de la dernière décennie [36,46]. Cette amélioration résulte du progrès réalisé dans le design des implants et dans la fabrication du polyéthylène. En effet, les propriétés du matériau ont été améliorées grâce à une stérilisation par rayons gamma et à une conception dans un environnement sans oxygène, ce qui a réduit considérablement son potentiel d'oxydation.

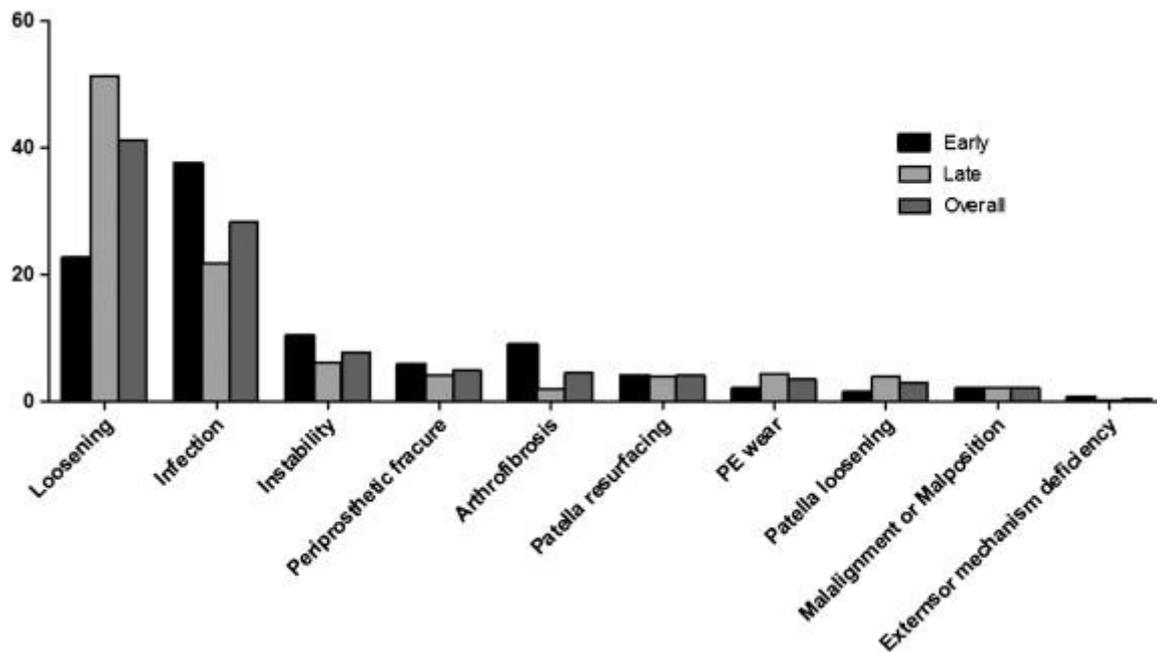


Figure 13 : Pourcentage de patients pour chaque cause de révisions. Les patients sont stratifiés en trois groupes, fonction de la période de survenue de la révision : précoce, tardive et globale [36].

5.2 Les facteurs influençant la chirurgie de révision

Les principaux facteurs qui influencent le risque de révision sont l'âge, l'activité physique, l'obésité et le sexe. [25].

En ce qui concerne l'âge, il a été démontré que les patients les plus jeunes (moins de 65 ans) présentent un risque de révision deux à cinq fois supérieur à celui des patients de plus de 65 ans. Cette disparité s'explique principalement par leur forte confiance en la durabilité de l'implant et leur importante mobilité physique. De plus, c'est la catégorie d'âge qui reprend le plus rapidement une activité sportive après l'intervention. [25,35].

L'obésité quant à elle, est source d'une augmentation des pressions sur les composants prothétiques, entraînant un risque accru d'usure ou, plus rare, de rupture.

Enfin, un individu de sexe masculin a un taux de révision lié à l'infection plus importante que celui des femmes. Aucune raison particulière ne l'explique pour l'instant [25].

5.3 Conclusion

L'arthroplastie totale du genou, en réponse aux gonalgies, représente un acte complexe mais bien maîtrisé de nos jours. L'amélioration constante des techniques médicales se traduit par la mise en œuvre d'un éventail de technologies, chacune complémentaire des autres, à toutes les étapes de la procédure chirurgicale.

6 Evolution de l'offre et de la demande

Au-delà de la simple perspective étiologique et technique liée au traitement chirurgical des gonalgies par le biais de l'arthroplastie totale du genou, il est tout aussi crucial de considérer son impact global du point de vue de la santé publique et sociétal. Cette dimension englobe différents acteurs tels que les patients, les chirurgiens, les instances publiques ou d'assurance. Leur implication est étroitement liée aux systèmes de santé propre à chaque pays.

6.1 Une population mondiale vieillissante, de plus en plus exposée au surpoids et l'obésité, et de moins en moins active physiquement

Comme vu précédemment les premiers acteurs de ce système sont les patients. Et plus particulièrement ceux souffrant d'arthrose, dont la prévalence augmente avec l'âge. Or, les études indiquent que le vieillissement de la population s'intensifiera au cours des prochaines décennies, en raison de l'augmentation de l'espérance de vie à travers le monde. On estime que d'ici 2050, la proportion de personnes âgées de plus de 60 ans atteindra 22%, soit environ 2,1 milliards d'individus [47] (figure 14).

Ce phénomène de vieillissement sera particulièrement marqué en Amérique du Nord, en Europe et en Asie. Au sein des pays de l'OCDE, la part de la population âgée de plus de 65 ans passera de 17,3% en 2017 à 26,7% en 2050, avec cinq pays (Italie, Portugal, Grèce, Japon et Corée du Sud) dépassant même les 30% [48]. En ce qui concerne la France, la proportion de personnes âgées passera d'environ 18% en 2019 à environ 25% en 2050, pour atteindre les 30% d'ici 2070 [48,49] (figure 14).

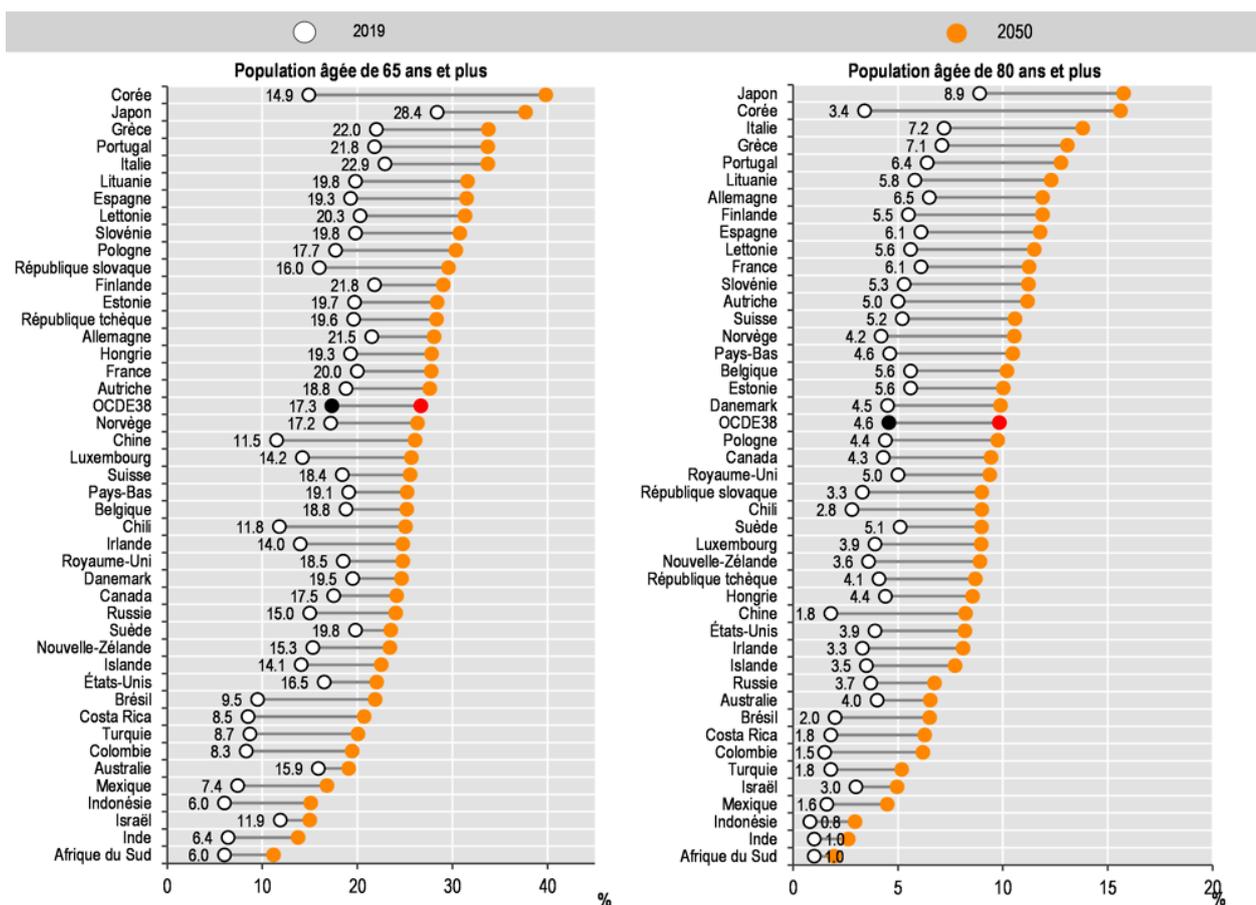


Figure 14 : Part de la population âgée de plus de 65 ans et de plus de 80 ans, 2019 et 2050.

En parallèle de ce vieillissement de la population, il convient de noter que la prévalence du surpoids et de l'obésité a continué de croître depuis 2009 à l'échelle mondiale, tant chez les adultes que chez les adolescents.

Chez les adultes, dans les 20 pays de l'OCDE disposant de données, la moyenne observée est de 60 % de la population touchée par ce problème. Cette proportion dépasse les 70 % dans des pays tels que les États-Unis (figure 15 A).

En ce qui concerne les adolescents, une analyse de la moyenne dans 27 pays de l'OCDE révèle que le taux de surpoids et d'obésité chez les jeunes est passé de 16,6 % à 18,3 % entre les périodes 2009-2010 et 2017-2018. À titre d'exemple, aux États-Unis, le pourcentage d'enfants et d'adolescents âgés de 2 à 19 ans en situation de surpoids ou d'obésité est passé de 37,4 % en 2009-2010 à 41,5 % en 2017-2018 [48] (figure 15B).

Il est important de souligner que tant chez les adultes que chez les adolescents, les hommes présentent une prévalence plus élevée que les femmes. Il est également bien établi que l'augmentation du poids exerce des contraintes significativement plus importantes sur les genoux, ce qui contribue à l'apparition de l'arthrose [1,3,4], et donc du risque d'arthroplastie du genou.

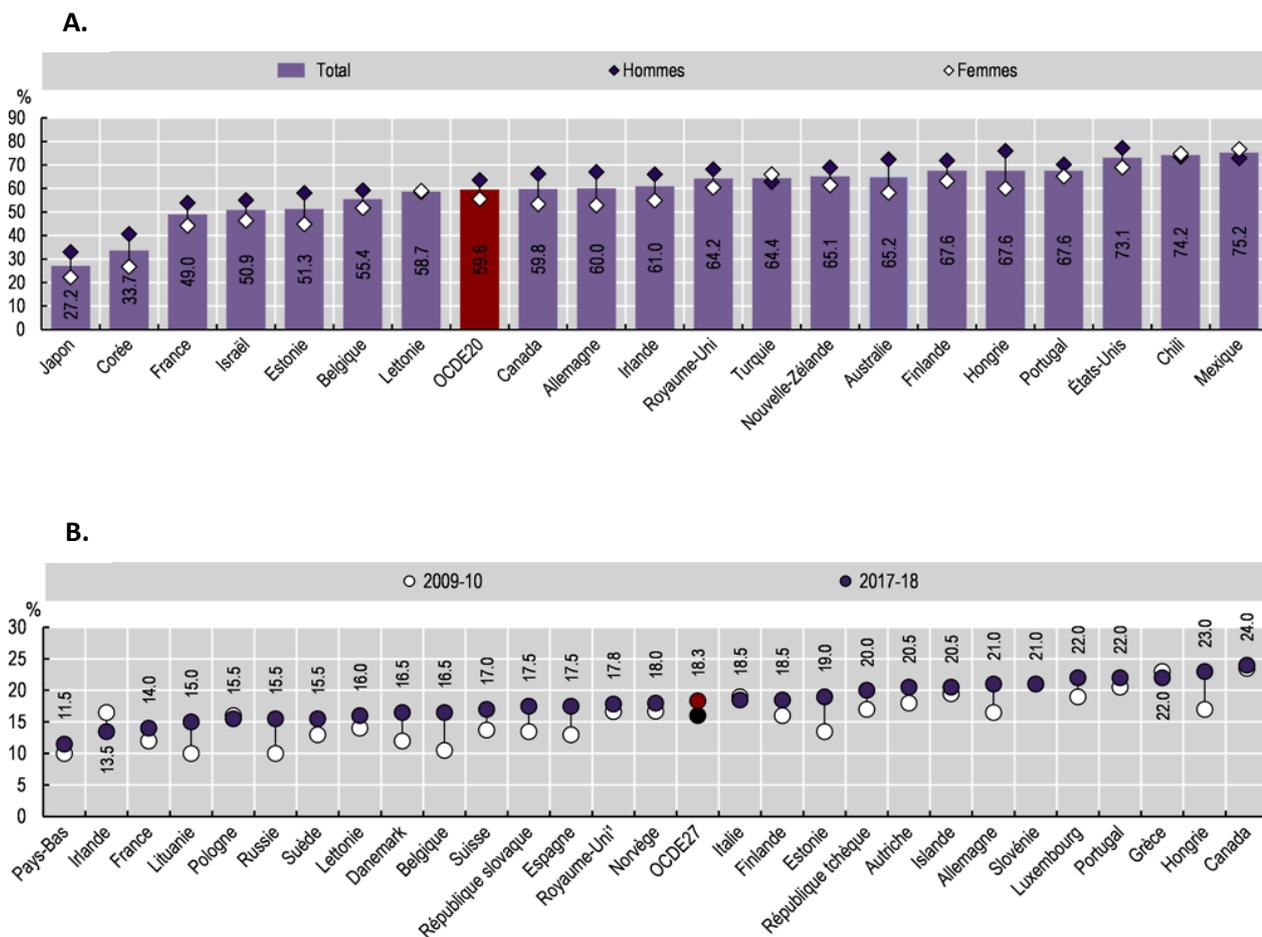


Figure 15 : **A.** Taux de surpoids mesuré (obésité comprise), chez les adultes, par sexe, 2019 (ou année la plus proche). **B.** Surpoids auto déclaré (incluant l'obésité) chez les jeunes âgés de 15 ans, 2009-10 et 2017-18

Avec l'augmentation croissante du surpoids et de l'obésité, touchant des personnes de plus en plus jeunes, les risques de développer des douleurs articulaires d'origine arthrosiques augmentent [50,51].

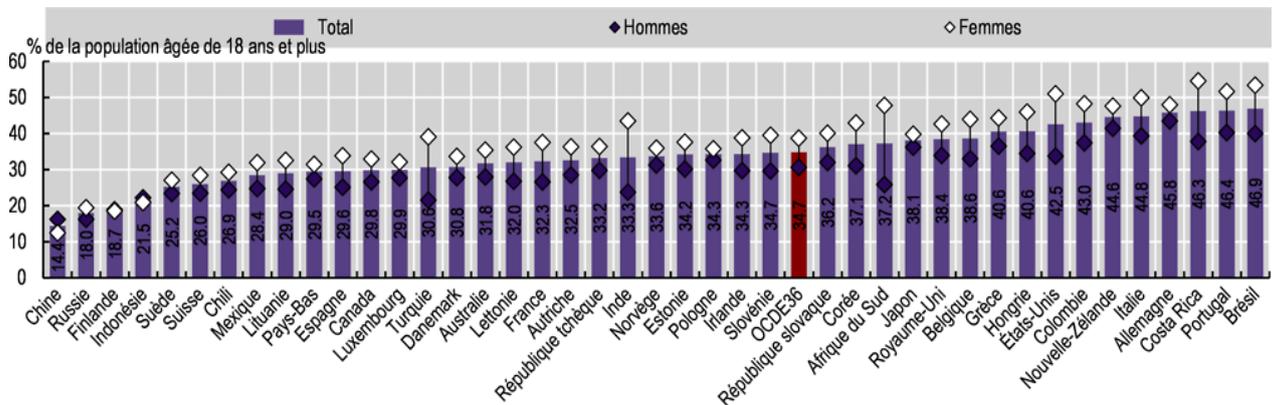
En complément des deux facteurs mentionnés précédemment, il est également important de considérer le manque d'activité physique, qui peut contribuer, entre autres (mais pas que), à l'apparition du surpoids et de l'obésité. L'activité physique régulière présente également de multiples avantages, notamment pour la santé musculo-squelettique, et joue donc un rôle dans la prévention de l'arthrose [1,3,4,48]. Malheureusement, l'engagement dans une activité physique diminue avec l'âge dans toutes les régions du monde.

Au sein des pays membres de l'OCDE, la moyenne des adultes âgés de plus de 18 ans ne pratiquant pas suffisamment d'activité physique est de 34,7 %. Ce pourcentage varie de 49,6 % au Brésil à 14,4 % en Chine (figure 16 A). En ce qui concerne les jeunes, les données de 2017-2018 révèlent que seulement 13,7 % des adolescents de 15 ans et 22,6 % des jeunes de 11 ans ont atteint le niveau recommandé d'activité physique. De plus, une importante disparité est observée entre les pays, avec des taux variant de 10 % au Danemark à 21 % au Canada pour les jeunes de 15 ans (figure 16 B). Il est intéressant de noter que, quelle que soit la tranche d'âge, les femmes pratiquent généralement moins d'activité physique que les hommes [48].

Dans leur ensemble, ces facteurs clés nous révèlent une tendance incontestable : la proportion potentielle de personnes nécessitant une arthroplastie, et par conséquent la demande pour de telles interventions, devrait connaître une augmentation significative au cours des décennies à venir. Cette augmentation sera d'autant plus marquée que les futurs patients, en réponse aux évolutions sociétales, aspireront à maintenir une vie active et en bonne santé [48].

Toutefois, en observant les tendances passées, il est manifeste que les augmentations des arthroplasties du genou ne se sont pas déroulées de manière uniforme d'un pays à l'autre [48,52]. Ces disparités reflètent ainsi de dynamiques de demande variées, influencées probablement par d'autres facteurs. D'autres paramètres, portés par l'offre sont également à prendre en compte.

A.



B.

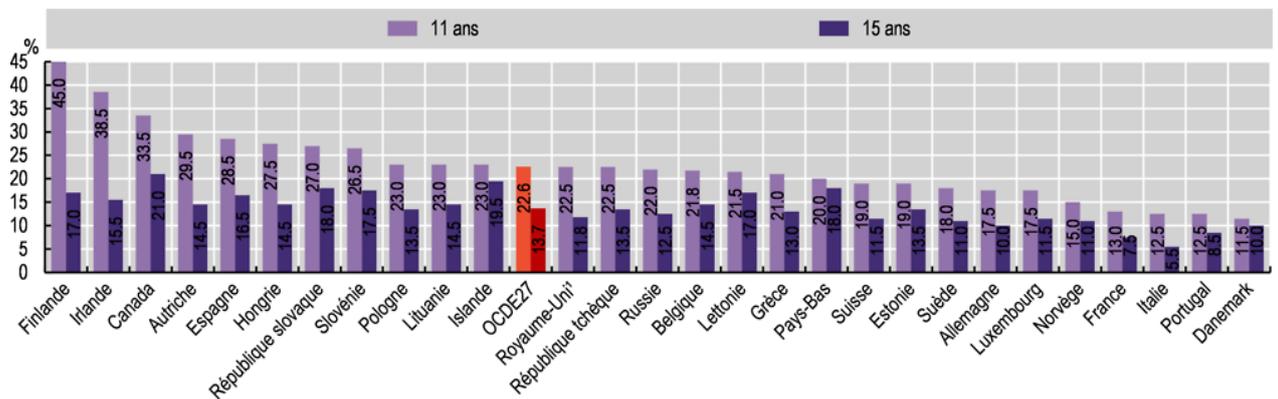


Figure 16 : **A.** Manque d'activité physique chez les adultes, par sexe, 2016. **B.** Proportion de jeunes de 11 ans et 15 ans qui pratiquent au moins 60 minutes d'activité physique modérée à vigoureuse par jour, 2017-18.

6.2 Une population jeune, souhaitant rester plus active

Au fil des années, les indications de l'arthroplastie des membres inférieurs se sont élargies pour englober une population de patients plus jeune et plus active. En effet, au cours de la dernière décennie, l'incidence de l'arthroplastie totale du genou a connu une augmentation significative, non seulement parmi les patients plus âgés (âgés de plus de 65 ans), mais également parmi les patients plus jeunes [53]. Selon les prévisions, il est envisagé que les patients de moins de 65 ans deviendront la principale population bénéficiaire d'une arthroplastie totale au cours des deux

prochaines décennies [54]. De plus, il est estimé que d'ici à 2030, jusqu'à un million d'arthroplasties totales pourraient être effectuées chez des patients âgés de moins de 55 ans.

Cette tendance découle principalement du fait que les patients plus jeunes sont de moins en moins disposés à tolérer la douleur, les incitant ainsi à envisager l'arthroplastie du genou à un âge précoce [55]. De plus, le développement de la pratique sportive a donné naissance à une nouvelle population de patients. De nombreuses études ont démontré que les personnes ayant subi des blessures sportives au genou à un jeune âge courent un risque accru de développer une arthrose du genou à la quarantaine ou à la cinquantaine [53,56,57]. Par ailleurs, les indications d'arthroplastie totale du genou se sont élargies pour inclure un éventail plus large de patients, notamment des individus plus jeunes. Cette expansion est en partie facilitée par l'introduction de nouveaux composants prothétiques reconnus pour leur longévité et leur capacité à résister à des niveaux d'activité plus élevés que par le passé. En outre, des données récentes suggèrent que les patients souffrant d'arthrose du genou peuvent être considérés comme des candidats potentiels à un âge plus précoce. Ces données renforcent l'idée que la jeunesse du patient et un meilleur état de santé préopératoire sont associés à des résultats plus favorables après la réalisation de l'arthroplastie totale du genou [53].

Cependant, il convient de noter que cette démarche expose ces patients à des risques potentiels de complications futures, ce qui pourrait éventuellement nécessiter des interventions de remplacement ultérieures [55].

6.3 Un nombre de chirurgiens en faible progression et de plus en plus sollicités

La forte demande attendue d'arthroplastie du genou aura des conséquences importantes sur la charge de travail du deuxième acteur clé de la chaîne : les chirurgiens.

Du strict point de vue du personnel de santé, il est important de noter que les chirurgiens orthopédistes affichent en moyenne un âge avancé. Par exemple, en Australie, l'âge moyen est d'environ 55 ans [58], aux États-Unis, il atteint 56,5 ans [59], tandis qu'en France, il se situe à 50 ans [60].

Ces données laissent présager de nombreux départs à la retraite lors des 15 prochaines années. En se projetant dans l'avenir, on estime que le nombre total de chirurgiens en activité pourrait diminuer de 14 % d'ici 2050 aux États-Unis [61]. En ce qui concerne la France, bien que la spécialité de la chirurgie orthopédique et traumatologique connaisse une dynamique positive avec une augmentation régulière des effectifs [60], une baisse de la densité des médecins spécialisés est projetée d'ici 2035, compte tenu du faible dynamisme de la croissance démographique [62].

Dans ces perspectives, il est essentiel d'acquérir une meilleure compréhension de la future charge de travail qui pèsera sur les chirurgiens orthopédistes au sein de chaque système national de santé. Ceci est important pour garantir que la demande croissante puisse être satisfaite tout en maintenant les normes de qualité élevées qui prévalent actuellement.

Cette pression accrue sur l'offre se fait déjà ressentir. En effet, depuis de nombreuses années, les délais d'attentes concernant les arthroplasties du genou ne cessent d'augmenter dans les pays membre de l'OCDE. Ces délais résultent cependant de complexes interactions entre la demande et l'offre de services de santé.

Du côté de la demande, ces délais sont influencés par l'état de santé de la population, les avancées technologiques médicales, les préférences des patients et la part des coûts qu'ils doivent prendre en charge. Toutefois, étant donné que la décision finale d'une intervention chirurgicale revient au chirurgien, il est impératif de prendre en compte l'offre.

De ce côté, la disponibilité des chirurgiens, des anesthésistes et d'autres professionnels de la santé au sein des équipes chirurgicales, ainsi que la présence d'équipements médicaux essentiels, jouent un rôle crucial dans les taux d'activité chirurgicale. Malgré les efforts entrepris et les variations constatées d'un pays à l'autre, la proportion de patients attendant plus de trois mois pour une arthroplastie du genou a augmenté dans la plupart des 15 pays considérés [48].

Pour répondre à la pression croissante de la demande tout en considérant les limites imposées par l'offre actuelle, les systèmes de santé disposent essentiellement de deux options : accroître le nombre d'arthroplasties réalisées quotidiennement ou augmenter le nombre de chirurgiens.

Aux États-Unis, par exemple, cela se traduirait par la nécessité de doubler le nombre quotidien d'arthroplasties du genou, ou d'augmenter le nombre de chirurgiens de 10 % tous les cinq ans pendant 30 ans, de 2020 à 2050 [61].

6.4 Une pression accrue sur les systèmes de santé

Il est attendu que la future augmentation du nombre d'arthroplasties dépassera largement la capacité des chirurgiens disponibles pour effectuer ces opérations. Cette situation exercera une pression certaine sur le système de santé, tant d'un point de vue financier que du côté des ressources humaines.

La gonarthrose et les arthroplasties qui en découlent, sont des problèmes musculo-squelettiques invalidants, s'inscrivant dans le contexte plus vaste du vieillissement de la population et de la promotion du vieillissement en bonne santé. Dans ce contexte, un accès équitable aux soins joue un rôle essentiel pour établir une société inclusive et des systèmes de santé performants [48].

Les données fournies par l'OCDE et l'Union Européenne offrent un bon aperçu global des pays dotés des systèmes de santé et des technologies nécessaires pour effectuer ces opérations chirurgicales. Ainsi, au sein de l'OCDE, la couverture universelle (ou quasi universelle) pour un ensemble de services essentiels (entre 95 et 100 % de la population) a été atteinte pour la plupart des pays. Toutefois, en 2019, cette couverture restait inférieure à 90 % au Mexique et aux États-Unis, ainsi qu'à 95 % dans cinq autres pays (Costa Rica, Pologne, Hongrie, Slovaquie et Colombie) [48].

En moyenne, en 2020, dans les pays de l'OCDE, 71 % des personnes se sont dites satisfaites de la qualité et de la disponibilité de services de santé situés à proximité de leur domicile. Le reste à charge influence également l'accès aux soins. En 2019, dans l'OCDE, les trois quarts des frais de santé étaient pris en charge par des fonds publics. Cette répartition connaît également des variations selon les pays [48].

Au regard des prévisions démographiques et épidémiologiques à venir, maintenir un niveau élevé de qualité dans les interventions d'arthroplastie du genou demeurera un défi.

Actuellement au sein de l'Union Européenne, les dépenses de santé, qu'elles soient publiques ou privées, représentent 10 % du PIB, dont 6,6 % pour les dépenses publiques. Ces pourcentages varient d'un pays à l'autre, allant par exemple de 3 % à Chypre à 9,7 % du PIB en Suède. Plusieurs facteurs influencent ces dépenses, le plus significatif étant l'âge. Les dépenses augmentent considérablement à partir de 50 ans pour les hommes et 60 ans pour les femmes [63].

Dans de nombreux pays européens, les services de santé sont principalement financés par les cotisations sociales provenant de la population active. Par conséquent, le vieillissement de la population exercera une pression accrue sur ces systèmes. Or, en raison du vieillissement combiné à une faible natalité, cette base de financement se réduira, ce qui signifie que davantage devra être prélevé pour soutenir les dépenses croissantes. Cela exigera des choix politiques et/ou organisationnels importants, dans un contexte de contraintes budgétaires, à la fois en Europe et aux États-Unis [63,64].

La baisse des remboursements envers les professionnels de santé et les hôpitaux est déjà une réalité aux États-Unis concernant les opérations de remplacements articulaires [64,65]. En Europe, les dépenses de santé sont prévues en hausse de 1,2 point de PIB d'ici à 2070 par rapport à 2019, atteignant ainsi 7,7 % du PIB. Cette projection ne prend en compte que les aspects liés à l'âge.

Bien qu'elles aient également un impact sur l'augmentation des dépenses, il est difficile de quantifier précisément la hausse des dépenses liées aux technologies de la santé, dont l'évolution est permanente. Si ces technologies sont plus efficaces et améliorent les traitements en remplaçant les anciennes méthodes sans augmenter le nombre de patients, l'impact sera limité. C'est ce que l'on appelle « l'effet de substitution ». En revanche, si l'on observe une augmentation du nombre de patients traités ou une extension des soins de santé à des procédures ou pathologies qui n'étaient pas prises en compte auparavant, que ce soit pour des raisons scientifiques (les méthodes de traitement étaient inconnues) ou économiques (les anciennes méthodes n'étaient pas abordables), cela entraînera une hausse significative des coûts. Ce phénomène est connu sous le nom de mécanisme d'expansion ou d'extension [63].

En ce qui concerne les arthroplasties articulaires, on prévoit une augmentation des actes à hauteur de 50 milliards de dollars en 2030, comparativement aux 5 milliards de dollars enregistrés en 2006 aux États-Unis [64,66]. Parmi ces arthroplasties, les interventions du genou présentent des trajectoires de projection plus dynamiques, entraînant une forte hausse de leurs coûts [52,66].

Toutefois, ces chiffres incluent l'ensemble des arthroplasties du genou, qui peuvent être séparées en deux groupes : les arthroplasties de première intention et les révisions. Dans le premier cas, il s'agit de la première intervention et, le deuxième cas représente les ré-opérations faisant suite à des problèmes post-opératoires. Le taux de reprise, qui mesure le nombre d'acte de révision rapporté au nombre d'actes total sur une année, est relativement stable depuis plusieurs années.

Il se situe entre 8% et 12% en fonction des pays [25,36,44,45]. Ainsi, compte tenu de l'augmentation prévue du nombre d'arthroplastie de première intention, le nombre de reprise augmentera également mécaniquement.

Face à cette hausse de la demande et, avec des moyens limités (voire fixes), les hôpitaux se doivent donc d'optimiser l'utilisation des salles d'opération, et cela passe notamment par une meilleure gestion des temps opératoires. Le temps opératoire englobe divers éléments tels que le temps d'anesthésie, le temps chirurgical, la rotation des patients et les périodes de nettoyage. Étant donné que tous ces éléments ont également un impact financier, certaines institutions demandent à leurs équipes médicales de planifier avec précision les durées requises pour chaque acte, en tenant compte des caractéristiques physiologiques propres à chaque patient [67]. Cette évaluation doit également prendre en compte la contrainte de la durée maximale de travail journalière et les réglementations nationales.

L'arthroplastie de première intention a un coût moyen, aux Etats-Unis, de 29 488\$ et une durée moyenne d'environ 94 minutes [68,69]. Cependant, pour les patients souffrant d'obésité, cette durée s'étend à 121 minutes [70]. Pour la France, ce coût moyen est de 13 764€ [71]. En ce qui concerne les révisions, les coûts moyens étaient, aux Etats-Unis, de 52 745\$ en 2018 (représentant une augmentation de 32,3 % par rapport à 2009, où les coûts étaient de 39 860\$) [65]. De plus, la durée moyenne des révisions opératoires est de 148 minutes [72]. Il est à noter que la durée des révisions varie en fonction de certains facteurs tels que l'obésité (151 minutes), le sexe (155 minutes pour les hommes contre 144 minutes pour les femmes) et l'âge (159 minutes pour les moins de 45 ans, 150 minutes pour ceux âgés de 45 à 64 ans, et 147 minutes pour les personnes de 65 ans et plus) [72]. Dans tous les cas, les opérations de révisions sont de deux à quatre fois plus coûteuses et durent de 1.5 à presque deux fois plus longtemps qu'une arthroplastie de première intention [73].

Pour optimiser les résultats des arthroplasties du genou au cours de la phase chirurgicale et potentiellement réduire les coûts post-opératoires, de nombreuses avancées technologiques ont été développées (voir paragraphe sur la pose de prothèses). Cependant, bien que ces améliorations aient permis d'optimiser les paramètres liés à la pose de la prothèse, il est important de noter l'existence d'un surcoût associé à leur utilisation. Ce surcoût peut s'élever, par exemple, à 1 625 \$ par chirurgie lorsqu'un robot est utilisé [74].

En ce qui concerne la durée de l'intervention, les études soulignent généralement une période d'apprentissage nécessaire, pendant laquelle la durée opératoire peut augmenter avant de diminuer par la suite. Cependant, dans certains cas, le temps opératoire revient à la durée classique [75], tandis que dans d'autres cas, il entraîne une augmentation de 15 à 20 minutes [74,76]. Malgré ces variations, toutes les études soulignent néanmoins la nécessité d'un temps supplémentaire de préparation pour l'opération.

6.5 Conclusion

En vue des défis considérables liés aux dynamiques d'équilibrage entre l'offre et la demande, ainsi que de la prévisible augmentation des coûts de prise en charge à l'avenir, répondre au besoin croissant d'arthroplasties impliquera des innovations systémiques et techniques incontournables.

7 Une réponse possible : Réduction du taux de reprise des prothèses totales de genou par numérisation (bloc opératoire, suivi patient) et automatisation

7.1 Les enjeux

Face à ce problème socio-économique, il faut ainsi augmenter la productivité, et faire mieux avec ce qui est disponible. Cela implique de continuer à innover dans l'objectif d'améliorer les processus actuels, voire de trouver d'autres voies.

Un axe d'amélioration possible concerne la réduction des taux de reprises, qui se révèlent plus iatrogènes, plus coûteuses et nécessitent deux fois plus de temps qu'une chirurgie de première intention. Les causes des reprises prothétiques sont multiples (comme mentionné précédemment). Afin d'adresser cette problématique, le projet FollowKnee [77] a été initié, et vise à revisiter la chaîne de soins grâce au développement de technologies innovantes. Son objectif ultime est de développer une prothèse personnalisée, imprimée en 3D et connectée.

La prothèse sera automatiquement personnalisée pour s'adapter à la morphologie des patients à partir de données d'imagerie médicale (examen tomodensitométrie). Elle sera ensuite conçue par impression 3D métal. La réalité augmentée, reprenant les paramètres propres au patient, aidera le chirurgien à la positionner précisément. Enfin, équipée de capteurs, elle sera le point

central d'où partira une série de données sécurisées et cryptées, qui seront analysées par les médecins pour améliorer le suivi post-opératoire et la conception des futures générations d'implants. La détection précoce des signaux de dysfonctionnement ou d'infection, tout comme la personnalisation de la rééducation post-opératoire sera facilitée.

À ce jour, même si les prothèses personnalisées sont disponibles, leur conception complexe limite leur utilisation par rapport aux prothèses standards. De plus, le suivi post-opératoire suit des protocoles uniformes pour tous les patients. Les visites de contrôle sont planifiées selon un calendrier prédéterminé, et un protocole de rééducation standard est mis en œuvre. Les échanges entre les patients et les professionnels de santé ont lieu en présentiel, lors de rencontres en face à face.

Ainsi, en réduisant les délais nécessaires à la planification et à la conception des prothèses, tout en les personnalisant, il sera possible d'éliminer le besoin de stocker plusieurs modèles de tailles différentes, ce qui potentiellement améliorerait les coûts. De même, grâce à l'intégration de capteurs, un suivi à distance deviendra réalisable, avec des alertes émises en cas de nécessité de prise en charge et des mesures régulières effectuées.

Cette approche pourrait donc considérablement alléger le suivi pour les patients, en particulier ceux présentant un faible risque, réduisant ainsi les déplacements pour les consultations et, par conséquent, les coûts associés et leur empreinte carbone. Il conviendra de prendre en compte les coûts liés à la transmission des données.

De plus, une détection précoce des infections, de l'usure ou des descellements, permettra d'anticiper et d'éviter les ré-hospitalisations. Dans ce but, les patients réaliseront régulièrement des mesures à domicile, complétées par des consultations ponctuelles. Les données ainsi recueillies seront transmises aux médecins, qui adapteront le protocole de soins.

7.2 Objets connectés et télémédecine vus par les patients et les médecins

Un des aspects important du projet FollowKnee réside dans la personnalisation de la chaîne de soin à chacune de ses étapes, grâce à des innovations spécifiques. Les innovations majeures de ce projet se concentrent sur la personnalisation préopératoire, ainsi qu'à la mise au point d'une

prothèse connectée, mesurant, via des capteurs, différents paramètres physiologiques et mécaniques sur la prothèse.

Les informations recueillies par les capteurs seront transmises à un système de réception dédié, qui les affiche, les interprète et les met à disposition des parties concernées. Ceci inclut les chirurgiens, les patients ainsi que d'autres professionnels de la chaîne de soins. Comme cela, avant et après l'arthroplastie, les parties prenantes de la chaîne de soins pourront utiliser les données à des fins de personnalisation du parcours de soins et de suivi post-opératoire.

Ainsi, la prothèse Followknee s'inscrit, en partie, dans le domaine de la télésanté, qui peut être définie comme la collecte à distance d'informations médicales, transmises de manière synchrone ou asynchrone, et qui englobe tous les aspects de la prestation de soin clinique et non clinique [78]. Cette communication peut avoir lieu entre les patients et les praticiens, ou entre deux praticiens. La communication synchrone englobe les vidéoconférences et les appels téléphoniques, tandis que l'asynchrone englobe les emails, les messages vocaux, les fax et les messageries spécifiques.

Dans le domaine de la télésanté, on distingue ainsi la télémédecine et la médecine connectée, qui comprends la télésurveillance [79]. La télémédecine correspond à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication électroniques pour fournir et soutenir les soins de santé lorsque les participants sont éloignés géographiquement. Les consultations médicales virtuelles en sont un exemple emblématique [78]. La médecine connectée, quant à elle, englobe l'ensemble des technologies utilisées pour recueillir des données médicales au moyen de dispositifs portables ou implantables, tels que les smartphones ou les capteurs, par exemple [80].

Malgré la reconnaissance de l'intérêt et des possibilités offertes par la téléconsultation, dont les taux de satisfaction sont respectivement de 89% et 98%, pour les patients et les praticiens, la transition vers une application concrète est plus complexe, particulièrement pour les praticiens et les chirurgiens [78]. Dans le domaine de la chirurgie orthopédique, où un examen physique est souvent indispensable, l'intégration tardive de cette discipline dans le domaine de la médecine virtuelle et connectée s'explique également. Pour les praticiens, des réticences d'ordre non médical s'ajoutent à ces considérations. Par exemple, seulement 20% des chirurgiens orthopédiques estiment que la téléconsultation pourrait être bénéfique pour le suivi post-opératoire, et 42% d'entre eux pensent que leurs confrères ne montreraient que peu d'intérêt

pour cette approche. De plus, 96.1% des cliniciens reconnaissent un manque de connaissance concernant les opportunités offertes par la téléconsultation [78], alors que de plus en plus de praticiens français utilisent des smartphones dans leur pratique quotidienne pour accéder à des ressources bibliographiques, des outils techniques et des scores cliniques [80].

En outre, ces considérations matérielles et de formation s'accompagnent d'une dimension financière. Bien que la téléconsultation soit plus rentable pour les institutions (e.g. la Mayo Clinic économise ainsi 450 000 \$ par an grâce aux 1800 consultations réalisées via la télémédecine, et une réduction des coûts directs de 45% en Finlande est observée) [78,80], les modèles de remboursement pour les consultations à distance peuvent décourager les chirurgiens. Étant rémunérés davantage pour les consultations physiques, celles-ci étaient naturellement privilégiées [78]. Toutefois, l'arrivée de la crise du COVID-19, avec pour corollaire l'alignement des remboursements des consultations à distance sur celles des consultations physiques, a changé les pratiques et favorisé leur usage [78,81].

Du côté des patients, le taux d'usage de la télémédecine, avant la crise du COVID-19, aux Etats-Unis, était de 10% [82]. Le taux d'accès à un service de télémédecine par vidéo est quant à lui passé de 37%, en 2019, à 67% en 2022, avec 94% de satisfaction [83]. Parmi les patients qui n'avaient pas utilisé la télémédecine, 29% d'entre eux ne l'avaient pas fait, soit parce qu'ils pensaient qu'elle n'était pas disponible pour eux, soit parce que 37% d'entre eux ne savaient pas si leur établissement de santé offrait cette possibilité [78,82]. À cela s'ajoutent quelques patients qui ont rencontré des obstacles tels qu'un accès limité (absence d'ordinateur ou de connexion Internet haut débit) ou une moindre familiarité avec les technologies informatiques ou les smartphones. Cependant, une tendance marquée ces dernières années est l'accroissement de la connectivité chez les patients, qui sont de plus en plus informés et à l'aise avec la collecte de données, qu'elles soient médicales ou non (via smartphones, Internet, montres connectées, etc.), malgré les disparités sociodémographiques [78,80].

Par ailleurs, il est à noter que certains patients, notamment ceux ayant des comorbidités comme le diabète, sont déjà familiarisés avec l'utilisation des technologies pour la surveillance constante des données médicales. L'utilisation ou la non-utilisation de la télémédecine semble ainsi être une décision personnelle. Par exemple, lorsque les coûts sont similaires, les patients tendent à privilégier les consultations en présentiel, une préférence qui diminue à mesure que la distance

géographique augmente. Le principal obstacle du point de vue des patients semble donc être la nécessité d'une formation adéquate à l'utilisation des technologies mises à leur disposition [80].

En confrontant les perspectives des patients et des praticiens, on observe donc que les patients ne sont pas réticents envers la télémédecine, à condition de recevoir une formation adéquate, contrairement aux praticiens. Bien qu'une consultation physique soit souvent nécessaire pour un suivi précis et un diagnostic complet, les praticiens font également face à des contraintes matérielles, juridiques et financières. En revanche, du point de vue institutionnel, la télémédecine a le potentiel de réduire les coûts. La crise du Covid-19 a accéléré et renforcé les téléconsultations ainsi que les suivis à distance [78]. Cela s'explique d'une part par les impératifs sanitaires et d'autre part par une mesure exceptionnelle instaurant une parité de remboursement entre les consultations physiques et virtuelles [78,84].

La question de savoir si cette évolution se maintiendra après la crise remet en cause la pérennité des nouvelles pratiques instaurées pendant cette période exceptionnelle. En conséquence, étant donné que de nombreux praticiens proposent désormais des consultations à distance et que les patients se sont habitués à ces technologies, il est possible que ces derniers se détournent de ceux qui ne proposent plus cette option.

7.3 De l'acceptabilité à l'acceptation

Au-delà de la période post-Covid-19, il est important de souligner que pour qu'un système aussi performant et innovant soit-il, puisse réellement être intégré dans la pratique quotidienne des médecins et des patients, il doit être accepté. En effet, l'introduction d'une nouvelle technologie au sein d'une organisation peut entraîner de nombreux bouleversements et nécessiter des reconfigurations structurelles.

À partir de là, deux notions émergent et nécessitent une analyse : l'acceptabilité et l'acceptation. La première fait référence aux perceptions individuelles concernant une technologie future et se positionne en amont de son introduction. En revanche, la seconde se focalise sur l'expérience vécue par les individus lors de la mise en place d'une technologie. Autrement dit, l'étude de l'acceptabilité s'applique lorsque la technologie n'existe pas encore, contrairement à l'acceptation qui concerne une technologie déjà existante [85,86].

L'étude de l'acceptabilité peut être schématiquement envisagée comme une anticipation de l'usage, dans laquelle l'utilisateur est amené à évaluer préalablement les coûts et les avantages (i.e. Coût-bénéfices) selon différents critères. Cette évaluation se fait à l'aide de méthodes visant à solliciter les préférences, telle que la méthode des choix discrets, par exemple [85,86].

En revanche, l'étude de l'acceptation consiste en une analyse des conséquences de l'utilisation des technologies sur divers aspects de l'activité professionnelle. Pour cela, elle fait appel à des approches méthodologiques telles que le modèle TAM (Technology Acceptance Model) ou l'UTAUT (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology). Si les apports de ces deux approches sont importants dans le processus de diffusion des technologies, chacune concerne donc un temps privilégié dans le processus d'adoption des technologies et ne saurait rendre compte de la totalité et de la complexité des processus psychologiques en jeu entre les utilisateurs et la prothèse personnalisée et connectée Followknee [85,86].

Ainsi, l'acceptabilité vise à évaluer les chances d'adoption des technologies, réduisant ainsi les risques de rejet éventuel en ajustant, si nécessaire, le projet de changement et/ou la technologie elle-même. Cette évaluation peut s'appliquer à des choix ou des situations hypothétiques. D'autre part, basée sur l'expérience et les perceptions des utilisateurs, l'acceptation évalue les impacts concrets de la technologie sur divers aspects du système d'activité. Elle permet ainsi de réaligner le rôle et la place de l'outil au sein de ce système de travail. Contrairement à l'acceptabilité, elle requiert un objet réel à évaluer [85,86].

7.4 L'évaluation médico-économique

Pour comparer les coûts du système "FollowKnee" avec le schéma actuel, on peut mener trois types d'analyses médico-économiques : (1) coût-efficacité, (2) coût-utilité et (3) coût-bénéfice.

L'analyse coût-efficacité évalue l'efficacité de deux stratégies en associant les coûts d'une intervention médicale à ses résultats cliniques. Cette approche se concentre sur un critère clinique unique.

L'analyse coût-utilité relie les coûts d'une intervention médicale à son impact sur la qualité de vie. Les effets sont quantifiés en années de vie pondérées par la qualité (QALY), reflétant la réponse du

patient au traitement. Cette méthode intègre des évaluations subjectives, dépendant des préférences individuelles et de l'environnement.

L'analyse coût-bénéfice évalue si les bénéfices d'une intervention médicale surpassent ses coûts. Elle attribue des valeurs non monétaires aux conséquences de différentes stratégies, basées sur ce que les individus seraient prêts à payer pour les obtenir. Plusieurs méthodes sont disponibles pour déterminer ces valeurs, comme l'évaluation contingente, l'analyse conjointe et la méthode des choix discrets.

Étant donné que les prothèses personnalisées et connectées ne sont pas encore présentes dans le domaine de l'orthopédie, les deux premiers types d'analyses ne sont pas réalisables. Ces analyses nécessitent des essais cliniques comparant la solution "FollowKnee" aux prothèses existantes, mais ces essais n'ont pas encore commencé dans le cadre du projet.

De plus, ces analyses requièrent de se concentrer sur des aspects spécifiques de la solution "FollowKnee" et de les examiner individuellement. Cependant, "FollowKnee" est une combinaison de plusieurs éléments indépendants les uns des autres (personnalisation de la prothèse, capteurs, réalité augmentée, etc.) qui, ensemble, pourraient améliorer l'efficacité après l'opération.

Le principal défi auquel nous sommes actuellement confrontés est que ces solutions sont toujours en développement, et que les méthodes décrites nécessitent un point de comparaison existant. Seules les méthodes issues de l'analyse coût-bénéfice (comme l'analyse conjointe ou la méthode des choix discrets) permettent de simuler des scénarios hypothétiques [87].

Il faut également noter ici que seules les deux premières méthodes sont autorisées par la Haute Autorité de Santé (HAS) en France comme méthode de référence. Elles sont nécessaires avant l'autorisation de mise sur le marché. La troisième est autorisée en méthode complémentaire, à condition de suivre les protocoles internationalement reconnus [88].

8 Conclusion

En raison du vieillissement de la population et de facteurs sociodémographiques tels que le surpoids, l'obésité et le niveau d'activité physique, la demande pour cette intervention chirurgicale devrait continuer à augmenter de manière significative dans le futur.

Face à cela, l'offre (c'est-à-dire le nombre de chirurgiens et la capacité des hôpitaux) et les contraintes budgétaires liées à l'équilibre financier des systèmes de santé exercent des pressions sur la capacité des systèmes nationaux à faire face à la forte demande attendue.

Pour surmonter ces défis liés à l'équilibre entre l'offre et la demande, ainsi qu'à l'augmentation prévisible des coûts de prise en charge, des innovations systémiques et techniques deviennent indispensables.

Dans ce contexte, le projet FollowKnee a été mis en place. Son objectif est de revoir l'actuelle chaîne de soins en concevant une prothèse personnalisée imprimée en 3D et connectée. Ce projet vise à améliorer les procédures de première intention, ainsi qu'à détecter et anticiper les complications postopératoires de manière plus efficace. On prévoit ainsi une réduction des interventions de reprise, qui sont à la fois plus coûteuses et chronophages. Des gains sont donc anticipés à chaque étape, que ce soit avant, pendant ou après l'opération.

Cependant, face à ces innovations, certaines pouvant être disruptives, il est essentiel d'obtenir l'adhésion des utilisateurs, qu'il s'agisse des médecins, des patients ou des établissements hospitaliers. Pour y parvenir, il est impératif d'effectuer des analyses de préférences, permettant ainsi de prévenir les risques de rejet et d'améliorer divers aspects.

Objectifs de la thèse

La chirurgie de remplacement articulaire par prothèse du genou est devenue courante dans de nombreux pays, avec une augmentation constante du nombre d'implants posés.

Plusieurs facteurs, tels que le vieillissement de la population, l'amélioration des résultats chirurgicaux et la qualité des implants, ainsi que les attentes croissantes des patients jeunes atteints d'arthrose précoce, expliquent cette tendance.

Face aux défis futurs liés à la croissance attendue des interventions d'arthroplastie du genou et à l'augmentation prévisible des coûts de prise en charge, des innovations systémiques et techniques sont indispensables. Les acteurs de l'industrie de la santé et les chercheurs s'efforcent donc constamment d'améliorer les technologies et les processus.

C'est dans ce contexte que le projet FollowKnee a été initié, visant à repenser la chaîne de soins actuelle en concevant une prothèse personnalisée et connectée.

Toutefois, au-delà de l'aspect purement technique, se pose la question du bénéfice médico-sociétal, en tenant compte du marché.

Dans une première partie, nous examinerons les tendances générales du marché des prothèses de genou de première intention. En effet, de nombreux pays ont mis en place des mécanismes de recensement de ces interventions afin d'anticiper au mieux les évolutions potentielles dans les systèmes de soins. Ces pays ont également entrepris des analyses, à la fois rétrospectives et prospectives.

Cette première partie, ayant pour objectif de décrire les dynamiques actuelles dans divers pays, sera composée de trois articles :

- Article 1 : Etat de l'art mondial des études rétrospectives et prospectives.
- Article 2 : Analyse comparée des dynamiques de croissance. Focus sur l'Europe
- Article 3 : Focus sur la France. Analyse rétrospective et projection à 2050.

L'acte d'arthroplastie du genou implique dans sa réalisation, deux chainons essentiels que sont le patient et le chirurgien. De leurs réactions, et de leurs attentes découleront le succès, ou l'échec des prothèses connectées.

Dans une deuxième partie, nous nous intéresserons au sujet de l'acceptabilité des solutions proposées par les chirurgies. En effet, face à ces innovations, certaines pouvant être disruptives, il est essentiel d'obtenir leur adhésion. Ainsi, compte tenu des nombreuses technologies développées au cours des dernières années et intégrées dans la prothèse FollowKnee, se pose la question du positionnement des chirurgiens à leur égard.

Cette deuxième partie, ayant pour objectif de comprendre les préférences des chirurgiens vis-à-vis des nouveautés introduites par la prothèse personnalisée et connectée, sera composée de deux articles :

- Article 4 : Préférences des chirurgiens vis-à-vis d'une prothèse personnalisée et connectée.
- Article 5 : Positionnement des chirurgiens vis-à-vis de l'impression 3D

Article 1

1 Titre

Les arthroplasties du genou : une revue systématique internationale des tendances épidémiologiques rétrospectives et prospectives.

2 Objectif 1

Malgré la tendance générale observée dans plusieurs pays pris individuellement, indiquant une augmentation des arthroplasties du genou au fil des années, des disparités sont mises en évidence par certains organismes internationaux. L'OCDE, par exemple, signale ces variations.

Partant de l'observation que les études sont très majoritairement basées sur le pays d'origine du rédacteur, l'objectif de ce premier article est de réaliser un état de l'art comparatif des tendances observées jusqu'à présent, tout comme les projections futures envisagées.

Une cartographie mondiale sera ainsi réalisée.

3 Article

Les arthroplasties du genou : une revue systématique internationale des tendances épidémiologiques rétrospectives et prospectives.

Mathieu LE STUM^{a, b *}, Myriam LE GOFF-PRONOST^c, Eric STINDEL^{a, d}

^a Université de Brest, UBO, LATIM, UMR 1101, 22 Avenue Camille Desmoulins, 29200 Brest, France

^b Institut national de la santé et de la recherche médicale, INSERM, Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale (LATIM), UMR1101, 22 Avenue Camille Desmoulins, 29200 Brest, France.

^c Institut Mines-Telecom, IMT Atlantique, LATIM - INSERM UMR 1101, M@rsouin, 655 Avenue du Technopôle, 29280 Plouzane, France,

^d Centre Hospitalo-Universitaire de Brest, CHRU Brest, LATIM, UMR 1101, 2 Avenue Foch, 29200 Brest, France

* Auteur correspondant : Mathieu Le Stum, Université de Brest, UBO, INSERM, Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale (LATIM), UMR1101, 22 avenue Camille Desmoulins, 29200 Brest, France

Mail mathieu.le-stum@univ-brest.fr

Mots clés : Epidémiologie, genou, arthroplastie, international

Résumé

En raison du vieillissement de la population, les maladies dégénératives du genou, notamment l'arthrose, augmentent depuis plusieurs années. Cela entraîne une détérioration de la qualité de vie. Si les douleurs persistent de manière insupportable, une solution peut être la pose d'une prothèse de genou. Ces dernières, apparues au 19^e siècle, ont évolué en tenant compte de l'anatomie, du mouvement et de l'apport de la chirurgie assistée par ordinateur, en devenant une option thérapeutique privilégiée. Cela a conduit à une augmentation constante des arthroplasties du genou, surtout depuis les années 1990. Cependant, les études menées dessus jusqu'à présent se sont concentrées sur un seul pays et les comparaisons entre pays sont rares. Il devient donc pertinent de se demander si les tendances sont similaires d'un pays à l'autre.

Une analyse approfondie de la littérature scientifique a été menée en explorant les bases de données "PubMed", "Web of Science" et "Cochrane" pour la période allant de 2005 à 2022. La recherche a été menée en utilisant les mots-clés : "Knee + Arthroplasty + Trends + Replacement + Epidemiology". Les titres et les résumés ont été examinés indépendamment par deux évaluateurs afin d'en exclure les non pertinents ou en double. Seuls les articles présentant une analyse nationale, basée sur un référencement reconnu à l'échelle nationale par les systèmes de santé ont été inclus.

Les données concernant les arthroplasties du genou proviennent principalement de deux sources principales : (I) les bases de données nationales et (II) les échantillons représentatifs extrapolés. Les méthodes d'extraction des données utilisent des codes qui sont basés soit sur un système d'identification précis et uniforme au niveau national, soit sur des définitions précises lorsqu'ils ne sont pas spécifiés. Les taux de croissance présentent tous des valeurs positives en termes de volumes et de taux d'incidences, mais ils varient d'un pays à l'autre, montrant des dynamiques distinctes. De plus, à l'intérieur de certains pays, différentes phases peuvent être identifiées. Quand il est fait référence au sexe, bien que les femmes aient des volumes et des taux d'incidence plus élevés en termes absolus, les hommes connaissent une croissance plus rapide. En ce qui concerne les prévisions futures, diverses méthodes de régression (Poisson, linéaire ou logistique) sont utilisées pour prolonger les tendances actuellement observées.

En analysant l'ensemble des systèmes de recensement disponibles, il est observé que les arthroplasties du genou connaissent une croissance dans tous les pays étudiés. Cependant, cette croissance n'est pas uniforme, et présente des variations en termes d'intensité (faible, élevée), qui dépendent également des périodes étudiées. Les causes de ces disparités sont multifactorielles, mais semblent suivre un schéma similaire, bien que décalé dans le temps en fonction du niveau du développement économique des pays.

Introduction

L'articulation du genou est soumise à de nombreuses contraintes mécaniques dans la vie quotidienne. Au fil du temps, le vieillissement, ainsi que des problèmes dégénératifs tels que l'arthrose et l'arthrite, en plus de traumatismes dus à une activité physique intense passée et présente, tout comme un surpoids ou obésité, peuvent altérer son bon fonctionnement [1]. L'arthrose, en particulier, représente la principale cause de dégénérescence du genou, affectant considérablement la qualité de vie de près de 40 millions de personnes en Europe [2]. De plus, on estime que la moitié de la population mondiale âgée de 65 ans et plus est touchée par cette affection [3]. Progressivement, ces problèmes détériorent le cartilage articulaire, entraînant des douleurs chroniques et engendrant d'importants coûts socio-économiques [4].

Dans la prise en charge actuelle de ces pathologies, un traitement symptomatique initial par médicament est généralement mis en œuvre. En cas de persistance des douleurs et de leur caractère insoutenable, la chirurgie d'arthroplastie du genou est alors envisagée. Cette intervention a pour objectif de substituer la partie lésée de l'articulation par une prothèse métallique. Le remplacement peut être total, impliquant la résection complète de l'articulation pathologique, ou partiel, où seule la partie endommagée est substituée.

Depuis les premières prothèses totales de genou apparues au XIXe siècle jusqu'aux implants les plus récents, les avancées techniques et les matériaux utilisés dans les arthroplasties du genou n'ont cessé de progresser, témoignant ainsi d'une évolution continue [5]. Ces améliorations, non linéaires dans le temps, ont connu une accélération à partir des années 1980 grâce à une meilleure prise en compte des aspects liés au mouvement et à l'anatomie [6]. L'avènement de la chirurgie assistée par ordinateur dans les années 1990 a depuis, renforcé ces avancées [7].

L'efficacité des interventions de remplacement articulaire dans le traitement des pathologies du genou est solidement établie, et constitue une option thérapeutique préférentielle. Au cours de ces dernières années, on observe une augmentation constante du nombre d'arthroplasties du genou, tendance largement documentée dans des pays tels que les États-Unis [8–10], la Suède [11] et l'Australie [12]. Cette évolution est étudiée non seulement rétrospectivement, mais également avec une projection prospective pour les décennies à venir. Outre les pays

préalablement mentionnés, de nombreux autres pays ont également procédé à des analyses approfondies à l'échelle nationale. Toutefois, à notre connaissance, aucune synthèse de ces études n'a été réalisée afin de comparer les similitudes et les différences entre les pays.

Dans le cadre de notre revue systématique de littérature, focalisée sur les interventions d'arthroplastie du genou, nous avons défini les questions suivantes :

- Quelles sont les types de bases de données utilisées
- La codification des actes d'arthroplasties du genou peut-elle servir pour une comparaison internationale ?
- Comment évoluent rétrospectivement les tendances épidémiologiques ?
Quelles sera la dynamique des projections en fonction des pays ?

Matériel et méthode

Une revue exhaustive de la littérature scientifique, suivant les directives PRISMA, a été réalisée en explorant les bases de données spécialisées « PubMed », « Web of Science » et « Cochrane ». Dans le but d'obtenir une couverture maximale et d'identifier les tendances à long terme, la période de publication considérée s'étend de 2005 à 2022.

Une recherche générale dans ces bases de données en utilisant des mots-clés suivant : "Knee + Arthroplasty + Trends + Replacement + Epidemiology » a été menée. Les pays couvrant les régions de l'Europe, de l'Asie, de l'Amérique du Nord, de l'Amérique du Sud, de l'Australie/Nouvelle-Zélande et de l'Afrique ont été inclus dans cette recherche approfondie. Il convient de noter que les îles des Caraïbes et du Pacifique n'ont pas été prises en compte dans cette analyse. Les titres et les résumés ont été examinés indépendamment par les auteurs afin d'en exclure les non pertinents, en fonction des critères d'admissibilité, ou en double. Seuls les articles, rédigés en anglais, ont été pris en compte, au contraire des résumés et des articles de conférences.

Les critères d'inclusion exigeaient que les articles présentent une analyse épidémiologique significative au niveau national. Les articles qui se concentraient exclusivement sur un nombre limité de provinces, d'États ou de régions, ainsi que ceux qui portaient sur un nombre restreint et non significatif d'établissements hospitaliers, ont été exclus de notre étude. Les articles devaient se baser sur une base de données d'envergure nationale. Ils devaient également inclure des codes d'identification ou des définitions des actes médicaux reconnus au niveau national par les autorités de santé. Les analyses utilisant des bases de données non approuvées par les autorités et des codes propres n'ont pas été pris en compte. En outre, les articles devaient fournir au minimum les informations suivantes : le nom de la base de données source, le pays concerné, la période d'étude, le volume ou le taux d'incidence des actes, ainsi que les tendances observées.

Résultat

Articles sélectionnés

Suite à la mise en œuvre de la première méthode, un total de 598 articles a été recensé dans la base de données "PubMed", 24 dans celle de Cochrane, tandis que 109 articles ont été identifiés dans la base "Web of Science". Parmi ces 731 articles, 630 ont été éliminés après une première lecture basée sur leurs titres et résumés, laissant 101 articles à prendre en compte. Parmi ces derniers, 20 articles présentaient des doublons entre les résultats trouvés dans les bases de données "PubMed" et "Web of Science". Après avoir évalué leur admissibilité, 81 articles ont été sélectionnés pour une lecture complète, et 35 d'entre eux ont finalement été exclus.

Parmi ces articles, 38 se concentrent sur un pays spécifique, quatre présentent une revue, un propose une analyse internationale et trois effectuent une comparaison entre différents pays. Ces trois derniers articles comparaient les quatre pays nordiques (Danemark, Finlande, Norvège et Suède) [13], les quatre pays nordiques et l'Australie [14] et les Etats-Unis avec l'Allemagne [15]. Les articles sont regroupés en trois grandes catégories : (i) 57% (n=26) se focalisent exclusivement sur des aspects épidémiologiques, (ii) 26% (n=12) réalisent une analyse mixte

combinant l'épidémiologie et des projections futures, et (iii) 17% (n=8) se concentrent uniquement sur des projections.

Répartition géographique

Sur la période étudiée, un total de 16 pays distincts a été examiné (tableau 1). L'Europe représente le continent le plus fréquemment analysé, avec 23 occurrences de pays (47%), suivi de l'Amérique du Nord (11, 22%), de l'Asie (10, 20%), de l'Océanie (4, 8%) et de l'Amérique du Sud (1, 2%).

Source des données et codage (tableau 1)

Les données relatives aux arthroplasties du genou sont obtenues à partir de deux principales sources de données : (I) les bases de données nationales et (II) les échantillons représentatifs (tableau 1). Les bases de données nationales fournissent des données de comptage provenant de l'ensemble des centres de soins. Elles sont compilées dans des registres ou des bases de données. Elles sont prédominantes parmi les pays étudiés. Les échantillons représentatifs sont basés sur un échantillon représentatif national d'hôpitaux et/ou de centres de soins. Les données sont ensuite extrapolées à l'ensemble de la population du pays ou étudiées au niveau de l'échantillon. Parmi les exemples, on retrouve le NIS (National Inpatient Sample) aux États-Unis (couvrant 20% de la population) et le CPRD (Clinical Practice Research Datalink) au Royaume-Uni (couvrant les médecins généralistes).

Les pays disposant de bases de données nationales les utilisent pour toutes leurs études. Les États-Unis, qui est le pays le plus fréquemment étudiés, n'utilisent que des échantillons représentatifs. Cependant, le NIS est prédominant (n=9), par rapport au NHDS (n=1) et à MedPar (n=2). Le Royaume-Uni et le Japon utilisent les deux types de sources. Enfin, l'Allemagne est le seul pays à utiliser une agglomération de bases de données des assurances régionales (tableau 1).

Les codes utilisés pour l'extraction des données reposent soit sur un système d'identification précis et homogène au niveau national, soit ils ne sont pas spécifiés, mais définis de manière précise (souvent le cas des registres). Les actes sont ainsi décrits de manière nominative en fonction des codes utilisés et de leur regroupement. Par conséquent, les prothèses totales de genou (PTG), les prothèses unicompartmentales (PUC) et les révisions sont analysées séparément dans 10 articles (22%). Les PTG et les PUC sont regroupées dans 32 articles (69%), dont dix incluent en plus une étude sur les révisions. Enfin, quatre articles (9%) regroupent l'ensemble des types de prothèses (PTG, PUC et révisions) (tableau 1).

Seuls quatre pays (Autriche, Chili, Italie et Nouvelle-Zélande) ont fait l'objet d'une seule étude. Tous les autres pays ont été étudiés au moins deux fois. Les pays les plus étudiés sont les États-Unis (n=11), l'Allemagne (n=5), la Corée du Sud (n=5) et le Danemark (n=4).

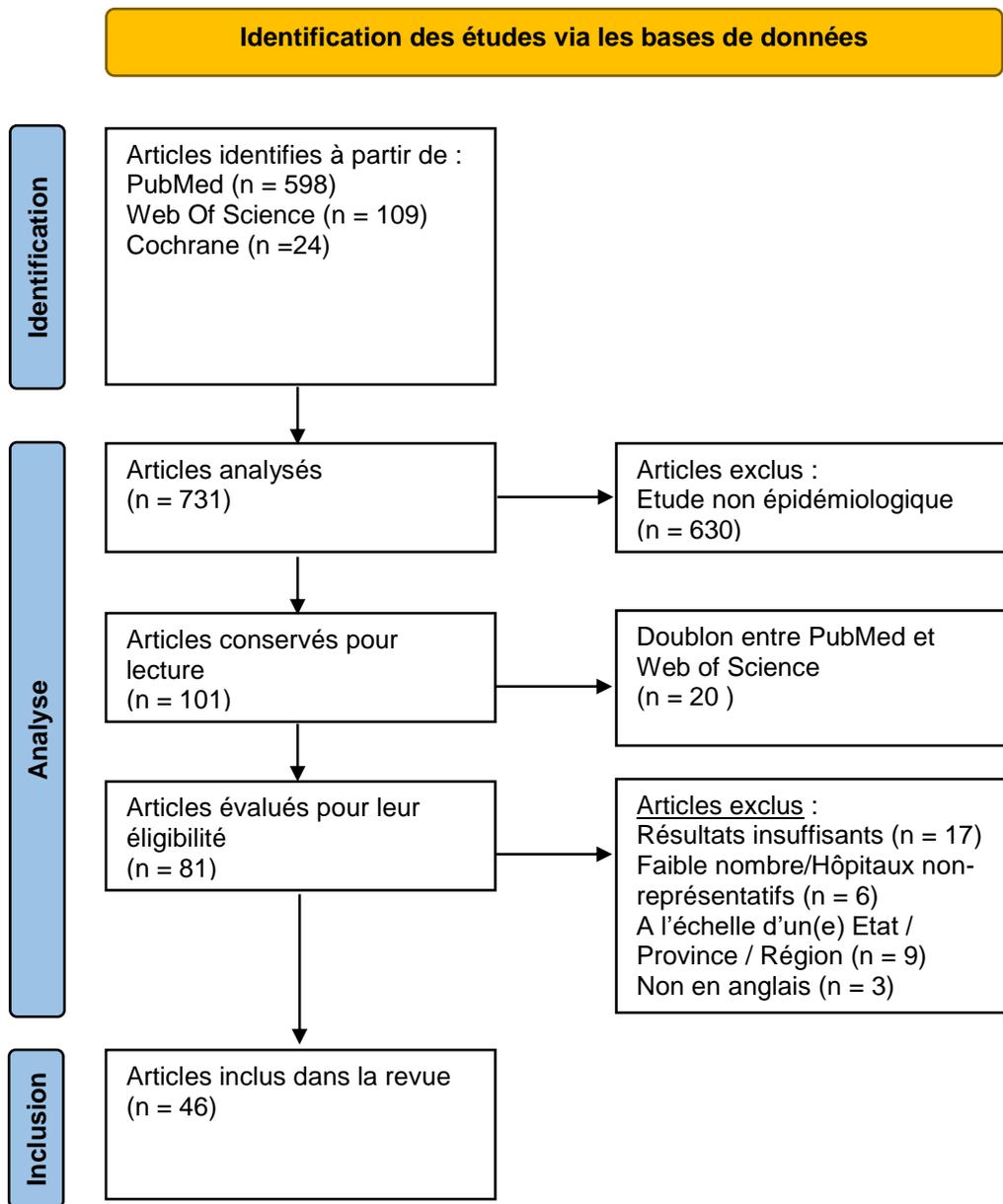


Figure 1: Diagramme de flux PRISMA. n : nombre

		Base de données sources		Identification des données	
Pays	Nb articles	Type	Nom	Code (nombre d'occurrences dans les articles)	Acte (nombre d'articles traitant l'acte)
Allemagne	5	National Echantillon représentatif Régional	Destatis (x2), BQS DRG Assurances régionales	OPS 5-822 (x5) OPS 5-823 (x1)	PTG+PUC (x5) Révisions (x1)
Australie	3	National	AOANJRR	49518, 49519, 49521, 49524 (x3) 49517 (x1)	PTG (x3) PUC (x1)
Autriche	1	National	National Arthroplasty Register	non précisé	PTG+PUC (x1) Révisions (x1)
Chili	1	National	DEIS (Chilean Departement of Statistique and Health Information)	2104153 (x1)	PTG+PUC+Révisions (x1)
Corée-du-Sud	5	National	HIRA (Health Insurance Review and Assessment service)	N2072 et N2077. (x4) N3712/ N3722/N4712/N4722/N3717/N3727/N4717 /N4727. (x1) N3712 et N3722. (x1) N4712 et N4711. (x1) Ja-71-(2) (x1)	PTG (x2) Révisions (x2) Révision PTG (x1) Révision PUC (x1) PTG+PUC (x2)
Danemark	4	National	DKR (Danish Knee Register)	non précisé	PTG+PUC (x4) Révisions (x1)

		Base de données sources		Identification des données	
Pays	Nb articles	Type	Nom	Code (nombre d'occurrences dans les articles)	Acte (nombre d'articles traitant l'acte)
Etats-Unis	11	Echantillon représentatif	NIS (National Inpatient Sample) NHDS (National Hospital Discharge Survey) MedPar (Medicare Provider Analysis and Review)	ICD9-CM 81.54 (x11) ICD-9CM 81.55 (x4)	PTG+PUC (x11) Révisions (x4)
Finlande	2	National	Finish Knee Register (PTG) Finnish Hospital Discharge Register (PUC)	non précisé	PTG (x2) PUC (x2)
France	2	National	SNDS/PMSI (Système Nationale des Données de Santé)	NFKA006, NFKA007, NFKA008, NFKA009, NFMA006. NFKA001, NFKA002, NFKA003, NFKA004, NFKA005, NFLA001, NFLA002, NFGA001, NFGA002. NFKA007, NFKA008, NFKA009, NFMA006	PTG+PUC (x1) Révisions (x1) PTG (x1)
Royaume-Unis	3	Echantillon représentatif National	CPRD (Clinical Practices Research Datalink) NJR (National Joint Registry)	OXMIS (x2) Non précisé (x1)	PTG+PUC (x2) PTG et PUC (x1)
International	1	En fonction du	OCDE	ICD9-CM 81.54 (x1)	PTG+PUC (x1)

Pays	Nb articles	Base de données sources		Identification des données	
		Type	Nom	Code (nombre d'occurrences dans les articles)	Acte (nombre d'articles traitant l'acte)
		pays			
Italie	1	National	HDD (National Hospital Discharge Database)	ICD9-CM 81.54 (x1)	PTG+PUC (x1)
Japon	3	Echantillon représentatif National	DPC (Diagnostic Procedure Combination database) NDB-ODJ (National Database of Health Insurance)	K082-1 (x1) K082 (incluant K082-2+K082-3) (x1)	PTG et PUC (x1) PTG+PUC+Révision (x2)
Norvège	2	National	Norwegian Arthroplasty Register	non précisé	PTG et PUC (x2)
Nouvelle-Zélande	1	National	New Zealand Joint Register	non précisé	PTG+PUC (x1)
Suède	3	National	Swedish Knee Arthroplasty Register	non précisé	PTG et PUC (x1) PTG+PUC (x2)
Taiïwan	2	National	Bureau of National Health Insurance	ICD9-CM 81.54 (x2) ICD9-CM 81.55 (1)	PTG+PUC (x2) Révisions (x1)

Tableau 1 : Type des sources et liste des codes utilisés par pays dans les articles. Les codes utilisés représentent le type d'acte tel qu'ils sont référencés dans les bases utilisées. En face du code se trouve l'acte correspondant.

Analyse épidémiologique (tableaux 2)

Les articles étudiés portent sur des plages d'années différentes. La période moyenne pour les articles portant sur les PTG (tableau 2A) est de $9,7 \pm 1,9$ ans. Pour les articles couvrant à la fois les PTG et les PUC (tableau 2B), la période moyenne est de $14,9 \pm 8,5$ ans. Enfin, pour les articles englobant l'ensemble des prothèses (tableau 2C), la période moyenne est de 6.5 ± 7 ans. L'étude des taux de croissance a révélé une tendance positive tant en termes de volume que de taux d'incidence. Cependant, il convient de noter que ces taux de croissance varient en fonction des pays et des périodes étudiées.

Il est observé que la majorité des pays étudiés ($n=21$, 46.7%) analysent des données couvrant la période des années 2000 (entre 2001 et 2005) jusqu'au milieu de la deuxième décennie (entre 2010 et 2015). Un autre groupe inclut la période du milieu des années 1990 jusqu'aux années 2010 ($n=12$, 26.7%). Une seule étude prend en compte la décennie 1990-2000 ($n=1$, 2.2%). Les années 2010 à 2019 sont prises en compte dans 9 études ($n=9$, 20.0%). Enfin, seules deux études (4.4%) incluent les années 1970 à 2010. En analysant les taux de croissance en volume de tous les regroupements de prothèses effectués sur cette période (tableau 2A, 2B et 2C), on observe que l'Allemagne [15–19], l'Autriche [20], la Grande Bretagne [21] et le Japon [22,23] affichent les taux les plus bas, variant entre 9 et 35%. Un groupe de pays comprenant, la Finlande [13,14] et la France [1,24] présente une croissance intermédiaire d'environ 50 à 60 %. Les autres pays ont des taux de croissance supérieurs à 80 % (Suède, Norvège) [11,13,14], voire dépassant les 100 %. Les plus fortes croissances s'observent pour le Danemark (+613%) [25] et la Corée du Sud (+407%) [26]. Ces observations sont également valables pour les taux d'incidence des différentes catégories de pays.

En comparaison avec les autres régions du monde, l'Europe se caractérise globalement par les taux de croissance les plus faibles (60% et moins). Toutefois, l'analyse révèle des variations importantes entre les pays européens. Par exemple, les données recueillies pour le Danemark (1997 à 2019), l'Italie (2001 à 2016) et la Suède (1995 à 2013) indiquent une forte croissance du volume des actes d'arthroplasties (supérieure à 200%) [11,25,27]. Des constatations similaires ont été faites pour les taux d'incidence [11,13]. Il est intéressant de souligner que ces pays sont

également les seuls à avoir effectué des analyses couvrant la fin des années 90 jusqu'au milieu des années 2010, ce qui ajoute une perspective temporelle précieuse à leurs résultats.

Plus spécifiquement, pour le Danemark, deux phases distinctes ont été identifiées. La première phase, de 1997 à 2008, se caractérise par une croissance exponentielle du volume des actes étudiés (+282%), tandis que la seconde phase, de 2008 à 2019, présente un ralentissement progressif de cette croissance (+33%) [25]. En ce qui concerne la Suède, une analyse exhaustive portant sur la période de 1975 à 2015 a révélé la présence de quatre périodes de 10 ans chacune. Ces périodes ont également montré un ralentissement graduel de la croissance après les années 80 [11]. Pour la Grande Bretagne, une période de plateau à la fin des années 1990 a été observée, suivie d'une forte croissance durant les années 2000 [28] pour les PTG et PUC. Par la suite, une croissance plus faible des PTG est notée de 2008 à 201 [21].

En dehors de l'Europe, seuls les États-Unis et la Corée du Sud disposent d'études remontant aux années 1990. Pour les États-Unis, une combinaison de deux études basées sur la même base de données (NIS), menées respectivement par Inacio [29] et Sloan [10], a permis de couvrir la période allant de 1993 à 2014. L'étude d'Inacio révèle une période de faible croissance du volume des procédures de 1993 à 1999, suivie d'une phase de croissance accélérée de 2000 à 2012. Les travaux de Sloan indiquent un taux de croissance annuel de +10,2 % entre 2000 et 2008, suivi d'un ralentissement à +3,6 % par an entre 2008 et 2014.

Pour ce qui est de la Corée du Sud, une tendance similaire a été observée, avec une période de forte croissance de 2001 à 2010 de +407%soit +20 % par an), suivie d'un ralentissement de 2010 à 2018 (+3,8 % par an) [26,30,31].

Les articles faisant références au sexe montrent que la proportion de femmes ayant une prothèse est plus élevée que celle des hommes dans tous les pays. Cependant, au cours des périodes considérées, on observe une tendance à la hausse du pourcentage d'hommes dans les arthroplasties. Bien que les femmes présentent des volumes et des taux d'incidence plus élevés en valeur absolue, les hommes ont connu une croissance plus rapide, ce qui a entraîné une modification du rapport hommes/femmes. Cette tendance n'est cependant pas universelle, car Taïwan et le Royaume-Uni font exception [21,32,33].

Les articles référençant un âge moyen (n=12) l'indiquent pour l'ensemble des prothèses totales et unicompartimentales [1,13,19,20,25,28,32–37], à une exception focalisant sur les PTG [1]. En prenant en compte les périodes étudiées dans chaque article, il est toutefois constaté que cet âge moyen varie dans une fourchette de 65 à 74,2 ans, avec un pic observé autour de 70 ans. Cette moyenne évolue en fonction des périodes d'étude et des pays. Aux Etats-Unis [35] et Taïwan [33] par exemple, elle a augmenté au cours de la période s'étendant des années 1990 à 2010, tandis qu'au Danemark [34], elle a baissé. En Autriche [20], elle est resté stable durant la décennie 2010. Par ailleurs, il est également observé une différence moyenne d'un an entre les femmes et les hommes, les femmes ayant un âge moyen légèrement plus élevé [1,28,36]. Au-delà de l'âge moyen, il est également observé que les volumes les plus importants concernent les personnes de plus de 70 ans [14,15,26,30–34,38], mais que les taux de croissance les plus élevés concernent les personnes de moins de 65 ans, à l'exception du Japon, de Taïwan et de la Corée [1,14,17,30–32,38–42].

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume (%) [nombre, début- fin période]	Croissance TI (%) [nombre, début- fin période]	Proportion sexe (Début-fin période)		Croissance sexe				
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]		
						Femmes	Hommes	Femmes	Homme	Femmes	Hommes	
PTG												
Ackerman (2017) Ackerman (2019)	Australie	2003- 2013	11	+104.5% [20 986-42 920]	+73% [123-213]	57.2%- 56.6%	42.8%- 43.4%			+72.7% [121-209]	+76.1% [92-162]	
Koh (2013)	Corée-du- Sud	2001- 2010	10	+407%	+397% [31-154]	91% - 89%	9% - 11%			+384% [57-276]	+467% [6-34]	
Kim TW (2021)	Corée-du- Sud	2010- 2018	9	+47% [65 109 - 95 385]	+35% [150-202]	89%- 85%	11%- 15%	+40% [58 088-81 210]	+102% [7 021-14 175]			
Kim YB (2021)	Corée-du- Sud	2011- 2018	8	+45% [44 361-64 456]	+42% [44.3-62.8]	Dominante Femmes (non précisé)				+35% [77.7-104.9]	+89% [10.9-20.6]	
Ackerman (2017)	Danemark	2003- 2013	11	+110% [2 908-6 107]		65.7%- 61.2%	34.3%- 38.8%			+88.6% [70-132]	+129.7% [37-85]	
Ackerman (2017)	Finlande	2003- 2013	11	+57.1% [6 090-9 569]		69.8%- 64.3%	30.2%- 35.7%			+39.6% [159-222]	+76.4% [72-127]	
Le Stum (2022)	France	2009- 2019	11	+62% [63 365-102 655]	+55% [98.5-152.9]	65.4%- 61.1%	34.6%- 38.9%	+52% [41 215-62 763]	+80% [22 150-39 892]	+46% [124.2-181]	+73% [71.2-122.9]	

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume (%) [nombre, début- fin période]	Croissance TI (%) [nombre, début- fin période]	Proportion sexe (Début-fin période)		Croissance sexe				
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]		
						Femmes	Hommes	Femmes	Homme	Femmes	Hommes	
PTG												
Patel (2015)	Grande- Bretagne	2008- 2012	5	+13% [77 766- 88 038]	Plus fort chez les femmes							
Kawata (2017)	Japon	2007- 2014	8	+256% [9 434-33 625]				+245% [7 910-27 293]	+315% [1 524-6 332]	+45.6% [68-99]	+122.2% [27-60]	
Ackerman (2017)	Norvège	2003- 2013	11	+85% [2 168-4 010]		71.7%- 62.3%	28.3%- 37.7%					
Ackerman (2017)	Suède	2003- 2013	11	+82.2% [6 656-12 124]		61.4%- 56.8%	38.6%- 43.2%			+58.9% [90-143]	+87.9% [58-109]	

Tableau 2. A : Articles présentant une analyse focalisée sur les Prothèse Totale de Genou (PTG). La période représente la plage d'année étudiée dans l'article. CAGR = Taux de croissance annuelle moyen. TI = Taux d'incidence.

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume [nombre, début-fin période]	Croissance TI [nombre, début-fin période]	Ratio sexe (Début-fin période)		Croissance sexe			
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]	
						Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
PTG + PUC											
Schäfer (2012)	Allemagne	2005- 2009	5	Global : +10.8% [63 259-70 115] PTG+PUC: +8%				Plus élevé chez les femmes			
Kim SH (2012)	Allemagne	2004- 2008	5	+33% [??-146 000]							
Wengler (2014)	Allemagne	2005- 2011	7	+22% [125 437-152 553]	+26% [164-206]	68.9%-64.8%	31.1%-35.2%	+14% [86 469-98 872]	+36% [38 968-53 145]		
Rupp (2010)	Allemagne	2005- 2016	12	+33% (126 514 - 168 772)	+19.5% (205-245)						
Worlicek (2021)	Allemagne	2008- 2018	11	+12% [150 504-168 479]		2/3	1/3				
Leitner (2018)	Autriche	2009- 2015	7	+13% [15 350-17 324]		63%-61%	37%-39%	+9% [9725-10 621]	+19% [5 625-6 703]		
Kim HA (2008)	Corée du Sud	2002- 2005	4	Hausse du volume cumulé sur la période : + 103 601	Taux augmente						

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume [nombre, début-fin période]	Croissance TI [nombre, début-fin période]	Ratio sexe (Début-fin période)		Croissance sexe			
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]	
						Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
PTG + PUC											
Perdersen (2012)	Danemark	1997- 2010	14	Progression constante jusqu'en 2010 puis légère baisse observée	+334% [35.2-155.2]						TI Femmes > Hommes
Niemelamen (2017)	Danemark	1997- 2012	16		+518% [34-210]	64% (des PTG) 57%(des PUC)	36% (des PTG) 43% (des PUC)			x5.2 (PTG) Augmente en 2012 (PUC)	x4.2 (PTG) Augmente en 2012 (PUC)
Daugberg (2021)	Danemark	1997- 2019	23	+613%	+349%	57% (2019)	43% (en 2019)				
Jain (2005)	Etats-Unis	1990- 2000	11	non donné		62.5% (sur 1990-1993) 62.6% (sur 1994-1997) 63.1% (sur 1998-2000)	37.5% (sur 1990-1993) 37.4% (sur 1994-1997) 36.9% (sur 1998-2000)				

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume [nombre, début-fin période]	Croissance TI [nombre, début-fin période]	Ratio sexe (Début-fin période)		Croissance sexe			
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]	
						Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
PTG + PUC											
Memtsoudis (2009)	Etats-Unis	1990- 2004	15	+125% [807 687 – 1 818 624] Chiffres cumulés de la période 1990- 1994 vs 2000-2004	Accroisse- ment du TI	64.96% (sur 1990-1994) 62.98% (sur 2000-2004)	35.04% (sur 1990-1994) 37.02% (sur 2000-2004)	Augmentation pour les 2 sexes			
Cram (2012)	Etats-Unis	1991- 2010	20	+161.5% [93 230-243 802]	+99.2%						
Wengler (2014)	Etats-Unis	2005- 2011	7	+30% [495 999-643 500]	+24% [181-225]	63.8%-62.1%	36.2%-37.9%	+26% [318 521-401 742]	+36% [177 478-241 759]		

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume [nombre, début-fin période]	Croissance TI [nombre, début-fin période]	Ratio sexe (Début-fin période)		Croissance sexe				
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]		
						Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	
PTG + PUC												
Kremers (2015)	Etats-Unis	1969- 2010	42	1980-2010 : +1478% [297 829-4 700 621] 1990-2010 : +392% [954 673-4 700 621] 2000-2010: +108% [2 261 698-4 700 621]		37% (en 1980) 58% (en 1990) 62% (en 2000) 63% (en 2010)	63% (en 1980) 42% (en 1990) 38% (en2000) 37% (en 2010)	+2596% [109 980-2 965 541] (sur 1980- 2010) +431% [557 997-2 965 541] (sur 1990- 2010) +113% [1 395 086-2 965 541] (sur 2000-2010)	+824% [187 849-1 735 080] (sur 1980- 2010) +337% [396 676-1 735 080] (sur 1990- 2010) +100% [866 612-1 735 080] (sur 2000- 2010)			
Malcolm (2015)	Etats-Unis	2000- 2010	11	+315% [70 868-293 877]								
Inacio (2017)	Etats-Unis	1993- 2012	20	+224% [194 914-631 214]	+125% [191-429]							

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume [nombre, début-fin période]	Croissance TI [nombre, début-fin période]	Ratio sexe (Début-fin période)		Croissance sexe			
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]	
						Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
PTG + PUC											
Sloan (2018)	Etats-Unis	2000-2014	15	+148% [274 025-680 150]	+119% [97-213]						
Niemelamen (2017)	Finlande	2000-2012	13		+115% [130-280]	64% (des PTG) 57% (des PUC)	36% (des PTG) 43% (des PUC)			x1.9 (PTG) Augmente en 2012 (PUC)	x2.7 (PTG) Augmente en 2012 (PUC)
Erivan (2020)	France	2012-2018	7	+32.2%		Femmes: 61.1% (en 2018)	Hommes: 38.9% (en 018)				
Culliford (2010)	Grande-Bretagne	1991-2006	16	Plateau au milieu des années 90 Forte croissance durant les années 2000		Ratio Femmes/Hommes est stable entre 1995 et 2006: 1.18:1 et 1.42:1					
Culliford (2015)	Grande-Bretagne	1991-2010	20			+ 58.4% (sur 1991-2010)	+ 41.6% (sur 1991-2010)				

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume [nombre, début-fin période]	Croissance TI [nombre, début-fin période]	Ratio sexe (Début-fin période)		Croissance sexe			
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]	
						Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
PTG + PUC											
Romanini (2019)	Italie	2001-2016	16	+262%							
Niemelamen (2017)	Norvège	1997-2012	16		+289% [36-140]	64% (des PTG) 57%(des PUC)	36% (des PTG) 43% (des PUC)			x3.1 (PTG) Augmente en 2012 (PUC)	x5.9 (PTG) Augmente en 2012 (PUC)
Hooper (2014)	Nouvelle-Zélande	2001-2011	11		+52.2%						
Nemes (2015)	Suède	1975-2013	39	+210% (sur 1995-2013)	+165,3% (sur 1995-2013)	Baisse de la proportion des femmes au profit des hommes					
Niemelamen (2017)	Suède	1997-2012	16		+133% [90-210]	64% (des PTG) 57%(des PUC)	36% (des PTG) 43% (des PUC)			x2.4 (PTG) Baisse en 2012 (PUC)	x2.5 (PTG) Baisse en 2012 (PUC)
Kumar (2015)	Taiwan	1998-2009	12	+138% [6062-14 467]	+99.1% [28.5-56.8]	Femmes: 74.7%	Hommes: 25.3%	+99% [42.2-??]	+96.5% [15-??]		

Auteur	Pays	Période	Nb année	Croissance volume [nombre, début-fin période]	Croissance TI [nombre, début-fin période]	Ratio sexe (Début-fin période)		Croissance sexe			
								Volume (%) [nombre, début-fin période]		TI volume (%) [nombre, début-fin période]	
						Femmes	Hommes	Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
PTG + PUC											
Lin (2018)	Taiwan	1996- 2010	15	+228% (sur 1996- 2010) +142% (sur 2000- 2010)	+203% (sur 1996-2010) +131% (sur 2000-2010)	72% (en 1996) 74% (en 2000) 75% (en 2010)	28% (en 1996) 26% (en 2000) 25% (en 2010)	+241% (sur 1996-2010) 2000-2010: +144% (sur 2000-2010)	+188% (sur 1996-2010) +131% (sur2000-2010)	+209% (sur 1996- 2010) +130% (sur 2000- 2010)	+174% (sur 1996- 2010) +126% (sur 2000- 2010)

Tableau 2. B : Articles présentant une analyse focalisée sur l'ensemble des Prothèse Totale de Genou (PTG) et Prothèse Unicompartimentale (PUC). La période représente la plage d'année étudiée dans l'article. CAGR = Taux de croissance annuelle moyen. TI = Taux d'incidence.

Auteurs	Pays	Période	Nb année	Croissance volume [nombre, début-fin période]	Croissance TI [nombre, début-fin période]	Ratio sexe (Début-fin période)		Croissance sexe (TI)	
						Femmes	Hommes	Femmes	Hommes
PTG+PUC+Révisions									
<u>Kim AM (2019)</u>	Corée du Sud	2013	1			TI Femmes x6 par rapport aux Hommes			
Barahona (2020)	Chili	2004- 2019	16		+1002% [2.56-28.23]	60%-61%	40%-39%	+1014% [3.06-34.1]	+990% [2.04-22.24]
Katano (2021)	Japon	2014- 2017	4	+9% [75 635-82 304]		81%-80%	19%-20%		
Matsuoka (2023)	Japon	2014- 2018	5	+16% [75 538-87 887]		80.5%- 79.6%	19.5%- 20.4%		

Tableau 2. C. : Articles présentant une analyse focalisée sur l'ensemble des Prothèse Totale de Genou (PTG) et Prothèse Unicompartimentale (PUC) et des révisions. La période représente la plage d'année étudiée dans l'article. CAGR = Taux de croissance annuelle moyen. TI = Taux d'incidence.

Analyse des projections (table3)

Un total de 12 pays a réalisé des projections futures concernant les prothèses. Les États-Unis se distinguent en étant les plus prolifiques, avec cinq études [8,10,29,43,44], suivis de l'Australie [12,42], de la France [1,24] et du Royaume-Uni [21,36], qui ont chacun mené deux études. Les autres pays (Allemagne [18], Chili [45], Corée du Sud [30], Danemark [25], Italie [27], Japon [23] Nouvelle-Zélande [37], Suède [11] et Taïwan [33]) n'en ont mené qu'une seule.

Ces projections futures sont établies sur sept horizons temporels distincts : 2020 (n = 1, 5% des études), 2026 (n = 1, 5%), 2030 (n = 9, 45%), 2035 (n = 1, 5%), 2040 (n = 2, 10%), 2046 (n = 1, 5%) et 2050 (n = 5, 25%).

Parmi les méthodes de régression utilisées dans ces études, la régression de Poisson est la plus couramment employée (n = 13), suivie des régressions linéaires (n = 8) et logistiques (n = 6). Les autres types de régressions (Gompertz, logarithmique, inversion/puissance) sont moins fréquemment utilisés.

Pour caractériser les projections futures, la métrique finale de volume est plus fréquemment employée que celle du taux d'incidence (TI). Toutefois, il convient de préciser que les projections sont basées sur le TI, qui est ensuite converti en volume, à quelques exceptions près [17,21,30]. Bien que des tendances globales à la hausse soient observées, une hétérogénéité est observée en termes de volume et de TI, à la fois entre les différents types de projections et au sein d'une même famille de projections, en fonction des pays étudiés.

Article	Pays	Année de projection	Année de référence % croissance	Période référence pour projection	Type de régression	% croissance Valeur [année référence-année projection]	
						Volume	TI
Kurtz (2007)	Etats-Unis	2030	2005	1990-2003	Poisson	+673% [45 000 - 3 480 000]	
Kurtz (2014)	Etats-Unis	2020	2009	1993-2010	Linéaire	+192% [619 000-1 375 574]	
Hooper G (2014)	Nouvelle Zélande	2026	2001	2001-2011	Poisson	+183% [3 049-8 613]	Projeté à 294.8
Patel (2015)	Royaume- Unis	2030	2012	2008-2012	Poisson	+546% [88 038-568 961]	
					Linéaire	+117% [88 038-186 302]	
Kumar (2015)	Taiwan	2030	2005	1998-2009	Poisson		+508,2%
Nemes (2015)	Suède	2030	2015	1975-2013	Logistique Gompertz	+63% [15 140-21 714]	+27% [300-382]
Culliford (2015)	Royaume- Unis	2035	2010	1991-2010	Poisson	Croissance non calculable car année 2010 non indiquée. Volume projeté: 1 219 362	

Article	Pays	Année de projection	Année de référence % croissance	Période référence pour projection	Type de régression	% croissance Valeur [année référence-année projection]	
						Volume	TI
Inacio (2017)	Etats-Unis	2050	2012	1993-2012	Poisson	+855%	+565%
					Logistique	[631 214- 6 030 029]	[429-2854]
Inacio (2017)	Australie	2046	2013	1994-2013	Logistique	+143%	+69%
						[631 214- 1 531 566]	[429-725]
Inacio (2017)	Australie	2046	2013	1994-2013	Logistique	+144%	+ 31%
Sloan (2018)	Etats-Unis	2030	2014	2000-2014	Poisson	[43 392-105 971]	[413-575]
					Linéaire	+147%	
Ackerman (2019)	Australie	2030	2013	2003-2013	Linéaire	[680 150 - 1 678 200]	[xx-248]
					Poisson	+84,9%	[xx-609]
Singh (2019)	Etats-Unis	2040	2014	2000-2014	Polynomial degré 2	[680 150 - 1 257 800]	
						+ 53%	
Barahona (2020)	Chili	2030	2019	2004-2019	Linéaire	[42 920-65 569]	
							+208%
						[42 920-161 231]	
						+401%	
						[680 886-3 416 000]	
							+131%
							[28.23-65.14]

Article	Pays	Année de projection	Année de référence % croissance	Période référence pour projection	Type de régression	% croissance Valeur [année référence-année projection]	
						Volume	TI
Rupp (2020)	Allemagne	2040	2016	2005-2016	Poisson	+45% [168 772-244 714]	+55% [245-379]
Erivan (2020)	France	2050	2018	2012-2018	Linéaire	+152,8%	
Kim (2021)	Corée du Sud	2030	2018	2010-2018	Linéaire	+53% [95 385-145 000]	
					Poisson	+91% [5 144 - 182 000]	
Daugberg (2021)	Danemark	2050	2019	1997-2019	Logistique Gompertz	Projeté à 10 379 Projeté à 10 808	Projeté à 250 Projeté à 260
Le Stum (2022)	France	2050	2019	2009-2019	Linéaire	+139% [102 655-245 427]	+114% [152.9-331.5]
					Logistique	+47.6% [102 655-151 575]	+33% [152.9-204.8]
					Poisson	+357.9% [102 655-470 056]	+304% [152.9-635]
Matsuoka (2023)	Japon	2030	2018	2014-2018	Poisson	+30.1% [87 887-114 369]	

Tableau 3 : Liste des articles ayant réalisé une projection.

Discussion

La présente étude met en évidence une diversité significative dans l'analyse et l'épidémiologie des arthroplasties du genou, une procédure chirurgicale en expansion à l'échelle mondiale, principalement en raison du vieillissement de la population. Cependant, malgré quelques exceptions, les tendances observées sont similaires parmi les pays étudiés, en particulier dans les pays développés qui disposent d'un système de santé avancé.

En effet, la collecte de données fiables, homogènes et régulières nécessite la mise en place d'un système de collecte performant et validé au niveau national. Cette reproductibilité des données collectées permet une comparaison interannuelle, tandis que le contexte national facilite l'analyse des dynamiques en cours du point de vue sociétal et économique.

Ainsi, notre recherche s'est concentrée sur les pays disposant de bases de données ou de registres nationaux fonctionnels, ayant été soumis à une validation rigoureuse et ayant obtenu une reconnaissance officielle. Ces sources servent de référence à long terme pour les États inclus dans notre étude.

La mise à disposition de ces données revêt une importance primordiale pour faciliter la réalisation d'études observationnelles permettant des analyses à long terme, couvrant les points de vue épidémiologique, technique que socio-économique. D'où l'importance de prendre en considération à la fois le contenu et l'échelle géographique de ces données. Leur analyse soutient les pratiques basées sur l'expérience et permet une surveillance post-chirurgicale et post-commercialisation.

Cependant, malgré ces avantages, l'établissement d'une base de données efficace n'est pas une tâche facile et de nombreuses questions doivent être prises en considération lors de la planification de sa structure. En ce qui concerne l'articulation du genou, le premier registre de type base de données a été établi en Suède en 1975. Ce modèle s'est ensuite propagé aux pays scandinaves avant de s'étendre à l'échelle internationale.

Cependant, avant de pouvoir être considérée comme un système de suivi plus complet à l'échelle nationale, une base de données telle qu'un registre est initialement perçue comme une initiative locale, souvent implémentée dans un hôpital ou un regroupement régional d'hôpitaux [46]. Dans le cadre de notre étude, nous avons pu constater que de nombreux pays disposaient de données

relatives à leurs interventions d'arthroplastie, mais celles-ci étaient collectées à une échelle trop restreinte pour être incluses dans une comparaison internationale. Dans certains cas, les recensements étaient réalisés à l'échelle d'un État ou d'une Province, comme par exemple la Californie [47,48] et le Wisconsin [49] aux États-Unis, l'Ontario [50] et l'Alberta [51] au Canada, le Trent [52] au Royaume-Uni, et Sao Paulo [53] au Brésil. Dans d'autres cas, ils étaient effectués dans un nombre limité d'établissements hospitaliers, comme en Chine [54,55], en Inde [56], aux États-Unis, au Ghana [57], au Nigeria [58] et au Malawi [59]. Cela offre une vision plus limitée, fortement dépendante du contexte territorial.

Par ailleurs, bien qu'ils soient peu représentés à l'échelle internationale, il est important de noter que certains pays d'Afrique sub-saharienne [60] ou d'Amérique latine [45] sont actuellement en phase de mise en œuvre ou de déploiement d'un registre national de collecte de données. Ces initiatives s'inspirent des modèles préexistants, tels que les registres suédois ou australiens, tout en adaptant leurs caractéristiques aux contextes locaux. Ces pays sont actuellement engagés dans une phase de validation, préalable à l'établissement d'un registre national.

La comparaison entre pays à travers des données provenant de différentes sources n'est pas une tâche aisée. D'une part, la définition même de l'arthroplastie du genou varie d'une étude à l'autre, et d'autre part, le comptage des interventions est effectué selon diverses méthodes. À travers les études, nous avons constaté que chaque pays utilise ses propres codes (tableau 1) pour recenser les principales catégories de prothèses de genou : les PTG, les PUC et les révisions. Certains codes permettent d'approfondir davantage l'analyse (genou gauche ou droit, méthode utilisée, etc.) (tableau 1). Toutefois, tous peuvent être interfacés avec la classification ICD-9 établie par l'Organisation Mondiale de la Santé et reconnue internationalement pour suivre les statistiques de mortalité et morbidité dans le monde entier [61]. C'est cette dernière qui est utilisée directement par certains pays (Italie, États-Unis) ou études comparatives internationales [62]. Ainsi, sont employés les codes ICD-9-84 (PTG+PUC) ou ICD-9-85 (révisions).

Nous avons ainsi constaté une grande hétérogénéité parmi les études, certaines se concentrant exclusivement sur les PTG, d'autres, majoritaires, regroupant les PTG et les PUC, et enfin des analyses globales englobant les PTG, les PUC et les révisions. Il est important de noter que les PUC représentent environ 8% [13,38] du nombre total d'actes d'arthroplastie primaire du genou, tandis que les révisions représentent entre 5,3% [20] et 8% [15,34] de l'ensemble des interventions. Bien

que les PTG et les PUC répondent à des besoins fonctionnels distincts, les dynamiques de ces deux types de prothèses varient selon les pays, et leurs influences respectives sont difficiles à analyser à ce stade [13,38,63].

Les méthodes de comptage des actes varient d'un pays à l'autre, ce qui complique également les comparaisons internationales. D'un côté, certains pays utilisent des systèmes nationaux tels que l'assurance maladie (i.e. France [1,24]) ou des registres pour effectuer un décompte précis des actes (i.e. Suède [11], Australie [12,42]). De l'autre côté, des méthodes reposant sur des échantillons représentatifs extrapolés à l'échelle nationale (avec les marges d'erreur correspondantes) sont utilisées. Ainsi, des bases de données regroupant des hôpitaux (privés, militaires ou universitaires) et des centres de soins spécifiques (comme aux États-Unis [8,10,29] et au Japon [22,38]), ainsi que des recueils auprès de praticiens généralistes (comme au Royaume-Uni [28,36]), peuvent être utilisés. Dans le premier cas, des erreurs de codage peuvent survenir, tandis que le deuxième cas peut présenter une vision potentiellement limitée à une « sous-population ». Ainsi, en fonction de la structuration de la base de recueil des données, certaines populations peuvent être analysées par rapport à d'autres. Cependant, leur large couverture de la population à l'échelle nationale permet des comparaisons et des analyses des tendances [10].

La profondeur des données utilisées pour l'analyse épidémiologique varie entre une dizaine d'années (pour la pose de PTG et l'ensemble des prothèses) et une quinzaine d'années (pour les PTG et PUC). Selon les pays, cette période est soit similaire avec une différence de quelques années (par exemple en Australie, en Corée du Sud, au Royaume-Uni et à Taiwan), soit elle couvre plusieurs années successives entre le début des années 1990 et la fin des années 2010 (par exemple en Allemagne, aux États-Unis et en Suède). Certains pays disposant d'une longue tradition de collecte de données remontent même jusqu'aux années 1970 (comme la Suède). Ainsi, il est possible d'effectuer un contrôle qualité des données en comparant les tendances des pays disposant de périodes similaires. Pour les pays ayant des périodes de collecte de données consécutives, une analyse à long terme peut également être réalisée. La Corée du Sud [26,30,31], les États-Unis [8,10,15,29,35,39–41,43,44], l'Allemagne [15,17–19] et la Suède [11] présentent des évolutions de volume et d'incidence similaires en se basant sur les mêmes bases de données, malgré des approches analytiques différentes selon les auteurs. La possibilité de comparaison intra-pays est ainsi confirmée.

D'un point de vue épidémiologique, il est observé que tous les pays connaissent une croissance plus ou moins forte des actes d'arthroplastie du genou, à la fois en termes de volume et de TI. Les pays disposant de la plus grande profondeur temporelle d'analyse, tels que le Danemark, les États-Unis et la Suède, présentent des phases de croissance distinctes. Entre la fin des années 1990 et la fin des années 2000, une phase de forte croissance a été observée, suivie d'un ralentissement au cours de la décennie 2010. En combinant les études menées aux États-Unis [10,29], qui reposent sur les mêmes codes et bases de données, on peut identifier trois phases distinctes. La première, antérieure aux années 2000, présentait un faible volume d'actes par an. La deuxième, couvrant la première décennie des années 2000, a été marquée par une accélération de la croissance des actes. Enfin, la troisième phase, débutant à partir de 2008, a montré un ralentissement de cette croissance. La Corée du Sud s'inscrit également dans les deux dernières phases [30]. Des observations similaires ont été faites pour la Grande-Bretagne, qui a connu une croissance modérée dans les années 1990, suivie d'une accélération au cours de la première décennie des années 2000 [28,36]. Ces phases ne s'observent pas distinctement dans tous les pays (Australie [42], France [1,24], Italie [27]).

Pour mieux comprendre les différentes phases de croissance, il est essentiel de prendre en compte l'étiologie de l'acte d'arthroplastie et les autres facteurs exogènes qui influencent cette décision. Dans le premier cas, selon plusieurs articles analysant les causes médicales, on constate une origine arthrosique dans plus de 80% des cas. Les autres cas sont généralement attribués à l'arthrite rhumatoïde, à des traumatismes tels que des fractures, ou à l'ostéonécrose [13,34,38]. Ces pathologies endommagent progressivement le cartilage du genou et entraînent des séquelles irréversibles nécessitant un traitement par arthroplastie. Les facteurs de risque médicaux les plus courants sont principalement le surpoids, l'obésité, ainsi que des problèmes métaboliques tels que le diabète [41,64]. De plus, un effet de l'intensité de l'activité physique tout au long de la vie, qu'elle soit liée à l'activité professionnelle ou sportive, pourrait jouer également un rôle significatif [65–68].

La croissance des actes d'arthroplastie du genou observée depuis les années 1990 est le résultat de plusieurs facteurs. Tout d'abord, les améliorations techniques telles que des designs plus adaptés et performants, ainsi que l'utilisation de la technologie "fast track", ont contribué à une démocratisation de ces procédures, en particulier chez les personnes âgées de plus de 65 ans. De plus, l'augmentation de l'obésité et des risques physiques a également joué un rôle. Ces risques

ont progressivement glissé vers les générations plus jeunes, ce qui a entraîné une augmentation des arthroplasties chez les personnes de moins de 65 ans [9,13,19,39,66].

A ces facteurs "classiques", d'autres éléments ont accéléré cette croissance. Les politiques publiques ont par exemple facilité l'accès à ces procédures, comme cela a été le cas en Finlande [13]. L'amélioration continue de la technologie, qui a prolongé la durée de vie des implants, ainsi que les changements dans les recommandations médicales, ont également contribué à cette tendance [27,33]. Cette évolution a transformé la perception de cette pathologie, passant d'une affection touchant principalement les personnes âgées à une maladie affectant également les plus jeunes, avec dans ce dernier cas une préférence pour le traitement chirurgical plutôt que médicamenteux [66].

Il est également pertinent de souligner une croissance différenciée des arthroplasties du genou selon les sexes, avec une augmentation plus marquée chez les hommes que chez les femmes, bien que ces dernières restent majoritaires. Les raisons sous-jacentes à cette tendance chez les hommes demeurent à explorer. Enfin, compte tenu de toutes ces évolutions, il peut aussi être évoqué une logique socio-économique [19]. A tous ces facteurs précédemment cités, il est également essentiel de mentionner l'augmentation du nombre de centres proposant ces interventions, ce qui contribue à une hausse de l'incidence et à une meilleure accessibilité aux traitements. De même, la diffusion de la culture du codage a permis de mieux recenser ces procédures. [24,31].

En conséquence, de tous ces observations, la faible croissance observée dans certains pays s'expliquerait par la densité médicale, et l'atteinte d'un seuil élevé d'incidence. Dans ces cas, les limites du système se manifestent au niveau du nombre d'actes réalisés par chirurgien et du nombre de patients éligibles. A cela, il faut également, pour certains pays, rajouter l'effet de chocs extérieurs, tels la crise financière de 2008-2009 [43] ou celle du SRAS en 2003 en Asie [32,33].

Confrontés à cette demande croissante, les systèmes de santé font donc face à une forte augmentation des coûts de prise en charge. Il est donc essentiel d'analyser de manière approfondie les tendances afin d'anticiper les futures problématiques en matière de gestion et de financement. C'est pourquoi, de nombreux pays ont menés des projections à long terme. Les taux d'incidence futurs et, par conséquent, le nombre d'interventions, sont projetés à l'aide de différents types de modèles de croissance ou de régression (linéaire, Poisson, logistique, etc.). Les

résultats de ces études montrent une forte augmentation du nombre de pose, variant selon les auteurs, les pays étudiés et les méthodologies utilisées.

Parmi les principales projections utilisées, les régressions linéaires et de poisson supposent une croissance continue dans le temps : constante pour la première et exponentielle pour la deuxième. Au contraire, la croissance de type logistique, qui comprend les régressions logistiques, de Gompertz et asymptotiques, présente trois phases caractéristiques d'une courbe en « S ». Ainsi, une phase initiale (TI bas) de croissance faible est suivie d'une phase d'accélération correspondant à une croissance exponentielle, puis d'une phase de décélération aboutissant à un plateau avec une croissance faible, mais un taux d'incidence élevé. L'atteinte de ce plateau correspond au TI maximum atteignable, aux conditions actuelles, dans les pays considérés [11,25]. Par conséquent, étant donné que la croissance d'une population ne peut être illimitée, on suppose que les phases de croissance linéaire ou exponentielle observées dans la littérature s'inscrivent dans un cycle plus grand de type logistique. Les pays où une croissance logistique est observée auraient donc achevé leur cycle, contrairement aux autres. Cependant, caractériser précisément le profil de croissance n'est pas une tâche aisée, et plusieurs pays les ont comparés afin d'obtenir la projection la plus probable. En fin de compte, en combinant le niveau de taux d'incidence avec la phase de croissance dans laquelle se trouve chaque pays, il est possible de supposer leur positionnement les uns par rapport aux autres sur la courbe en "S" de croissance. La dynamique future de l'augmentation des volumes peut ainsi être déduite.

La principale limite de cette étude est l'hétérogénéité des sources de données. Bien qu'elles aient toutes le même objectif, à savoir mieux comprendre les évolutions passées pour mieux anticiper le futur, les regroupements de données ne sont pas effectués sur les mêmes bases ni dans les mêmes temporalités. Par conséquent, cela pourrait introduire un biais dans l'analyse, d'autant plus que de nombreuses sources de données sont ponctuelles et ne font pas l'objet d'un suivi sur une période ultérieure. D'autre part, malgré les contrôles de qualité auxquels sont soumis les sources de données utilisées il subsiste une possibilité d'erreurs de codage ou de concaténation. La diversité des codes identifiés peut également compliquer la collecte des données.

Enfin, bien que les résultats reposent sur des échantillons représentatifs et constituent une bonne base d'analyse, ils pourraient ne pas refléter l'ensemble des cas, ce qui pourrait biaiser l'interprétation des causes des croissances observées. Il est noté par exemple sur la base NIS, un

délaissement de certains actes en particuliers s'ils ne sont pas remboursés par MediCare, sur lequel elle est construite [10].

Conclusion

En analysant l'ensemble des systèmes de recensement disponibles, il est observé que les arthroplasties du genou connaissent une croissance dans tous les pays étudiés. Cependant, cette croissance n'est pas uniforme, et présente des variations en termes d'intensité (faible, élevée), qui dépendent également des périodes étudiées. Les causes de ces disparités sont multifactorielles, mais semblent suivre un schéma similaire, bien que décalé dans le temps en fonction du niveau du développement socio-économique des pays. Ainsi, chaque pays se trouve dans une phase de croissance différente reflétant son stade de développement économique.

Références

- [1] Le Stum M, Gicquel T, Dardenne G, Le Goff-Pronost M, Stindel E, Clavé A. Total knee arthroplasty in France: Male-driven rise in procedures in 2009-2019 and projections for 2050. *Orthop Traumatol Surg Res* 2022;103463. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2022.103463>.
- [2] Conaghan PG, Kloppenburg M, Schett G, Bijlsma JWW, EULAR osteoarthritis ad hoc committee. Osteoarthritis research priorities: a report from a EULAR ad hoc expert committee. *Ann Rheum Dis* 2014;73:1442–5. <https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2013-204660>.
- [3] Xing D, Xu Y, Liu Q, Ke Y, Wang B, Li Z, et al. Osteoarthritis and all-cause mortality in worldwide populations: grading the evidence from a meta-analysis. *Sci Rep* 2016;6:24393. <https://doi.org/10.1038/srep24393>.
- [4] Economic evaluation of access to musculoskeletal care: the case of waiting for total knee arthroplasty | SpringerLink n.d. <https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2474-15-22> (accessed October 14, 2020).
- [5] Ollivier M, Parratte S, Flecher X, Pinelli P, Aubaniac J, Argenson J. Histoire de la PTG : Comment en est-on arrivé là ? 2017.
- [6] Causero A, Di Benedetto P, Beltrame A, Gisonni R, Cainero V, Pagano M. Design evolution in total knee replacement: which is the future? *Acta Bio-Medica : Atenei Parmensis* 2014;85:5–19.
- [7] Boylan M, Suchman K, Vigdorichik J, Slover J, Bosco J. Technology-Assisted Hip and Knee Arthroplasties: An Analysis of Utilization Trends. *The Journal of Arthroplasty* 2018;33:1019–23. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2017.11.033>.
- [8] Kurtz S, Ong K, Lau E, Mowat F, Halpern M. Projections of Primary and Revision Hip and Knee Arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *JBJS* 2007;89:780–5. <https://doi.org/10.2106/JBJS.F.00222>.
- [9] Kurtz SM, Lau E, Ong K, Zhao K, Kelly M, Bozic KJ. Future Young Patient Demand for Primary and Revision Joint Replacement: National Projections from 2010 to 2030. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 2009;467:2606. <https://doi.org/10.1007/s11999-009-0834-6>.
- [10] Sloan M, Premkumar A, Sheth NP. Projected Volume of Primary Total Joint Arthroplasty in the U.S., 2014 to 2030. *JBJS* 2018;100:1455–60. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.01617>.

- [11] Nemes S, Rolfson O, W-Dahl A, Garellick G, Sundberg M, Kärrholm J, et al. Historical view and future demand for knee arthroplasty in Sweden. *Acta Orthopaedica* 2015;86:426–31. <https://doi.org/10.3109/17453674.2015.1034608>.
- [12] Inacio MCS, Graves SE, Pratt NL, Roughead EE, Nemes S. Increase in Total Joint Arthroplasty Projected from 2014 to 2046 in Australia: A Conservative Local Model With International Implications. *Clin Orthop Relat Res* 2017;475:2130–7. <https://doi.org/10.1007/s11999-017-5377-7>.
- [13] Niemeläinen MJ, Mäkelä KT, Robertsson O, W-Dahl A, Furnes O, Fenstad AM, et al. Different incidences of knee arthroplasty in the Nordic countries. *Acta Orthopaedica* 2017;88:173–8. <https://doi.org/10.1080/17453674.2016.1275200>.
- [14] Ackerman IN, Bohensky MA, de Steiger R, Brand CA, Eskelinen A, Fenstad AM, et al. Substantial rise in the lifetime risk of primary total knee replacement surgery for osteoarthritis from 2003 to 2013: an international, population-level analysis. *Osteoarthritis Cartilage* 2017;25:455–61. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2016.11.005>.
- [15] A W, U N, T M. Hip and knee replacement in Germany and the USA: analysis of individual inpatient data from German and US hospitals for the years 2005 to 2011. *Deutsches Arzteblatt International* 2014;111. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2014.0407>.
- [16] Schäfer T, Pritzkeleit R, Jeszenszky C, Malzahn J, Maier W, Günther KP, et al. Trends and geographical variation of primary hip and knee joint replacement in Germany. *Osteoarthritis and Cartilage* 2013;21:279–88. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2012.11.006>.
- [17] Kim SH, Gaiser S, Meehan JP. Epidemiology of Primary Hip and Knee Arthroplasties in Germany: 2004 to 2008. *The Journal of Arthroplasty* 2012;27:1777–82. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2012.06.017>.
- [18] Rupp M, Lau E, Kurtz SM, Alt V. Projections of Primary TKA and THA in Germany From 2016 Through 2040. *Clinical Orthopaedics and Related Research*® 2020;478:1622–33. <https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000001214>.
- [19] Worlicek M, Koch M, Daniel P, Freigang V, Angele P, Alt V, et al. A retrospective analysis of trends in primary knee arthroplasty in Germany from 2008 to 2018. *Sci Rep* 2021;11:5225. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84710-y>.

- [20] Leitner L, Türk S, Heidinger M, Stöckl B, Posch F, Maurer-Ertl W, et al. Trends and Economic Impact of Hip and Knee Arthroplasty in Central Europe: Findings from the Austrian National Database. *Scientific Reports* 2018;8:1–5. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23266-w>.
- [21] Patel A, Pavlou G, Mújica-Mota RE, Toms AD. The epidemiology of revision total knee and hip arthroplasty in England and Wales. *The Bone & Joint Journal* 2015;97-B:1076–81. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.97B8.35170>.
- [22] Katano H, Ozeki N, Kohno Y, Nakagawa Y, Koga H, Watanabe T, et al. Trends in arthroplasty in Japan by a complete survey, 2014-2017. *J Orthop Sci* 2021;26:812–22. <https://doi.org/10.1016/j.jos.2020.07.022>.
- [23] Matsuoka H, Nanmo H, Nojiri S, Nagao M, Nishizaki Y. Projected numbers of knee and hip arthroplasties up to the year 2030 in Japan. *Journal of Orthopaedic Science* 2023;28:161–6. <https://doi.org/10.1016/j.jos.2021.09.002>.
- [24] Erivan R, Tardieu A, Villatte G, Ollivier M, Jacquet C, Descamps S, et al. Knee surgery trends and projections in France from 2008 to 2070. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 2020;106:893–902. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.02.018>.
- [25] Daugberg L, Jakobsen T, Nielsen PT, Rasmussen M, El-Galaly A. A projection of primary knee replacement in Denmark from 2020 to 2050. *Acta Orthopaedica* 2021:1–4. <https://doi.org/10.1080/17453674.2021.1894787>.
- [26] Koh IJ, Kim TK, Chang CB, Cho HJ, In Y. Trends in Use of Total Knee Arthroplasty in Korea From 2001 to 2010. *Clin Orthop Relat Res* 2013;471:1441–50. <https://doi.org/10.1007/s11999-012-2622-y>.
- [27] Romanini E, Decarolis F, Luzi I, Zanolli G, Venosa M, Laricchiuta P, et al. Total knee arthroplasty in Italy: reflections from the last fifteen years and projections for the next thirty. *International Orthopaedics (SICOT)* 2019;43:133–8. <https://doi.org/10.1007/s00264-018-4165-7>.
- [28] Culliford DJ, Maskell J, Beard DJ, Murray DW, Price AJ, Arden NK. Temporal trends in hip and knee replacement in the United Kingdom: 1991 to 2006. *J Bone Joint Surg Br* 2010;92:130–5. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.92B1.22654>.
- [29] Inacio MCS, Paxton EW, Graves SE, Namba RS, Nemes S. Projected increase in total knee arthroplasty in the United States – an alternative projection model. *Osteoarthritis and Cartilage* 2017;25:1797–803. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2017.07.022>.

- [30] Kim TW, Kang S-B, Chang CB, Moon S-Y, Lee Y-K, Koo K-H. Current Trends and Projected Burden of Primary and Revision Total Knee Arthroplasty in Korea Between 2010 and 2030. *J Arthroplasty* 2021;36:93–101. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2020.06.064>.
- [31] Kim Y-B, Choi H-S, Kang EM, Park S, Seo G-W, Chun D-I, et al. Trends of Total Knee Arthroplasty According to Age Structural Changes in Korea from 2011 to 2018. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021;18:13397. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413397>.
- [32] Lin F-H, Chen H-C, Lin C, Chiu Y-L, Lee H-S, Chang H, et al. The increase in total knee replacement surgery in Taiwan: A 15-year retrospective study. *Medicine (Baltimore)* 2018;97:e11749. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000011749>.
- [33] Kumar A, Tsai W-C, Tan T-S, Kung P-T, Chiu L-T, Ku M-C. Temporal trends in primary and revision total knee and hip replacement in Taiwan. *Journal of the Chinese Medical Association* 2015;78:538–44. <https://doi.org/10.1016/j.jcma.2015.06.005>.
- [34] Pedersen AB, Mehnert F, Odgaard A, Schrøder HM. Existing data sources for clinical epidemiology: The Danish Knee Arthroplasty Register. *Clin Epidemiol* 2012;4:125–35. <https://doi.org/10.2147/CLEP.S30050>.
- [35] Cram P, Lu X, Kates SL, Singh JA, Li Y, Wolf BR. Total knee arthroplasty volume, utilization, and outcomes among Medicare beneficiaries, 1991–2010. *JAMA* 2012;308:1227–36. <https://doi.org/10.1001/2012.jama.11153>.
- [36] Culliford D, Maskell J, Judge A, Cooper C, Prieto-Alhambra D, Arden NK. Future projections of total hip and knee arthroplasty in the UK: results from the UK Clinical Practice Research Datalink. *Osteoarthritis and Cartilage* 2015;23:594–600. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2014.12.022>.
- [37] Hooper GJ, Lee AJ-J, Rothwell AG, Frampton CM. Current trends and projections in the utilisation rates of hip and knee replacement in New Zealand from 2001 to 2026. *The New Zealand Medical Journal* 2014.
- [38] Kawata M, Sasabuchi Y, Inui H, Taketomi S, Matsui H, Fushimi K, et al. Annual trends in knee arthroplasty and tibial osteotomy: Analysis of a national database in Japan. *Knee* 2017;24:1198–205. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2017.06.005>.

- [39] Maradit Kremers H, Larson DR, Crowson CS, Kremers WK, Washington RE, Steiner CA, et al. Prevalence of Total Hip and Knee Replacement in the United States. *J Bone Joint Surg Am* 2015;97:1386–97. <https://doi.org/10.2106/JBJS.N.01141>.
- [40] Jain NB, Higgins LD, Ozumba D, Guller U, Cronin M, Pietrobon R, et al. Trends in epidemiology of knee arthroplasty in the United States, 1990-2000. *Arthritis Rheum* 2005;52:3928–33. <https://doi.org/10.1002/art.21420>.
- [41] Memtsoudis SG, Della Valle AG, Besculides MC, Gaber L, Laskin R. Trends in Demographics, Comorbidity Profiles, In-Hospital Complications and Mortality Associated With Primary Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty* 2009;24:518–27. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2008.01.307>.
- [42] Ackerman IN, Bohensky MA, Zomer E, Tacey M, Gorelik A, Brand CA, et al. The projected burden of primary total knee and hip replacement for osteoarthritis in Australia to the year 2030. *BMC Musculoskeletal Disorders* 2019;20:90. <https://doi.org/10.1186/s12891-019-2411-9>.
- [43] Kurtz SM, Ong KL, Lau E, Bozic KJ. Impact of the Economic Downturn on Total Joint Replacement Demand in the United States: Updated Projections to 2021. *JBJS* 2014;96:624–30. <https://doi.org/10.2106/JBJS.M.00285>.
- [44] Singh JA, Yu S, Chen L, Cleveland JD. Rates of Total Joint Replacement in the United States: Future Projections to 2020–2040 Using the National Inpatient Sample. *The Journal of Rheumatology* 2019;46:1134–40. <https://doi.org/10.3899/jrheum.170990>.
- [45] Barahona M, Barrientos C, Escobar F, Diaz N, Palma D, Barahona MA, et al. Trends in Knee and Hip Arthroplasty in Chile Between 2004 and 2019. *Cureus* n.d.;12. <https://doi.org/10.7759/cureus.12185>.
- [46] Beit Ner E, Nakamura N, Lattermann C, McNicholas MJ. Knee registries: state of the art. *J ISAKOS* 2021:S2059-7754(21)00306-0. <https://doi.org/10.1136/jisakos-2021-000625>.
- [47] Khatod M, Inacio M, Paxton EW, Bini SA, Namba RS, Burchette RJ, et al. Knee replacement: epidemiology, outcomes, and trends in Southern California: 17,080 replacements from 1995 through 2004. *Acta Orthop* 2008;79:812–9. <https://doi.org/10.1080/17453670810016902>.
- [48] Oh C, Slover JD, Bosco JA, Iorio R, Gold HT. Time Trends in Characteristics of Patients Undergoing Primary Total Hip and Knee Arthroplasty in California, 2007-2010. *J Arthroplasty* 2018;33:2376–80. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2018.02.079>.

- [49] Mehrotra C, Remington PL, Naimi TS, Washington W, Miller R. Trends in total knee replacement surgeries and implications for public health, 1990-2000. *Public Health Rep* 2005;120:278–82. <https://doi.org/10.1177/003335490512000310>.
- [50] Ravi B, Croxford R, Reichmann WM, Losina E, Katz JN, Hawker GA. The changing demographics of total joint arthroplasty recipients in the United States and Ontario from 2001 to 2007. *Best Pract Res Clin Rheumatol* 2012;26:637–47. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2012.07.014>.
- [51] Alibhai A, Saunders D, Johnston DW, Bay K. Total hip and knee replacement surgeries in Alberta utilization and associated outcomes. *Healthc Manage Forum* 2001;14:25–32. [https://doi.org/10.1016/S0840-4704\(10\)60803-4](https://doi.org/10.1016/S0840-4704(10)60803-4).
- [52] Ibrahim T, Bloch B, Esler CN, Abrams KR, Harper WM. Temporal trends in primary total hip and knee arthroplasty surgery: results from a UK regional joint register, 1991-2004. *Ann R Coll Surg Engl* 2010;92:231–5. <https://doi.org/10.1308/003588410X12628812458572>.
- [53] Carvalho RT de, Lopes TL, Takano MI, Lima JHS, Arrebola LS, Colombo ML, et al. Evolution and projection of knee arthroplasties from 2003 to 2030 in the state of São Paulo. *Rev Assoc Med Bras* 2019;65:1001–6. <https://doi.org/10.1590/1806-9282.65.7.1001>.
- [54] Yan CH, Chiu KY, Ng FY. Total knee arthroplasty for primary knee osteoarthritis: changing pattern over the past 10 years. *Hong Kong Med J* 2011;17:20–5.
- [55] Cheung A, Chan PK, Fu H, Cheung MH, Chan VWK, Yan CH, et al. Total knee arthroplasty is safe for patients aged ≥ 80 years in Hong Kong. *Hong Kong Med J* 2021;27:350–4. <https://doi.org/10.12809/hkmj208942>.
- [56] Kumar N, Gupta B, Singh SK. Changing trends of total knee replacement utilization over more than a decade. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2015;25:1177–80. <https://doi.org/10.1007/s00590-015-1675-5>.
- [57] George A, Ofori-Atta P. Joint replacement surgery in Ghana (West Africa)-an observational study. *Int Orthop* 2019;43:1041–7. <https://doi.org/10.1007/s00264-019-04286-1>.
- [58] Anyaehie UE, Eyichukwu GO, Nwadinigwe CU. Total knee replacement in a resource constrained environment: A preliminary report. *Nigerian Journal of Clinical Practice* 2017;20:369. <https://doi.org/10.4103/1119-3077.196117>.

- [59] Graham SM, Moffat C, Lubega N, Mkandawire N, Burgess D, Harrison WJ. Total Knee Arthroplasty in a Low-Income Country. *JB JS Open Access* 2018;3.
<https://doi.org/10.2106/JBJS.OA.17.00029>.
- [60] Davies PS, Graham SM, Maqungo S, Harrison WJ. Total joint replacement in sub-Saharan Africa: a systematic review. *Trop Doct* 2019;49:120–8.
<https://doi.org/10.1177/0049475518822239>.
- [61] UMLS Metathesaurus - ICD9CM (International Classification of Diseases, Ninth Revision, Clinical Modification) - Synopsis n.d.
<https://www.nlm.nih.gov/research/umls/sourcereleasedocs/current/ICD9CM/index.html> (accessed May 12, 2023).
- [62] Pabinger C, Lothaller H, Geissler A. Utilization rates of knee-arthroplasty in OECD countries. *Osteoarthritis and Cartilage* 2015;23:1664–73. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2015.05.008>.
- [63] Vinet M, Le Stum M, Gicquel T, Clave A, Dubrana F. Unicompartmental knee arthroplasty: A French multicenteric retrospective descriptive study from 2009 to 2019 with projections to 2050. *Orthop Traumatol Surg Res* 2023:103581. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2023.103581>.
- [64] Malcolm T, Szubski CR, Schiltz NK, Klika AK, Koroukian SM, Barsoum WK. Prevalence and Perioperative Outcomes of Off-Label Total Hip and Knee Arthroplasty in the United States, 2000–2010. *The Journal of Arthroplasty* 2015;30:1872–8.
<https://doi.org/10.1016/j.arth.2015.05.020>.
- [65] Kim H-A, Kim S, Seo YI, Choi HJ, Seong S-C, Song YW, et al. The epidemiology of total knee replacement in South Korea: national registry data. *Rheumatology (Oxford)* 2008;47:88–91.
<https://doi.org/10.1093/rheumatology/kem308>.
- [66] Losina E, Thornhill TS, Rome BN, Wright J, Katz JN. The Dramatic Increase in Total Knee Replacement Utilization Rates in the United States Cannot Be Fully Explained by Growth in Population Size and the Obesity Epidemic. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94:201–7.
<https://doi.org/10.2106/JBJS.J.01958>.
- [67] Gelber AC, Hochberg MC, Mead LA, Wang NY, Wigley FM, Klag MJ. Joint injury in young adults and risk for subsequent knee and hip osteoarthritis. *Ann Intern Med* 2000;133:321–8.
<https://doi.org/10.7326/0003-4819-133-5-200009050-00007>.

[68] Driban JB, Hootman JM, Sitler MR, Harris KP, Cattano NM. Is Participation in Certain Sports Associated With Knee Osteoarthritis? A Systematic Review. *Journal of Athletic Training* 2017;52:497–506. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.2.08>.

1 Titre

Incidence rate of Total Knee arthroplasties in eleven European countries: do they reach a plateau?

2 Objectif 2

La revue de littérature internationale menée nous a montré que les actes d'arthroplastie du genou sont en croissance dans tous les pays étudiés, en conséquence de plusieurs facteurs. Toutefois, cette dernière n'est pas homogène et présente des intensités variables, allant d'une progression forte à faible, en fonction des pays et, au sein de ces derniers, des périodes étudiées.

Les causes de ces disparités sont multifactorielles, et semblent suivre un schéma similaire, bien que décalé dans le temps. Ce schéma peut être décomposé en trois phases bien définies : une période initiale à faible incidence du nombre d'actes, à laquelle succède une croissance rapide, pendant laquelle l'incidence augmente fortement. Cette croissance se stabilise ensuite à un niveau plus élevé, tout en étant accompagnée d'une croissance ultérieure plus modérée.

En partant de l'hypothèse que chaque pays se trouve dans l'une de ces trois phases, en raison de modèles sous-jacents propres, le présent article analyse les dynamiques de croissance des actes d'arthroplasties du genou sur une même période de temps dans onze pays européens.

Afin de pouvoir mener cette comparaison, les données utilisées proviennent d'une même source de données reconnue à l'échelle européenne : EUROSTAT. Cette dernière est l'office de statistique de l'Union européenne, dont la mission est de fournir des statistiques de haute qualité à la Commission Européenne, pour permettre des comparaisons entre les pays et les régions. EUROSTAT agrège ainsi les données de chacune des agences statistiques nationales, selon des codifications communes.

Il est également essentiel de noter que les données relatives aux États-Unis, malgré l'importance du pays, n'ont pas pu être incluses en raison de leur absence dans les bases de données communes d'organismes internationaux tels que l'OCDE (Office de la Coopération et du Développement Economique). Ce dernier agrège également des données issues des agences statistiques de ses pays membres.

3 Article

Incidence rate of Total Knee arthroplasties in eleven European countries: do they reach a plateau?

**Mathieu LE STUM (MSc)^{1,2*}, Myriam LE GOFF-PRONOST (PhD)³, Eric STINDEL (MD, PhD)^{2,4},
Guillaume DARDENNE (PhD)⁴**

¹ Institut national de la santé et de la recherche médicale, INSERM, Laboratory for Medical Information Processing (LATIM), UMR1101, Brest, France.

² Université de Brest, UBO, LATIM, UMR 1101, Brest, France

³ Institut Mines-Telecom, IMT Atlantique, LATIM, UMR 1101, M@rsouin, Brest, France,

⁴ Centre Hospitalo-Universitaire de Brest, CHRU Brest, LATIM, UMR 1101, Brest, France

***CORRESPONDING AUTHOR :**

Mathieu LE STUM

LaTIM (Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale – LaTIM UMR INSERM 1101)

IBRBS – Faculté de Médecine

22 rue Camille Desmoulins

29200 BREST - FRANCE

Email: mathieu.lestum@univ-brest.fr

ABSTRACT

Background

From several decades, the evolutions of the Incidence Rate (IR) of Primary Knee Arthroplasties are continuously increasing worldwide and have been widely studied in several countries. Some recent works have highlighted the fact that the IR is following a sigmoid curve composed of an exponential growth followed by a linear phase and finished by a plateau. Our objective is to assess the IR evolution of eleven European countries, representing thus a large proportion of this continent, regarding this sigmoid.

Methods

IRs of primary knee arthroplasties for Austria, Denmark, Finland, France, Germany, Hungary, Italy, Poland, Spain, Sweden, and the United Kingdom between 2005 and 2019 were retrieved from the EUROSTAT database. Several regression models were fitted to each country's IRs: Poisson, linear, asymptotic, logistic, and Gompertz regression. For each country and each model, the RMSE (Root Mean Square Error) and R^2 were calculated and used to estimate their position with respect to this sigmoid curve

Results

The best regression models for knee arthroplasties varied following countries. Logistic and Gompertz regressions had the lowest RMSE and R^2 values for Austria, Denmark, Germany, Sweden, and the UK. Hungary, Italy, and Poland favored the Poisson regression model. Finland and Spain presented difficulties in determining the optimal model (linear or Poisson), while France faced challenges in choosing between logistic, Gompertz, and linear regression.

Conclusion

In conclusion, the growth dynamics of IR are different following European countries. And some countries seem to have already reached the plateau and will therefore slightly growth in the future.

KEYWORDS

Total Knee Arthroplasty, Europe, Projections, trends, evolution

INTRODUCTION

Primary knee arthroplasties are among the most common orthopaedic procedures worldwide. In Europe alone, according to EUROSTAT, there were 754,622 such interventions in 2019, and 680,114 in 2014 in the United States [1]. Over the past few decades, the incidence rate (IR) - that is, the number of procedures per 100,000 people - has increased unevenly across different countries. For instance, in the USA, the IR for primary knee arthroplasties rose by 119% from 2000 to 2014. In England, it is by 100% between 1991 and 2000 [2], while in Sweden it increased by 165% from 1995 to 2013 [3]. Austria also saw a continuous rise in the number of primary knee arthroplasties procedures between 2009 and 2015 [4].

While this overall increase is mainly supported by the natural augmentation of the osteoarthritis incidence which is mainly driven by the combined effect of an ageing population [5,6] and obesity [7], it is also the result of the extended arthroplasty indications on younger patients, mainly related to the improved surgical techniques and the implant quality [5,8,9]. At the same time, faced with rising costs of caring for patients living longer and more actively, health systems will be confronted with sharply increasing expenses. A precise analysis seems imperative to anticipate future management and financial issues [10–18]

Although uneven increases in primary knee arthroplasty IR have been observed in all OECD countries [19,20], disparities exist between countries and trends projection models. These models, which are mostly constructed based on past data, are often based on exponential or linear growth. However, recent works have questioned the systematic and almost exponential increase of IR and emphasize the fact that a stagnation of the IR is expected, leading to an upper asymptote. In 2014, Nemes et al. first proposed a sigmoid curve model, showing an exponential growth phase followed by a stagnation phase with minimal or no growth, reaching a maximum IR [21]. An extensive analysis of historical data from Sweden demonstrates a gradual slowdown in growth since the 1980s [3], with similar trends seen in Denmark but occurring later, after the 2000s [22]. Studies using the National Inpatient Sample (NIS) database for the United States revealed weak growth from 1993 to 1999, followed by accelerated growth from 2000 to 2012 [1,23]. Additionally, a slowdown was observed from 2008 to 2014 [1].

Our hypothesis asserts that the growth trajectories of primary knee arthroplasty incidence rates in European countries exhibit distinct patterns with a conclusive trend toward stabilization. This study endeavours to evaluate historical incidence rates to enhance the precision of forecasting potential future trends, to better adapt healthcare systems.

METHODS

DATA

The IR of primary knee arthroplasties, were directly retrieved from the European Union EUROSTAT database (<https://ec.europa.eu/eurostat/>) between 2005 and 2019 for eleven European countries: Austria, Denmark, Finland, France, Germany, Hungary, Italy, Poland, Spain, Sweden, and United Kingdom (UK). Due to the Brexit, the data for UK from the year 2019 has been extracted from the OECD database (<https://stats.oecd.org>). A data quality control was conducted between the Eurostat and OECD databases from 2005 to 2018 for UK to assess similarity between both databases. The data were found to be similar. Data for 2020 and 2021 have been excluded of our study because this period was not representative of the natural evolution due to the COVID crisis. Data for 2022 are not yet available.

Countries were selected based on the following criteria: (1) representativeness of different European regions, (2) availability of complete data throughout the study period, and (3) previous inclusion in international study for comparative analysis. Data extraction utilized the ICD-9-CM 81.54 (total knee replacement) code, a standard classification maintained and updated by the World Health Organization for international comparisons [19,20]. The EUROSTAT database, which gathers official data from national health systems, ensured consistent data acquisition across all European countries.

All studies involving human participants adhered to ethical standards set by institutional or national research committees and the 1964 Helsinki Declaration, including subsequent amendments or similar ethical standards.

As previously noted in the literature [4] [24], IR of primary knee arthroplasties have been categorized into three groups: high (above 200), medium (between 100 and 200), and low

(below 100) IR. This classification system allows the comparison of the number of arthroplasty procedures performed in different countries, based on the scale of IR.

STATISTICS

Historical growth rates across countries were calculated by using the compound annual growth rate (CAGR), which is a geometric progression ratio that estimates the smoothed annual growth rate by considering the values at the beginning and the end of the period under study. The CAGR allows the comparison of growth rates over time [3,20] as it reduces the impact of short-term fluctuations. In each country, we compared two similar time periods (8 and 7 years, respectively): the period from 2005 to 2012, which includes the economic downturns of 2008-2009 as well as the financial crisis and European debt crisis between 2010 and 2012-[25] and the period from 2013 to 2019 which corresponds to the post-recession years before the crisis of COVID-19. These time periods were selected to align as closely as possible with those previously used in the literature [1,3,22,23,25–28].

MODELS

To analyze the data from a dynamic point of view, three types of regression analysis were considered over the entire period in this study: (1) a Poisson regression analysis assuming exponential growth throughout the time period, (2) a linear regression analysis assuming steady growth over time, and (3), as introduced by Nemes et al [3,21], a regression framework assuming the existence of an upper asymptote and composed of three competing models: asymptotic, logistic, and Gompertz regressions. Since it is presumed that the population's growth is not indefinite, the sigmoid curve was subsequently examined.

The sigmoid curve, which characterizes many biological processes of growing population [29], can be divided into three distinct phases which are (1) the lag phase and exponential take off, (2) the linear phase, and (3) the plateau phase [30,31]. These three steps come one after the other and can define different levels of maturity based on their ability to fit the data. Thus, it is assumed that if the IR evolution of a country aligns closely with a linear or Poisson regression, it suggests constant or exponential growth over time, corresponding to

the linear or exponential phase. Conversely, if the IR evolution is closer to an asymptotic regression provided by the three competing models, it suggests that the country is reaching the plateau phase.

Poisson regression model parameters were estimated using the Wald test. The quality of adjustment, including goodness of fit and maximum likelihood, was evaluated using deviance and Pearson chi-square values [21,32]. Linear regression parameters were estimated using the student test, and assumptions of normality (Shapiro test), absence of heteroscedasticity (Breusch Pagan test), and autocorrelation (Breusch-Godfrey test) were assessed [1]. Asymptotic, logistic, and Gompertz regressions utilized nonlinear least-squares estimation with the Levenberg-Marquardt optimization algorithm to determine the asymptote and parameters [3,21]. All models were validated with an alpha risk of 5%.

Adjusted R^2 was calculated for linear regression, while pseudo- R^2 values were computed for Poisson, asymptotic, logistic, and Gompertz regressions to assess their performance. [1].

In order to determine the most appropriate model, we used the Root Mean Square Error (RMSE), which measures the difference between the predicted and observed values. A smaller RMSE value indicates greater accuracy of the model's predictions.

All statistics were conducted using the R-4.0.2 software.

Ethical approval was not required for the study protocol as publicly available data from EUROSTAT were utilized.

RESULTS

The countries included in the study had a total population of 401.8 million people in 2019, accounting for 78.3% of the European Union's population (including United Kingdom). These countries also reported 653,011 primary knee replacements, representing 86.5% of all primary knee replacements in the region.

The volume of primary knee replacements increased by 60% during the study period, from 390,000 to 653,011. Between 2005 and 2019, the IR increased for all studied countries. In 2019, Austria, Denmark, Finland, and Germany had a high IR, while France, Italy, Spain, Sweden, the United Kingdom, and had a medium IR. Hungary and Poland had a low IR (Figure 1).

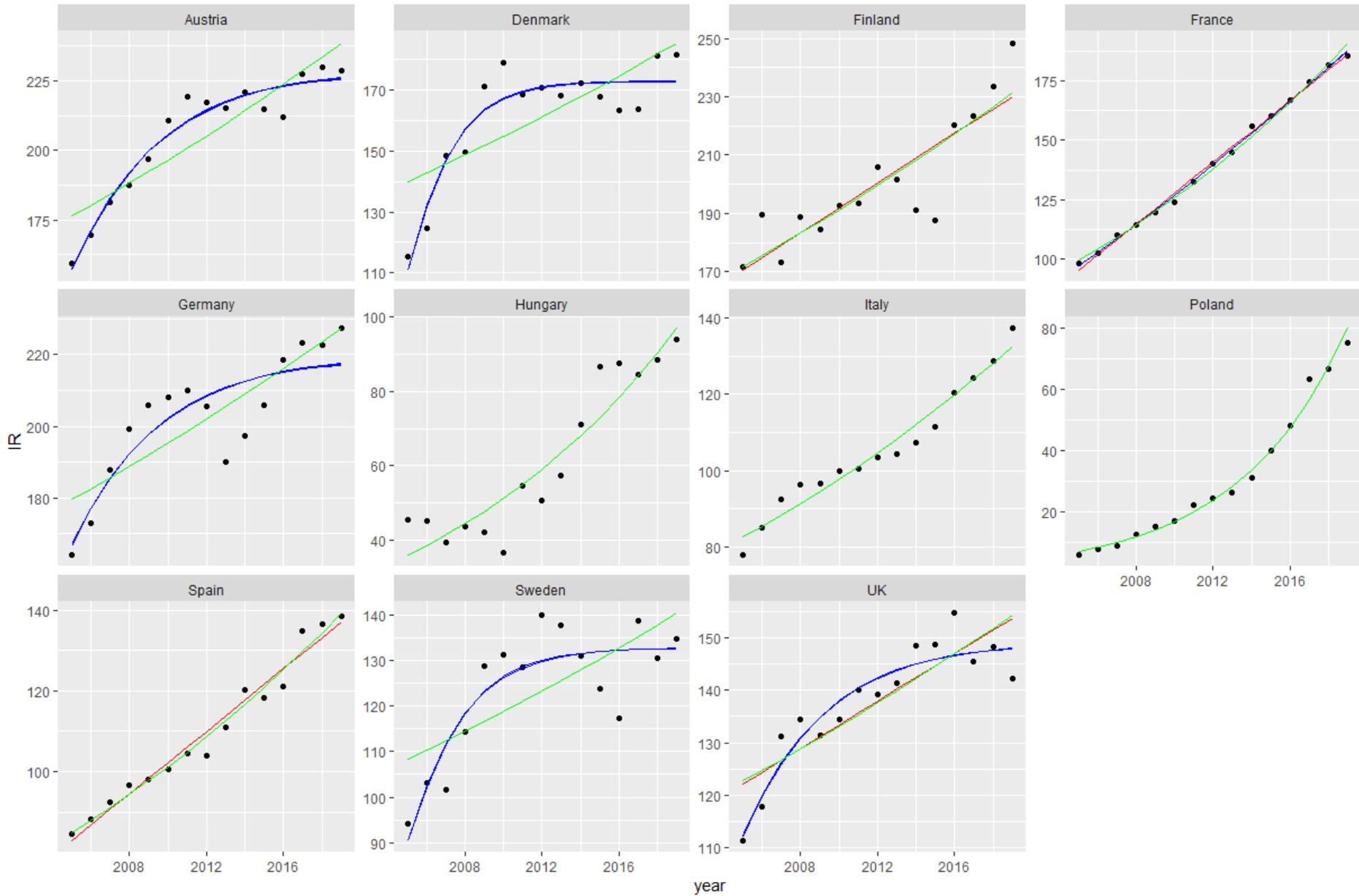


Figure 1: From 2005 to 2019, Incidence Rate (IR) and projections for the knee estimated using the three (asymptotic, logistic and Gompertz) competed models (blue), the Poisson (green) and the Linear (red) models. Only validated models are represented.

The Compound Annual Growth Rate (CAGR) of the IR and volume increased for all the studied countries from 2005 to 2019. However, this growth was not uniform, with Poland experiencing the strongest increase and Austria, Finland, Germany, Sweden, and the United Kingdom showing the lowest growth rates. There is also a notable difference between the two sub-periods. For instance, compared to the 2005-2012 period, Hungary had a considerable increase during 2013-2019, whereas Sweden, the United Kingdom and Austria showed a significant decrease. Some countries slightly moved up (Finland, Italy and Spain) or down (Denmark, France, Germany and Poland) in the second period, while Spain remained stable (Table 1).

Country	Incidence Rate (IR)				CAGR IR			Number of procedure				CAGR Volume		
	2005	2012	2013	2019	2005-2019	2005-2012	2013-2019	2005	2012	2013	2019	2005-2019	2005-2012	2013-2019
Austria	159.5	217.1	215.3	228.6	2.6%	4.5%	1.0%	13126	18303	18260	20296	3.2%	4.9%	1.8%
Denmark	115.3	170.9	168.5	203.2	4.1%	5.8%	3.2%	6248	9558	9461	11813	4.7%	6.3%	3.8%
Finland	171.6	206.0	201.6	242.1	2.5%	2.6%	3.1%	9003	11154	10963	13369	2.9%	3.1%	3.4%
France	98.4	140.3	145.2	185.0	4.6%	5.2%	4.1%	61986	91830	95525	124648	5.1%	5.8%	4.5%
Germany	164.0	205.5	190.0	227.4	2.4%	3.3%	3.0%	135241	165252	153210	188985	2.4%	2.9%	3.6%
Hungary	45.4	50.7	57.3	93.9	5.3%	1.6%	8.6%	4584	5030	5671	9172	5.1%	1.3%	8.3%
Italy	77.7	103.5	104.4	137.4	4.2%	4.2%	4.7%	45048	61618	62896	82067	4.4%	4.6%	4.5%
Poland	5.7	24.5	26.2	75.1	20.2%	23.2%	19.2%	2164	9326	9975	28508	20.2%	23.2%	19.1%
Spain	84.5	104.0	111.1	138.6	3.6%	3.0%	3.8%	36903	48662	51784	65316	4.2%	4.0%	3.9%
Sweden	94.1	139.9	137.6	134.6	2.6%	5.8%	-0.4%	8495	13314	13211	13833	3.5%	6.6%	0.8%
United Kingdom	111.2	139.2	141.5	142.2	1.8%	3.3%	0.1%	67202	88682	90703	95004	2.5%	4.0%	0.8%
Total	100.0	131.0	130.4	159.8	3.4%	3.9%	3.4%	390000	522729	521659	653011	3.8%	4.3%	3.8%

Table 1: Incidence rate and number of procedure in the 11 European countries selected. CAGR = Compound Annual Growth Rate.

The IR and regressions for all countries are presented in the figure 2, and the RMSE and R² values are provided in Table 2.

The smallest RMSE is observed with:

- Asymptotic, logistic and Gompertz for Austria, Germany and UK.
- Logistic and Gompertz regressions for Denmark and Sweden.
- Poisson regression for Hungary, Italy and Poland.
- Either Linear or Poisson regressions for Finland and Spain.
- Logistic, Gompertz, linear regressions for France

Country	Asymptotic regression	Logistic regression	Gompertz regression	Linear regression	Poisson regression
Austria	5.0 (0.94)	4.9 (0.95)	4.9 (0.95)	-	9.9 (0.78)
Denmark	-	6.6 (0.87)	6.8 (0.87)	-	12.9 (0.52)
Finland	-	-	-	10.7 (0.73)	10.3 (0.76)
France	-	1.4 (0.99)	1.4 (0.99)	1.8 (0.99)	2.2 (0.99)
Germany	8.7 (0.75)	8.9 (0.74)	8.8 (0.75)	-	9.6 (0.69)
Hungary	-	-	-	-	7.2 (0.85)
Italy	-	-	-	-	3.2 (0.96)
Poland	-	-	-	-	2.5 (0.99)
Spain	-	-	-	3.0 (0.96)	2.6 (0.98)
Sweden	-	6.6 (0.77)	6.7 (0.77)	-	10.1 (0.48)
United Kingdom (UK)	3.7 (0.89)	3.8 (0.89)	3.7 (0.89)	5.8 (0.72)	6.1 (0.72)

Table 2: RMSE and pseudo R² or R² (between brackets) for the primary knee arthroplasties. Boxes are empty (-) for non-validated models.

Based on the results from this analysis, we can deduce that European countries are situated in different dynamic phases along the sigmoid curve (Figure 3). Thus, for primary knee arthroplasties, Austria, Denmark, Germany, Sweden, and the UK reach the plateau phase since the completed models, such as the asymptotic, logistic, or Gompertz regressions obtained the best RMSE and R^2 . In contrast, since the Poisson regression is better suited for Hungary, Poland and Italy, these countries are in the early stages of the sigmoid.

Results are not so straightforward for some countries which are probably in an intermediate phase because of equivalent RMSE and R^2 for different models. For knee arthroplasties, Finland and Spain are likely at the end of the exponential phase and entering the linear phase, since both the Poisson and the Linear regression models are the best fitted models to their IR. For France, a similar conclusion can be made, as it appears to have reached the deceleration phase following the exponential and linear phases.

DISCUSSION

We can observe from this study that significant IR dissimilarities (levels and percentage growth) can be observed between the European countries for primary knee arthroplasties.

However, this analysis alone does not provide a comprehensive understanding of the evolution of IR over the studied period. Therefore, growth curves are valuable tools that can describe how a variable increases over a time interval until it approaches its saturation value [33]. Recently, several studies have questioned the systematic and almost exponential increase of IR observed in the literature, emphasizing the potential for stagnation and reaching an upper asymptote. Based on this assumption, we have assessed the IR evolution of several European countries for knee arthroplasties.

Different regression models, including linear, Poisson, and three competing models (asymptotic, logistic, and Gompertz), have been applied to the available data. These models were analysed for their validity and RMSE to determine the most probable growth model during the 15 years of the study. Based on this analysis, it can be observed that Sweden, UK, Denmark, Germany, and Austria better fit the competing models, reaching their maximum incidence rates. In contrast, Poland, Hungary, and Italy are most suited to an exponential growth model. Three countries are in an

intermediate position: Spain and Finland exhibit characteristics between exponential and linear growth, while France shows traits between linear and the competing models. For the former group, this may indicate that they are at the end of their exponential growth and entering the linear phase. For the latter, it may suggest that it is transitioning from the linear to the asymptotic phase.

Published studies for specific countries confirm these observations for primary knee arthroplasties. For instance, previous authors have shown that Sweden [3,21] and Denmark [22] are both situated in the asymptotic phase. In Germany, Worlicek et al. [34] and Pilz et al. [35] have also observed a slight increase, indicating the reach of the plateau. Likewise, in Austria, an asymptotic pattern and continued growth have been observed [4]. For France, the existence of linear or logistic growth, with difficulties to segregate, is shown by detailed analyses of the national database [36,37]. In the UK, moderate growth was observed in the 1990s, followed by accelerating growth in the first decade of the 2000s [38,39]. This observed profile therefore seems to be consistent with our positioning on the sigmoid curve.

Although all countries are expected to exhibit asymptotic behavior, the timeframes for reaching this phase vary. The specific factors contributing to this quasi-stabilization of incidence rates (IR) still need to be determined precisely and are likely to be country-specific. Possible factors influencing these patterns can be multiple and may include economic growth, access to healthcare systems, care protocols, demographic changes, or the number of orthopedic surgeons.

Thus, for the countries located in the exponential or the linear phase, three factors can explain this situation: (1) the improvement of the capacity to carry out these procedures, such as the development of specialized structures, perioperative care, and medical demographics [37,40,41]; (2) the growing number of procedures performed in patients aged 64 and below [19,20]; and (3) certain incentive-based policy decisions [42]. On the other hand, for countries that have reached the plateau phase, factors such as healthcare system (reimbursement for all), few hindrances to accessing surgery and an IR for knee replacements that aligns closely with the actual need for joint replacement.[3,4,21,22] can explain this situation.

Although we have demonstrated a three-step growth pattern in countries, leading to a theoretical plateau and maximum IR, this same IR varies significantly among different countries. The highest levels are observed in northern and central Europe. Apart from the demographic and medical

factors mentioned earlier, this high IR can be partly attributed to an increased rate of surgical interventions, rather than a higher incidence rate of osteoarthritis itself [19,20]. The preference for surgical treatment over non-surgical options has shifted, allowing for earlier selection of surgical treatment [43]. For primary knee arthroplasties, the IR has been observed to rise faster in patients under 65 years of age in Nordic countries (Denmark, Norway, Finland, and Sweden) and the USA compared to other age groups. This trend can be attributed to a broader range of indications for primary knee arthroplasties, which now includes younger patients [42], in addition to a more active population susceptible to sports-related injuries [43–45], and increased patient demand influenced by direct-to-consumer advertising [43]. It is interesting to note that in OECD countries, there is a positive correlation between healthcare expenditure and the utilization rate of knee arthroplasties. Specifically, it has been observed that the rate of knee replacements increases as economic resources grow, providing better accessibility for younger patients. Consequently, in countries with limited economic resources, priority is given to elderly patients over younger individuals for joint replacement [19,20]. This ongoing development of surgical care can also contribute to an increase in the number of interventions due to economic pressures. The desire to maintain an active lifestyle and advancements in prosthetic technology may lead patients to take a more proactive approach and express interest in replacement surgery themselves. Additionally, through discussions with their physicians, patients can become more informed about the available opportunities, raising questions about the concept of induced demand [43]. All these factors can contribute to the potential for overtreatment of osteoarthritis through arthroplasties [4,34].

The main limitation of this study is related to the data provided by EUROSTAT, which are connected to each country's national accountability system. Therefore, variations may exist between the data officially reported to EUROSTAT and the data utilized in previous studies conducted in each country, particularly in Northern European countries. Despite EUROSTAT's efforts to gather consistent data from various official sources, coding effects may still occur. Additionally, the use of international codes (e.g., ICD-9 classification) was necessary for cross-country comparability, but these codes cannot be further segmented or subsetted in the available international databases. The second limitation is linked to the fact that an analysis by gender or age is not possible with this database. In fact, EUROSTAT database does not provide data stratified by gender and age. This can only be done by an analysis of each national database, that are

difficult to access to non nationals. In these national databases, having detailed informations on variable such as Body Mass Index, osteoarthritis, practice of sport or socio-professional category would also be useful to better understand the evolution of each national societies so as to the main national associated factors linked to arthroplasties. The third limitation is due to the COVID pandemic crisis and the lockdown. Therefore, data from the years 2020 and 2021, which do not accurately reflect the usual activity, were excluded from this study. It would be interesting to take them into account in future years in order to determine if they have had an impact on the past dynamics.

CONCLUSION

In conclusion, this study emphasizes the diverse dynamics of knee joint trends across European countries. Those at the asymptote can anticipate limited future changes in incidence rates (IR), while countries in exponential or linear phases will likely reach a plateau. Precisely predicting the timing of this plateau requires a comprehensive multi-year analysis.

FUNDING

This work has been supported by the French State, managed by the National Research Agency, under the Future Investments Program within France 2030, with the reference ANR-17-RHUS-0005 (Project FollowKnee). No commercial funding was received for this study.

CONFLICT OF INTEREST

On behalf of all the authors, the corresponding author states that there are no conflict of interest

REFERENCES

- [1] Sloan M, Premkumar A, Sheth NP. Projected Volume of Primary Total Joint Arthroplasty in the U.S., 2014 to 2030. *JBJS* 2018;100:1455–60. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.01617>.
- [2] Dixon T, Shaw M, Ebrahim S, Dieppe P. Trends in hip and knee joint replacement: socioeconomic inequalities and projections of need. *Annals of the Rheumatic Diseases* 2004;63:825–30. <https://doi.org/10.1136/ard.2003.012724>.
- [3] Nemes S, Rolfson O, W-Dahl A, Garellick G, Sundberg M, Kärrholm J, et al. Historical view and future demand for knee arthroplasty in Sweden. *Acta Orthop* 2015;86:426–31. <https://doi.org/10.3109/17453674.2015.1034608>.
- [4] Leitner L, Türk S, Heidinger M, Stöckl B, Posch F, Maurer-Ertl W, et al. Trends and Economic Impact of Hip and Knee Arthroplasty in Central Europe: Findings from the Austrian National Database. *Scientific Reports* 2018;8:1–5. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23266-w>.
- [5] Kurtz SM, Lau E, Ong K, Zhao K, Kelly M, Bozic KJ. Future Young Patient Demand for Primary and Revision Joint Replacement: National Projections from 2010 to 2030. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 2009;467:2606. <https://doi.org/10.1007/s11999-009-0834-6>.
- [6] Ageing n.d. /ageing (accessed November 19, 2020).
- [7] Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. *The Lancet* 2019;393:1745–59. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30417-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30417-9).
- [8] Julin J, Jämsen E, Puolakka T, Konttinen YT, Moilanen T. Younger age increases the risk of early prosthesis failure following primary total knee replacement for osteoarthritis. *Acta Orthopaedica* 2010;81:413–9. <https://doi.org/10.3109/17453674.2010.501747>.
- [9] Losina E, Paltiel AD, Weinstein AM, Yelin E, Hunter DJ, Chen SP, et al. Lifetime medical costs of knee osteoarthritis management in the United States: impact of extending indications for total knee arthroplasty. *Arthritis Care Res (Hoboken)* 2015;67:203–15. <https://doi.org/10.1002/acr.22412>.
- [10] OCDE. Panorama de la santé 2021: Les indicateurs de l'OCDE. OECD; 2021. <https://doi.org/10.1787/fea50730-fr>.
- [11] European Commission. Directorate General for Economic and Financial Affairs. The 2021 ageing report: economic & budgetary projections for the EU Member States (2019 2070). LU: Publications Office; 2021.

- [12] Lopez CD, Boddapati V, Neuwirth AL, Shah RP, Cooper HJ, Geller JA. Hospital and Surgeon Medicare Reimbursement Trends for Total Joint Arthroplasty. *Arthroplast Today* 2020;6:437–44. <https://doi.org/10.1016/j.artd.2020.04.013>.
- [13] Heo K, Karzon A, Shah J, Ayeni A, Rodoni B, Erens G, et al. Trends in Costs and Professional Reimbursements for Revision Total Hip and Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2023.08.062>.
- [14] Peterson J, Sodhi N, Khlopas A, Piuizzi NS, Newman JM, Sultan AA, et al. A Comparison of Relative Value Units in Primary Versus Revision Total Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty* 2018;33:S39–42. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2017.11.070>.
- [15] Gadinsky NE, Manuel JB, Lyman S, Westrich GH. Increased Operating Room Time in Patients With Obesity During Primary Total Knee Arthroplasty: Conflicts for Scheduling. *The Journal of Arthroplasty* 2012;27:1171–6. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2011.12.012>.
- [16] Okafor C, Hodgkinson B, Nghiem S, Vertullo C, Byrnes J. Cost of septic and aseptic revision total knee arthroplasty: a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord* 2021;22:706. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04597-8>.
- [17] Garbarino LJ, Gold PA, Sodhi N, Anis HK, Ehiorobo JO, Boraiah S, et al. The effect of operative time on in-hospital length of stay in revision total knee arthroplasty. *Ann Transl Med* 2019;7:66. <https://doi.org/10.21037/atm.2019.01.54>.
- [18] Klug A, Gramlich Y, Rudert M, Drees P, Hoffmann R, Weißenberger M, et al. The projected volume of primary and revision total knee arthroplasty will place an immense burden on future health care systems over the next 30 years. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2021;29:3287–98. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06154-7>.
- [19] Pabinger C, Geissler A. Utilization rates of hip arthroplasty in OECD countries. *Osteoarthritis and Cartilage* 2014;22:734–41. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2014.04.009>.
- [20] Pabinger C, Lothaller H, Geissler A. Utilization rates of knee-arthroplasty in OECD countries. *Osteoarthritis and Cartilage* 2015;23:1664–73. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2015.05.008>.
- [21] Nemes S, Gordon M, Rogmark C, Rolfson O. Projections of total hip replacement in Sweden from 2013 to 2030. *Acta Orthop* 2014;85:238–43. <https://doi.org/10.3109/17453674.2014.913224>.

- [22] Daugberg L, Jakobsen T, Nielsen PT, Rasmussen M, El-Galaly A. A projection of primary knee replacement in Denmark from 2020 to 2050. *Acta Orthopaedica* 2021;1–4. <https://doi.org/10.1080/17453674.2021.1894787>.
- [23] Inacio MCS, Paxton EW, Graves SE, Namba RS, Nemes S. Projected increase in total knee arthroplasty in the United States – an alternative projection model. *Osteoarthritis and Cartilage* 2017;25:1797–803. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2017.07.022>.
- [24] Vielgut I, Kastner N, Pichler K, Holzer L, Glehr M, Gruber G, et al. Application and surgical technique of total knee arthroplasties: a systematic comparative analysis using worldwide registers. *Int Orthop* 2013;37:1465–9. <https://doi.org/10.1007/s00264-013-1933-2>.
- [25] Kurtz SM, Ong KL, Lau E, Bozic KJ. Impact of the Economic Downturn on Total Joint Replacement Demand in the United States: Updated Projections to 2021. *JBJS* 2014;96:624–30. <https://doi.org/10.2106/JBJS.M.00285>.
- [26] Kim TW, Kang S-B, Chang CB, Moon S-Y, Lee Y-K, Koo K-H. Current Trends and Projected Burden of Primary and Revision Total Knee Arthroplasty in Korea Between 2010 and 2030. *J Arthroplasty* 2021;36:93–101. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2020.06.064>.
- [27] Romanini E, Decarolis F, Luzi I, Zanolli G, Venosa M, Laricchiuta P, et al. Total knee arthroplasty in Italy: reflections from the last fifteen years and projections for the next thirty. *International Orthopaedics (SICOT)* 2019;43:133–8. <https://doi.org/10.1007/s00264-018-4165-7>.
- [28] Hooper GJ, Lee AJ-J, Rothwell AG, Frampton CM. Current trends and projections in the utilisation rates of hip and knee replacement in New Zealand from 2001 to 2026. *The New Zealand Medical Journal* 2014.
- [29] Modeling of the Bacterial Growth Curve n.d. <https://journals.asm.org/doi/epdf/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990> (accessed September 22, 2022).
- [30] Myhrvold NP. Revisiting the Estimation of Dinosaur Growth Rates. *PLoS One* 2013;8:e81917. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081917>.
- [31] A phasic model for the analysis of sigmoid patterns of growth n.d. <https://lieth.ucdavis.edu/research/phasic/3phas.htm> (accessed November 5, 2021).

- [32] Kurtz S, Ong K, Lau E, Mowat F, Halpern M. Projections of Primary and Revision Hip and Knee Arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *JBS* 2007;89:780–5.
<https://doi.org/10.2106/JBS.F.00222>.
- [33] Ware A, Power N. Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth functions. *Renewable Energy* 2017;104:50–9.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.045>.
- [34] Worlicek M, Koch M, Daniel P, Freigang V, Angele P, Alt V, et al. A retrospective analysis of trends in primary knee arthroplasty in Germany from 2008 to 2018. *Sci Rep* 2021;11:5225.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-84710-y>.
- [35] Pilz V, Hanstein T, Skripitz R. Projections of primary hip arthroplasty in Germany until 2040. *Acta Orthopaedica* 2018;89:308–13. <https://doi.org/10.1080/17453674.2018.1446463>.
- [36] Le Stum M, Gicquel T, Dardenne G, Le Goff-Pronost M, Stindel E, Clavé A. Total knee arthroplasty in France: Male-driven rise in procedures in 2009-2019 and projections for 2050. *Orthop Traumatol Surg Res* 2022:103463. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2022.103463>.
- [37] Erivan R, Tardieu A, Villatte G, Ollivier M, Jacquet C, Descamps S, et al. Knee surgery trends and projections in France from 2008 to 2070. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 2020;106:893–902. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.02.018>.
- [38] Culliford DJ, Maskell J, Beard DJ, Murray DW, Price AJ, Arden NK. Temporal trends in hip and knee replacement in the United Kingdom: 1991 to 2006. *J Bone Joint Surg Br* 2010;92:130–5.
<https://doi.org/10.1302/0301-620X.92B1.22654>.
- [39] Culliford D, Maskell J, Judge A, Cooper C, Prieto-Alhambra D, Arden NK. Future projections of total hip and knee arthroplasty in the UK: results from the UK Clinical Practice Research Datalink. *Osteoarthritis and Cartilage* 2015;23:594–600.
<https://doi.org/10.1016/j.joca.2014.12.022>.
- [40] Jimenez-Garcia R, Villanueva-Martinez M, Fernandez-de-Las-Penas C, Hernandez-Barrera V, Rios-Luna A, Garrido PC, et al. Trends in primary total hip arthroplasty in Spain from 2001 to 2008: evaluating changes in demographics, comorbidity, incidence rates, length of stay, costs and mortality. *BMC Musculoskelet Disord* 2011;12:43. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-12-43>.
- [41] Erivan R, Villatte G, Dartus J, Reina N, Descamps S, Boisgard S. Progression and projection for hip surgery in France, 2008-2070: Epidemiologic study with trend and projection analysis.

Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research 2019;105:1227–35.
<https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.07.021>.

- [42] Niemeläinen MJ, Mäkelä KT, Robertsson O, W-Dahl A, Furnes O, Fenstad AM, et al. Different incidences of knee arthroplasty in the Nordic countries. *Acta Orthopaedica* 2017;88:173–8.
<https://doi.org/10.1080/17453674.2016.1275200>.
- [43] Losina E, Thornhill TS, Rome BN, Wright J, Katz JN. The Dramatic Increase in Total Knee Replacement Utilization Rates in the United States Cannot Be Fully Explained by Growth in Population Size and the Obesity Epidemic. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94:201–7.
<https://doi.org/10.2106/JBJS.J.01958>.
- [44] Gelber AC, Hochberg MC, Mead LA, Wang NY, Wigley FM, Klag MJ. Joint injury in young adults and risk for subsequent knee and hip osteoarthritis. *Ann Intern Med* 2000;133:321–8.
<https://doi.org/10.7326/0003-4819-133-5-200009050-00007>.
- [45] Driban JB, Hootman JM, Sitler MR, Harris KP, Cattano NM. Is Participation in Certain Sports Associated With Knee Osteoarthritis? A Systematic Review. *Journal of Athletic Training* 2017;52:497–506. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.2.08>.

Article 3

1 Titre

Total knee arthroplasty in France: Male-driven rise in procedures in 2009-2019 and projections for 2050.

2 Objectif 3

L'analyse observationnelle et l'étude des dynamiques des actes d'arthroplastie, comme décrit dans les articles précédents, révèlent des similitudes dans les causes, mais également des différences dans les dynamiques d'un pays à l'autre.

Toutefois, afin de mieux appréhender les mécanismes en jeu, il est nécessaire de disposer de données détaillées ou de cohortes. Étant donné que les systèmes de collecte de données sont propres à chaque pays, leur accès est soumis à la réglementation en vigueur dans chacune des juridictions nationales. De plus, ces données sont souvent rédigées dans la langue du pays concerné. Il est donc difficile de travailler directement sur des données complètes non françaises.

Dans l'objectif de mieux comprendre et cartographier les actes d'arthroplastie concernant la France, l'analyse des données disponibles et accessible de l'assurance maladie a été menée. A partir de ces données, la comparaison avec les autres pays s'en trouvera facilitée.

3 Article



Original article

Total knee arthroplasty in France: Male-driven rise in procedures in 2009–2019 and projections for 2050

Mathieu Le Stum^{a,*}, Thomas Gicquel^b, Guillaume Dardenne^c, Myriam Le Goff-Pronost^d, Eric Stindel^{c,e}, Arnaud Clavé^{e,f}^a Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), laboratoire de traitement de l'information médicale (LATIM), UMR1101, 22, avenue Camille-Desmoulins, 29200 Brest, France^b Clinique mutualiste de la porte de l'Orient, 3, rue Robert-de-la-Croix, 56324 Lorient, France^c Centre hospitalo-universitaire de Brest, CHRU de Brest, LATIM, UMR 1101, 2, avenue Foch, 29200 Brest, France^d Institut Mines-Telecom, IMT Atlantique, LATIM - Inserm UMR 1101, M@rsouin, 655, avenue du Technopôle, 29280 Plouzane, France^e Université de Bretagne Occidentale, UBO, LATIM, UMR 1101, 22, avenue Camille-Desmoulins, 29200 Brest, France^f Service d'orthopédie, clinique Saint-George, 2, avenue de Rimiez, 06100 Nice, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 March 2022

Accepted 9 June 2022

Keywords:

Total knee arthroplasty

Knee

Projection

Epidemiology

Comorbidity

ABSTRACT

Background: The number of Total Knee Arthroplasty (TKA) procedures has been rising steadily for several decades in Europe and the USA. The increase varies in pace across countries, with a gradual climb in northern and central Europe, a slowing in the USA, and an exponential surge in the UK. In France, a 32.2% rise in the number of TKA and unicompartmental knee arthroplasty procedures was documented between 2012 and 2018. However, no study has focussed specifically on changes in both TKA procedures and the features of TKA patients. The objective of this study was to use the French national healthcare database to evaluate (1) increases in TKA procedures according to sex and age, (2) whether TKA is being performed at increasingly younger ages, (3) whether the comorbidity profile at TKA is changing, and (4) whether the TKA incidence rate will stabilise in the future, with a projection for 2050.

Hypothesis: In France, the number of TKA procedures is rising in both males and females but the pace of the increases differs between sexes.

Material and method: This study used data collected in France in 2009–2019, separately for different age groups and for males and females, in the French national healthcare database (*Système national des données de santé*, SNDS) that collects information on all surgical procedures performed nationwide. Based on information about the TKA procedures, we determined (1) the TKA incidence rates with their time trends and (2) indirectly, the comorbidity profiles of the patients at TKA. Linear, Poisson, and logistic models were built to predict incidence rates in 2030, 2040, and 2050.

Results: Between 2009 and 2019, the TKA incidence rate showed a steeper increase in males than in females (from 71.2 to 122.9 [+73%] vs. 124.2 to 181.0 [+46%], respectively). Although this increase was replicated in all age groups, it was sharper in patients younger than 65 years, in both males and females (from 20.9 to 37.9 [+82%] and 33.6 to 51.3 [+53%], respectively). During the study period, the number and proportion of patients increased in the group with mild comorbidities (from 40 093 to 67 430 TKAs, i.e., from 53.1% to 65.7% of all TKAs) but not in the other comorbidity groups. All projection models were validated. Nonetheless, the most likely scenario, provided by the logistic model, is a 33% rise by 2050 in both males and females (i.e., to 151 575 TKA procedures) with a plateau starting around 2030.

Conclusion: Although the increase in TKA procedures is more marked in males than in females, the trends are similar in both sexes, with a sharper rise in the group younger than 65 years and a shift toward patients with milder comorbidities. In the longer term, incidence rate trends follow logistic dynamics, with a plateau starting around 2030. To meet the increasing demand, a corresponding development in relevant healthcare resources must be planned.

Level of evidence: IV, descriptive epidemiological study.

© 2022 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

* Corresponding author.

E-mail address: mathieu.le-stum@inserm.fr (M. Le Stum).

1. Introduction

The number of Total Knee Arthroplasty (TKA) procedures has been increasing steadily for several decades in the USA [1] and in Europe [2–6]. About 720,000 TKA procedures were performed in Europe in 2019 (ec.europa.eu/eurostat/fr/). In France [7], the number was 113,600 in 2018, a 32.2% increase compared to 2012. This overall trend masks differences in the TKA incidence rate (IR) across countries. An international comparison by the OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) documented marked variations in the mean annual IR increase from one country to the next [8]. Longitudinal studies of TKA IR changes showed a plateauing in northern European countries such as Sweden [3] and Denmark [5], a slowing in the USA [1], and an exponential surge in the UK [6].

The overall increase in the TKA IR is chiefly driven by the natural rise in the incidence of osteoarthritis, related in particular to the combined effects of population ageing and obesity [9]. Nonetheless, another factor is the broadening of TKA indications towards younger patients allowed by improvements in both surgical techniques and knee implants [8,10]. Another possible contributor may be the strong progression in males compared to females [3,11,12]. These changes mandate that surgeons, scientific societies, and healthcare authorities be provided with accurate information about the current situation and projections for the future, to allow appropriate planning and development of healthcare resources.

However, to our knowledge, no French study has focussed on the characteristics of the patient population managed by TKA. The objective of this study was to use the French national healthcare database for an evaluation of (1) increases in TKA procedures according to sex and age, (2) whether TKA is being performed in increasingly younger patients, (3) whether the comorbidity profile at TKA is changing, and (4) whether the TKA IR will stabilise in the future, with a projection for 2050. Our hypothesis was that, in France, the number of TKA procedures was rising in both males and females but at a different pace between sexes.

2. Material and methods

2.1. Data and evaluation of increases according to sex and age

This retrospective epidemiological study of TKA procedures performed in France between 1 January 2009 and 31 December 2019 use data recorded in the national health information system (*Programme de médicalisation des systèmes d'information*, PMSI) as part of the national healthcare database (*Système national des données de santé*, SNDS). The French healthcare system requires that all public and private healthcare institutions provide an identifying code for each medical or surgical intervention, to allow reimbursement of the corresponding cost. More specifically, during each hospital admission, an identifying code (CCAM, Medical Act Classification System) is assigned to each healthcare intervention provided to the patient. The codes for each patient, together with other data such as age and sex, are recorded in the PMSI database. We obtained access to this database via a simplified procedure (MR-005) authorised by the French data privacy protection authority (*Commission nationale de l'informatique et des libertés*, CNIL).

The identifying codes for TKA are as follows:

- NFKA007, knee joint replacement by a tricompartmental implant in a patient with coronal-plane malalignment no greater than 10°;
- NFKA008, knee joint replacement by a tricompartmental implant in a patient with coronal-plane malalignment greater than 10°;
- NFKA009, knee joint replacement by a fixed-hinge or rotating implant;

- NFMA006, knee joint reconstruction using a massive or custom-made implant in a patient with a segmental knee defect.

The number of TKA procedures performed in France (including French districts outside Europe) was determined for each year of the study period (2009–2019), separately in males and females and in three age groups, namely, young active patients (0–64 years), young retired patients (65–74 years), and older patients (>75 years). The annual IR was computed by dividing the number of TKA procedures by the number of individuals in the total general population or corresponding age group and normalising the result for 100,000. Demographic information on the population in France was obtained from the national institute for statistics and economic studies (*Institut national des statistiques et études économiques*, INSEE, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2496228>) and reflected a moderate growth scenario.

2.2. Distribution of procedures by diagnosis-related group

The PMSI classifies patients into uniform diagnosis-related groups (DRGs). Each DRG is defined by healthcare interventions similar in nature and cost. The DRG is the basic category used to classify each hospital admission. For each admission, an algorithm determines the corresponding DRG based on the medical and administrative data recorded for each healthcare intervention. The DRG provides indirect information on the comorbidity profile of the patient during the hospital stay, with four levels, from 1 (mild comorbidities) to 4 (very severe comorbidities). The DRG level is determined based on the hospital stay duration and on the health conditions (e.g., obesity, undernutrition, cardiovascular disease, infection, lung disease, or other) present at admission (active medical history) or modified during the stay (intercurrent events, complications). Level 1 DRG indicates the absence of comorbidities or associated complications and a length of stay shorter than 3 days, whereas at the other end of the spectrum, level 4 DRG corresponds to several initial comorbidities and/or associated complications with a length of stay longer than 5 days. Thus, a 63-year-old patient with morbid obesity (body mass index between 40 and 50) and diabetes who experiences no intercurrent events and has a 4-day stay is DRG level 2. For our study, due to constraints related to the MR-005 procedure, the DRG level was available only for 2012 to 2019. Patients were also stratified by sex and age to look for differences in time trends.

2.3. Time trend models and projection for 2050

To evaluate time trends in the TKA IR, several models previously validated by international studies were used. Three regression techniques were applied: (1) Poisson regression assuming an exponential increase throughout the period of interest; (2) linear regression assuming a steady increase over time [1,4,7,13–15]; and, as described by Nemes et al. [3], logistic regression with an initial phase of exponential growth leading to an asymptote or plateau characterised by slow growth [3,16]. Using these models, IR projections for 2050 were estimated. Also, based on the INSEE moderate-growth scenario for French population, the number of TKA procedures was evaluated.

2.4. Statistics

The Z-test was chosen to compare mean ages and Pearson's Chi-squared test to compare proportions. Poisson regression parameters were estimated using Wald's test. Deviance and Pearson's Chi-square value served to assess goodness of fit and maximum likelihood. Linear regression parameters were estimated by applying Student's *t*-test, and linear hypotheses were assessed to

Table 1

Number and incidence rate of total knee arthroplasty in France from 2009 to 2019. Overall increases were determined between 2009 and 2019, and the incidence rates are the number per 100,000 population.

Year	Overall		Males		Females	
	Number of TKAs	Incidence rate	Number of TKAs	Incidence rate	Number of TKAs	Incidence rate
2009	63,365	98.5	22,150	71.2	41,215	124.2
2010	66,389	102.7	23,277	74.4	43,112	129.3
2011	70,969	109.3	25,556	81.3	45,413	135.6
2012	75,454	115.7	27,508	87.1	47,946	142.5
2013	79,007	120.5	29,063	91.5	49,944	147.7
2014	85,562	129.4	31,874	99.5	53,688	157.4
2015	88,221	132.8	33,577	104.4	54,644	159.5
2016	92,322	138.6	35,254	109.4	57,068	166.0
2017	96,545	144.6	37,224	115.3	59,321	172.1
2018	100,598	150.2	39,181	120.9	61,417	177.5
2019	102,655	152.9	39,892	122.9	62,763	181.0
Overall increase	62%	55%	80%	73%	52%	46%

TKA: total knee arthroplasty.

Table 2

Incidence rate (per 100,000 population) in each of three age groups.

	Overall				Males				Females			
	2009	2019	Increase	p value	2009	2019	Increase	p value	2009	2019	Increase	p value
0–64 y	27.3	44.7	64%	0.02	20.9	37.9	82%	0.01	33.6	51.3	53%	0.03
65–74 y	450.2	608.6	35%	<0.0001	359.9	517.2	44%	<0.0001	527.3	688.9	31%	<0.0001
≥ 75 y	467.5	557.9	19%	<0.01	400.9	511.1	27%	0.001	506.3	587.4	16%	<0.01

confirm distribution normality and the absence of heteroscedasticity and autocorrelation. The asymptote and the parameters of the logistic regression were estimated using non-linear least squares with the Levenberg–Marquard optimisation algorithm.

For all models and comparisons, *p* values below 0.05 were taken to indicate significant differences.

Fit was assessed based on the adjusted R^2 for the linear regression and the pseudo- R^2 for the Poisson and logistic regressions. Prediction performance was estimated by computing the root-mean-square error (RMSE) between the predicted and observed values. The lower the RMSE, the greater the accuracy of the prediction. All statistical tests were performed using the R programme version 4.0.2.

3. Results

3.1. Increase in the TKA incidence rate according to sex and age

Between 1 January 2012 and 31 December 2019, 921,087 TKA procedures were performed, including 344,556 in males and 576,531 in females (37% vs. 63%). The male/female ratio increased significantly, from 0.54 (22,150/41,215) in 2009 to 0.64 (39,892/62,763) in 2019 ($p < 0.0001$). During the same period, the TKA IR increased by 55%, from 98.5 to 152.9. Although the mean IR was 1.6 times higher in females than in males, the increase was more marked in males (from 71.2 to 122.9 [+73%]) than in females (from 124.2 to 181.0 [+46%]) (Table 1).

During the study period, mean patient age declined slightly in the overall population (from 71.2 ± 9.1 [7–98] years to 70.7 ± 9.0 [5–117] years ($p < 0.0001$)), in males (from 70.3 ± 9.4 [7–98] years to 69.9 ± 9.0 [6–117] years ($p < 0.0001$)), and in females (from 71.6 ± 9.0 [9–98] years to 71.1 ± 9.0 [5–117] years ($p < 0.0001$)). In 2019, mean age at TKA was 1.2 years younger in males than in females (69.9 years vs. 71.1 years ($p < 0.0001$)).

When all age groups were pooled, the TKA IR increased from 2009 to 2019 and was higher in females than in males (Table 2). Nonetheless, the increase was more marked in males than in

females in all three age groups and was considerably larger in the group younger than 65 years.

3.2. Distribution of procedures across diagnosis-related groups

The number of patients classified in the level 1 DRG category was 40,093 in 2012 and 67,430 in 2019 (53.1% vs. 65.7%, $p < 0.0001$). The number of level 2 DRG patients rose from 30,346 in 2012 to 31,166 in 2019, although the proportion decreased from 40.2% to 30.4% ($p < 0.0001$). The numbers of level 3 and 4 DRG patients decreased, from 4,609 (6.1%) to 3,774 (3.7%) and from 406 (0.5%) to 285 (0.3%), respectively ($p < 0.0001$) (Fig. 1A). When the DRG levels were analysed separately in males and females, the changes were similar and statistically significant ($p < 0.0001$) (Fig. 1A).

Between 2012 and 2019, the number and percentage of level 1 DRG patients increased in all three age groups (0–64, 65–74, and >75 years). The increase in the 0–64 year group was from 68% (12,559) in 2012 to 79.6% (19,102) in 2019 ($p < 0.0001$). In the 65–74 year age group, the corresponding values were 65.4% (18,028) and 78.5% (34,316) ($p < 0.0001$). Finally, for the group older than 75 years, the increase was from 32.3% (9,506) to 40.1% (14,012) ($p < 0.0001$).

During the same period, for the level 2 DRG patients, the number decreased in the 0–64 year age group (from 4,943 to 4,261) and increased in the 65–74 year age group (from 7,889 to 7,958) and in the ≥ 75-year age group (from 17,514 to 18,947). Nevertheless, the proportion of level 2 DRG patients showed statistically significant decreases in all three age groups (0–64 years, 26.8% [4,943] to 17.8% [4,261], $p < 0.0001$; 65–74 years, 28.6% [7,889] to 18.2% [7,958], $p < 0.0001$; and ≥ 75 years, from 59.5% [17,514] to 54.2% [18,947], $p < 0.0001$).

For the level 3 DRG category, both the number and the percentage decreased in the 0–64 year age group (from 899 to 592, 4.9%, to 2.5% ($p < 0.0001$)), the 65–74 year age group (from 1,536 to 1,321, 5.6% to 3%, $p < 0.0001$), and the ≥ 75-year age group (from 2,174 to 1,861, 7.4% to 5.3%, $p < 0.0001$).

For the level 4 DRG category, similar decreases were noted in all three age groups (0–64 years, from 66 to 36, 0.4% to 0.2%, $p < 0.0001$; 65–74 year age group, from 120 to 100, 0.4% to 0.2%, $p < 0.0001$;

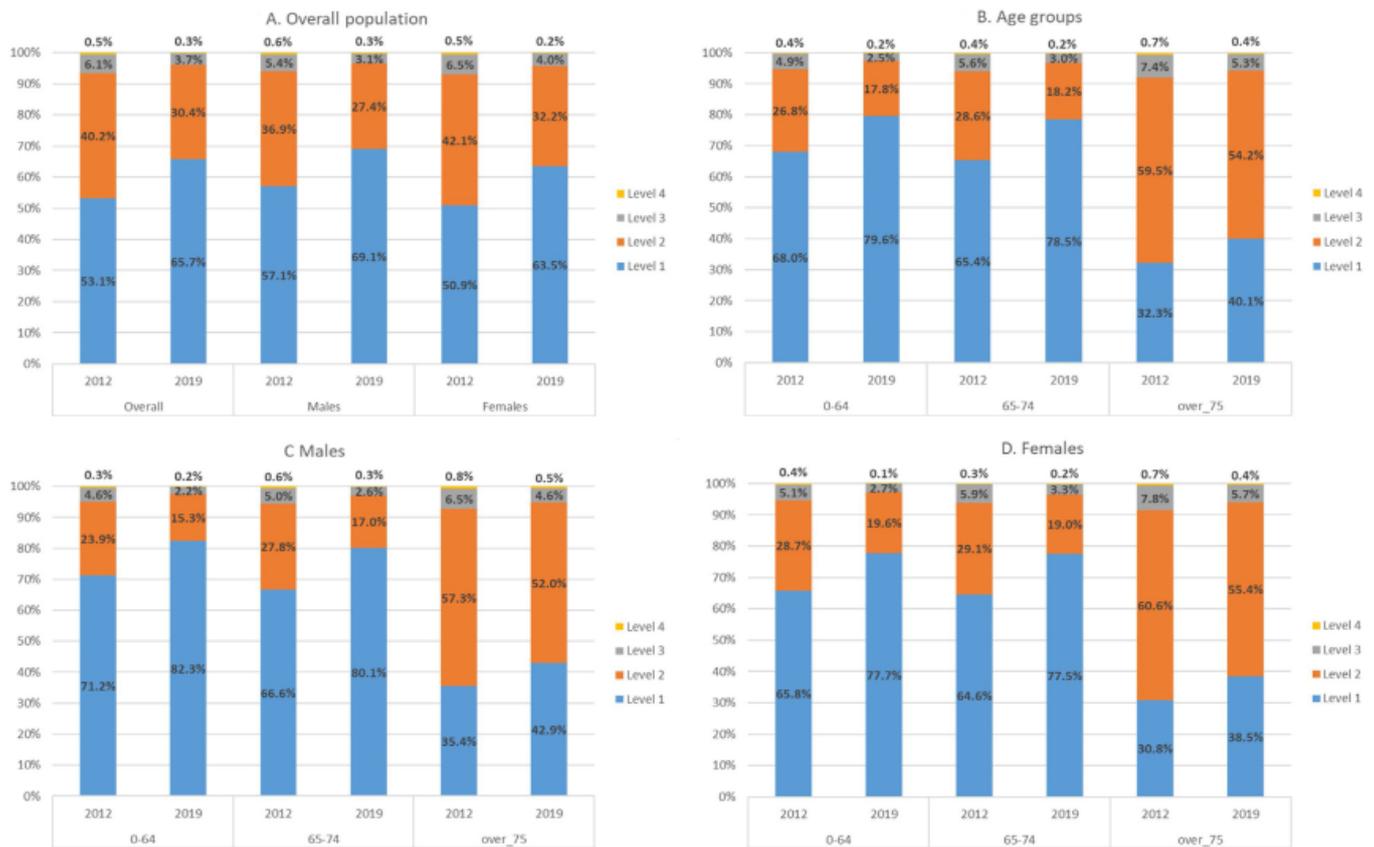


Fig. 1. Comparison of comorbidity profiles in France between 2009 and 2019. Comorbidity profiles were assessed indirectly based on changes in the proportions of patients with the four diagnosis-related group (DRG) levels. Level 1 indicates mild comorbidities and level 4 very severe comorbidities. A. Overall population. B. Separate analysis of three age groups. C. Males. D. Females.

Table 3
Root-mean-square-error (RMSE) with, in parentheses, the adjusted R² (linear regression) or pseudo-R² (Poisson regression and logistic regression) value. The adjusted R² and pseudo-R² evaluate the fit of the model to the data. The model with the lowest root-mean-square error (RMSE) performs best.

	Logistic	Linear	Poisson
Total	0.9 (0.99)	1.2 (0.99)	2.0 (0.98)
Males	0.9 (0.99)	1.2 (0.99)	2.3 (0.98)
Females	1.0 (0.99)	1.4 (0.99)	2.0 (0.98)

and ≥ 75 year age group, from 220 to 149, 0.7% to 0.4%, $p < 0.0001$) (Fig. 1B).

When age groups were evaluated separately with stratification on sex, the changes in each DRG level were similar (Figs. 1C and 1D). All differences were statistically significant ($p \leq 0.01$), except for level 4 DRG in males aged 0–64 years ($p = 0.2$).

3.3. Incidence-rate increase models and projection for 2050

For 2009 to 2019, all three models had R² or pseudo-R² values close to 1 (Table 1), indicating that they produced parameters that could be estimated, with a good fit to the data. Thus, all three models were validated.

Nonetheless, the RMSE identified logistic regression as the model that best fit the data (Table 3). Linear regression performed less well but was nevertheless superior over Poisson regression. The projections (Fig. 2) for 2050 consisted in IR increases of 33% by logistic regression, 114% by linear regression, and 304% by Poisson regression. Table 4 shows the potential number of TKA procedures according to each of the three models.

Table 4
Projected numbers of total knee arthroplasty procedures with, in parentheses, the increases since 2019.

	2030	2040	2050
Logistic	132,853 (+23%)	145,521 (+30%)	151,575 (+33%)
Linear	153,085 (+40%)	199,010 (+77%)	245,427 (+114%)
Poisson	181,325 (+64%)	293,425 (+114%)	470,056 (+304%)

4. Discussion

Our study confirms that the number of TKA procedures performed in France has increased overall. The pace of the increase differed between sexes. Thus, over the last decade, although females accounted for a greater number of procedures, the difference with males diminished because the rise was steeper among males. Despite differences in study periods, these data indicate that France shares the worldwide increase in TKA [1–4,17] (Table 1).

Our data, which pertain only to TKA, show a 61% increase in females from 2009 to 2019 and an overall projected linear growth of 114%. They corroborate results obtained by Erivan et al. [7] for 2012–2018 showing a 61.1% increase in female TKA patients and predicting a 152.8% overall linear growth of primary TKA and unicompartamental knee arthroplasty (UKA). TKA accounts for 90% of knee replacement procedures [18], and the influence of UKA on observed trends is therefore probably small.

As do other countries [2,17,19], France has a predominance of females among TKA patients, with a similar degree of imbalance (about 2/3 of females). However, due to the increase in TKA procedures in males, the proportion of females diminished between 2009 and 2019, while remaining higher than the proportion of males. Similarly, in Sweden, females predominated but their proportion decreased from 65% in the early 2000s to less than 60% in 2015 [3].

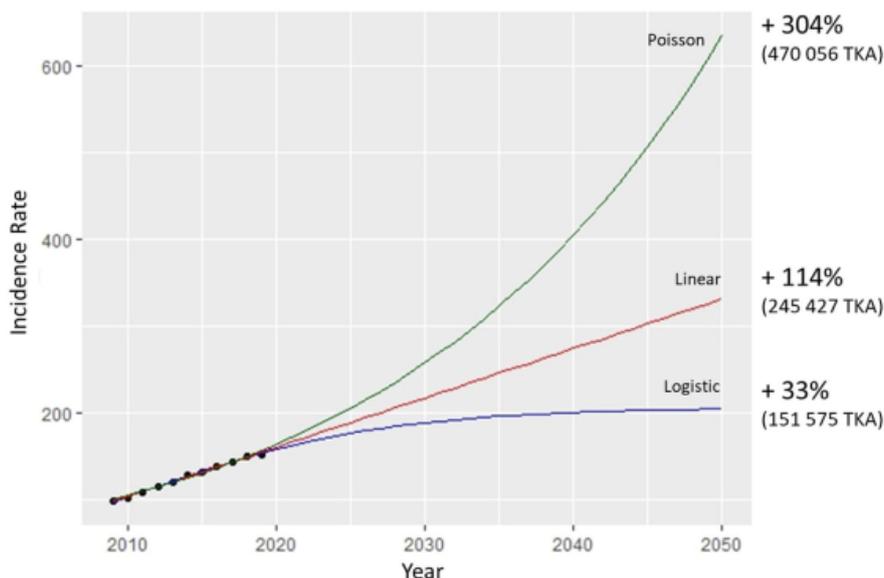


Fig. 2. Projected incidence rate (/100,000 population) increase by 2050, compared to 2019. The estimated number of total knee arthroplasty procedures is given in parentheses.

Reported mean ages at TKA reported in Europe are 69.5 years in Austria [2], 69 years in Denmark, 69.7 years in Norway, 69.8 years in Sweden, and 69 years in Finland [20]. The mean age in France is slightly older, at 70.7 years, although the reasons for this difference remain to be determined.

Between 2005 and 2011, the TKA IR in OECD countries in patients younger than 64 years increased by 63%, compared to only 29% in patients older than 65 years [21]. In a study from the USA that separated 10-year age groups, the TKA IR increase between 2000 and 2014 was 152% in the 45–54 year group and 110% in the 55–64 year group, compared to 82% in the 65–69 year group and 65% in the 70–74 year group [1]. In Australia between 2003 and 2013, the proportion of TKA patients older than 70 years decreased from 53.4% to 44.5% [22]. The considerably larger increase among individuals younger than 65 years compared to the other age groups is a worldwide trend that was evidenced in our study (Table 2).

The overall increase in the TKA IR for all age groups pooled may be partly ascribable to an increase in surgical procedures. Thus, it has been pointed out that the TKA IR increase may fail to correlate with IR increases for osteoarthritis [3,23] and obesity [24]. The TKA IR increase may therefore reflect more widespread use of surgery than of symptomatic treatment [24]. Improvements in implants and care modalities [10], combined with a growing capacity of national healthcare systems to provide TKA [7,25], may also be contributing factors. Another possible explanation is the increasing proportion of younger patients with sports injuries who want to remain physically active [24,26,27]. During discussions with their physicians, patients may become aware of the various treatment options available to them and may therefore increasingly request TKA [24]. This increasing demand from patients who want to continue physical activities and refuse to live with knee pain [28] may result in the decreased use of pharmacological and other non-surgical treatments. The possibility of excessive TKA use may deserve consideration [2,17]. Importantly, at present, patients who undergo TKA before 55 years of age are at higher risk for complications requiring revision surgery [28].

A shift towards a growing proportion of patients with mild comorbidities (level 1 DRG) was demonstrated in our study. Possible explanations include increased use of TKA in younger patients

with fewer comorbidities and the improved health status of older patients. Another factor may be the decrease in hospital stay length related to the introduction of enhanced-recovery-after-surgery protocols and of day-case TKA. Given the specific features seen in France, a comparison with previous publications is not feasible here.

In addition to the overall increase in the TKA IR, a difference in trends between males and females has been found in many studies. Although females consistently predominate among TKA patients, the proportion of males is increasing and the TKA IR increase is steeper among males (Table 2) [3,11,12]. The contribution of males to the overall increase in the TKA IR is undeniable, but its nature also deserves attention. Our data obtained in France indicate that, in both sexes, logistic growth is the most likely pattern (Table 4). The predicted result by 2050 would be a 33% IR increase, to 204.8, i.e., a total of 151,575 TKA procedures. Moreover, a plateau would be reached around 2030. Regarding the projected increase, our study adds to the work by Erivan et al. [7] since it compares three regression techniques used in international research (logistic, linear, and Poisson) and identified the most likely pattern (logistic). Finally, pooling the data from these two studies provides a complete picture of TKA in France. The study by Erivan et al. [7] provides an overall view of the knee replacement procedures performed, and ours adds detailed information on TKA time trends by separately evaluating the effects of sex, age, and the comorbidity burden.

Nonetheless, compared to countries for which logistic regression studies are available, such as Denmark (projected IR of 250 by 2050) and Australia (575 by 2046), France has fewer TKA procedures, although it also reaches a plateau around 2030 [7,19]. Thus, factors specific of each country probably influence the IR. The linear growth pattern (whose RMSE approximates logistic regression) may be valid in the short term, but, as with exponential growth, may not be plausible in the long term since a population cannot grow indefinitely. In any case, attention must be directed to improving and adapting the delivery of care and the healthcare system (e.g., prevention, ambulatory surgery). This point is crucial to ensure that needs can be met without long delays that are detrimental to the patients.

This study has several limitations. First, coding errors may have occurred, introducing bias. Detailed information was not available for variables such as BMI, osteoarthritis stage, exact nature of comorbidities, sports activities, and socio-professional category. Such information would have provided insights into societal changes and would have allowed adjustment for the main risk factors [24]. Second, advances in medical management may postpone or eliminate the need for TKA. They include new techniques for managing osteoarthritis and new therapeutic indications. The occurrence of such advances in the future may impair the ability to predict TKA growth based on current techniques and knowledge. Third, a sudden external event might modify the observed trends. For instance, despite the resiliency of the French healthcare system, a lasting economic crisis might decrease the number of procedures [14]. For instance, the COVID-19 pandemic required lockdowns, the postponing of non-emergent surgical procedures, and the temporary re-direction of hospital-care goals. Such crises may have long-term consequences on joint replacement surgery (e.g., diagnostic delays, postponed procedures, gradual resumption of surgical activity). Consequently, we did not include data from 2020 in our study since this first pandemic year was probably not representative of the last decade. Nonetheless, extending the present work over the years to come would be of interest as a means of assessing the effect of the COVID-19 crisis.

5. Conclusion

In France between 2009 and 2019, the TKA IR rose from 98.5 (63,365 procedures) to 152.9 (102,655 procedures), and the increase was steeper in males than in females. An IR increase was observed in all age groups, being greatest in the patients aged 0 to 64 years. A shift towards more procedures in patients with mild comorbidities (level 1 DRG) was noted. In the longer term, the pattern of TKA IR increase was logistic, with a plateau around 2030 and a predicted 33% increase by 2050, yielding 151,575 TKA procedures. This increasing demand will require measures designed to expand healthcare capacity unless organisational and/or technological innovations are introduced before 2050.

Disclosure of interest

Mathieu Le Stum, Guillaume Dardenne, and Myriam Le Goff-Pronost declare that they have no competing interest.

Eric Stindel receives fees from Ostesys for consultancy work, which bear no relationship to this study.

Thomas Gicquel receives fees or advantages from FH Orthopedic, Sanofi Aventis, Digikare, Corin, Depuy, Johnson and Johnson, and Med'ouest for work that bears no relationship to this study.

Arnaud Clavé receives fees from Zimmer-Biomet and ATF/Lapée-Médical for consultancy work that bears no relationship to this study.

Funding

This study received funding from the French government via the national research agency (*Agence Nationale de la Recherche*) as part of the investment programme for the future (*Programme d'Investissement d'Avenir*), under the reference ANR-17-RHUS-0005 (Project FollowKnee).

No funding from the industry was obtained for this study.

Author contributions

M.L.S., A.C., and T.G. conceived and conducted the study. M.L.S. and T.G. acquired the data.

MLS performed the statistical analysis. MLS and AC drafted the manuscript. T.G., G.D., M.L.G., E.S., M.L.S., and A.C. revised the manuscript for important intellectual content. All authors contributed to interpret the study data, critically revised the manuscript, and approved the final version of the manuscript.

Acknowledgements

We thank the healthcare information department at the Brest university Hospital (Brest, France) for giving us access to the PMSI database.

References

- [1] Sloan M, Premkumar A, Sheth NP. Projected volume of primary total joint arthroplasty in the U.S., 2014 to 2030. *J Bone Joint Surg Am* 2018;100:1455–60.
- [2] Leitner L, Türk S, Heidinger M, Stöckl B, Posch F, Maurer-Ertl W, et al. Trends and economic impact of hip and knee arthroplasty in Central Europe: findings from the Austrian national database. *Sci Rep* 2018;8:1–5.
- [3] Nemes S, Rolfson O, W-Dahl A, Garellick G, Sundberg M, Kärrholm J, et al. Historical view and future demand for knee arthroplasty in Sweden. *Acta Orthop* 2015;86:426–31.
- [4] Romanini E, Decarolis F, Luzi I, Zanoli G, Venosa M, Laricchiuta P, et al. Total knee arthroplasty in Italy: reflections from the last fifteen years and projections for the next thirty. *Int Orthop* 2019;43:133–8.
- [5] Daugberg L, Jakobsen T, Nielsen PT, Rasmussen M, El-Galaly A. A projection of primary knee replacement in Denmark from 2020 to 2050. *Acta Orthop* 2021;1–4.
- [6] Culliford D, Maskell J, Judge A, Cooper C, Prieto-Alhambra D, Arden NK. Future projections of total hip and knee arthroplasty in the UK: results from the UK clinical practice research datalink. *Osteoarthritis Cartilage* 2015;23:594–600.
- [7] Erivan R, Tardieu A, Villatte G, Ollivier M, Jacquet C, Descamps S, et al. Knee surgery trends and projections in France from 2008 to 2070. *Orthop Traumatol Surg Res* 2020;106:893–902.
- [8] Kurtz SM, Lau E, Ong K, Zhao K, Kelly M, Bozic KJ. Future young patient demand for primary and revision joint replacement: national projections from 2010 to 2030. *Clin Orthop Relat Res* 2009;467:2606.
- [9] Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. *Lancet* 2019;393:1745–59.
- [10] Falez F. Knee arthroplasty today. *Int Orthop* 2014;38:221–5.
- [11] Memtsoudis SG, Della Valle AG, Besiculides MC, Gaber L, Laskin R. Trends in demographics, comorbidity profiles, in-hospital complications and mortality associated with primary knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 2009;24:518–27.
- [12] Koh JJ, Kim TK, Chang CB, Cho HJ, In Y. Trends in use of total knee arthroplasty in Korea from 2001 to 2010. *Clin Orthop Relat Res* 2013;471:1441–50.
- [13] Kurtz S, Ong K, Lau E, Mowat F, Halpern M. Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *J Bone Joint Surg Am* 2007;89:780–5.
- [14] Kurtz SM, Ong KL, Lau E, Bozic KJ. Impact of the economic downturn on total joint replacement demand in the United States: updated projections to 2021. *JBJS* 2014;96:624–30.
- [15] Rupp M, Lau E, Kurtz SM, Alt V. Projections of primary TKA and THA in Germany from 2016 through 2040. *Clin Orthop Relat Res* 2020;478:1622–33.
- [16] Inacio MCS, Graves SE, Pratt NL, Roughead EE, Nemes S. Increase in total joint arthroplasty projected from 2014 to 2046 in Australia: a conservative local model with international implications. *Clin Orthop Relat Res* 2017;475:2130–7.
- [17] Worlicek M, Koch M, Daniel P, Freigang V, Angele P, Alt V, et al. A retrospective analysis of trends in primary knee arthroplasty in Germany from 2008 to 2018. *Sci Rep* 2021;11:5225.
- [18] Full vs Partial | Hip and Knee Care. AAHKS Hip Knee Care n.d. <https://hipknee.aahks.org/full-vs-partial-knee-replacement-whats-the-difference/>. (accessed June 2, 2022).
- [19] Wengler A, Nimptsch U, Mansky T. Hip and knee replacement in Germany and the USA. *Dtsch Arztebl Int* 2014;111:407–16.
- [20] Niemeläinen MJ, Mäkelä KT, Robertsson O, W-Dahl A, Furnes O, Fenstad AM, et al. Different incidences of knee arthroplasty in the Nordic countries. *Acta Orthop* 2017;88:173–8.
- [21] Pabinger C, Lothaller H, Geissler A. Utilization rates of knee-arthroplasty in OECD countries. *Osteoarthritis Cartilage* 2015;23:1664–73.
- [22] Ackerman IN, Bohensky MA, Zomer E, Tacey M, Gorelik A, Brand CA, et al. The projected burden of primary total knee and hip replacement for osteoarthritis in Australia to the year 2030. *BMC Musculoskelet Disord* 2019;20:90.
- [23] Nemes S, Gordon M, Rogmark C, Rolfson O. Projections of total hip replacement in Sweden from 2013 to 2030. *Acta Orthop* 2014;85:238–43.
- [24] Losina E, Thornhill TS, Rome BN, Wright J, Katz JN. The dramatic increase in total knee replacement utilization rates in the United States cannot be fully explained by growth in population size and the obesity epidemic. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94:201–7.
- [25] Jimenez-Garcia R, Villanueva-Martinez M, Fernandez-de-las-Penas C, Hernandez-Barrera V, Rios-Luna A, Garrido PC, et al. Trends in primary total

- hip arthroplasty in Spain from 2001 to 2008: evaluating changes in demographics, comorbidity, incidence rates, length of stay, costs and mortality. *BMC Musculoskelet Disord* 2011;12:43.
- [26] Gelber AC, Hochberg MC, Mead LA, Wang N-Y, Wigley FM, Klag MJ. Joint injury in young adults and risk for subsequent knee and hip osteoarthritis. *Ann Intern Med* 2000;133:321–8.
- [27] Driban JB, Hootman JM, Sitler MR, Harris KP, Cattano NM. Is participation in certain sports associated with knee osteoarthritis? A systematic review. *J Athl Train* 2017;52:497–506.
- [28] Julin J, Jämsen E, Puolakka T, Konttinen YT, Moilanen T. Younger age increases the risk of early prosthesis failure following primary total knee replacement for osteoarthritis. *Acta Orthop* 2010;81:413–9.

1 Titre

A pilot study on preferences from surgeons to deal with an innovative customized and connected knee prosthesis – A Discrete Choice Experiment

2 Objectif 4

En réponse à la demande croissante, à l'échelle mondiale, d'arthroplastie du genou et dans l'optique de réduire la nécessité des révisions chirurgicales, plusieurs technologies associant la planification tridimensionnelle et l'intelligence artificielle ont émergé. Ces innovations ont pour objectif d'optimiser la personnalisation des procédures, tout en améliorant la précision du positionnement des implants.

L'intégration de ces avancées ouvre la voie au développement de prothèses de genou personnalisées et connectées ainsi qu'une révision conséquente voire disruptive des pratiques actuelles. C'est ce que propose le projet FollowKnee.

Toutefois, pour qu'un système innovant soit efficacement intégré dans la pratique médicale quotidienne, son acceptation revêt une importance primordiale. En effet, l'introduction de nouvelles technologies peut entraîner des perturbations et nécessiter d'importantes adaptations organisationnelles.

Or, étant donné que la prothèse personnalisée et connectée FollowKnee n'existe pas encore, il n'est pas possible d'étudier directement son acceptation. Par conséquent, une étude de préférence a été réalisée, au cours de laquelle les utilisateurs potentiels ont été invités à évaluer différents critères de choix d'utilisation potentielle. Cette évaluation a été effectuée à l'aide de la méthode des choix discrets, une approche permettant de recueillir des préférences.

L'objectif de cet article vise donc à mesurer l'impact des préférences des chirurgiens sur l'acceptabilité totale du nouvel implant et des technologies associées dans la chaîne de soins complète.

Conformément aux bonnes pratiques [89], l'analyse des résultats a été réalisée en utilisant les deux principales méthodes d'analyse statistique associées, à savoir le logit conditionnel et le logit mixte. Ces méthodes s'appuient sur la Théorie de l'Utilité Aléatoire (Random Utility Theory [RUT]) développée par McFadden en 1974. Cette théorie suppose que chaque individu cherche à maximiser sa satisfaction ou son utilité en choisissant parmi différentes alternatives.

Selon la RUT, chaque répondant (n) choisit le scénario préféré (maximisant l'utilité) parmi les alternatives dans chacun des ensembles de choix proposés (i.e. comparaison de scénario). La fonction d'utilité peut être spécifiée [90,91]:

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad (1)$$

Où V_{nj} est la composante observable et ε_{nj} est un terme d'erreur non explicable (indépendant et identiquement distribué). Avec k attributs, nous avons la forme fonctionnelle suivante :

$$V_{nj} = \beta_1 X_{nj1} + \beta_2 X_{nj2} + \dots + \beta_k X_{nj k} = X'_{nj} \beta$$

Et donc, (1) peut être réécrit comme suit :

$$U_{nj} = X'_{nj} \beta_n + \varepsilon_{nj} \quad (2)$$

Où U_{nj} est l'utilité que le répondant n attribue à l'alternative j ; X_{nj} , un vecteur des caractéristiques observées des alternatives (niveaux) et β_n , le vecteur des coefficients attribués à chaque niveau (reflétant la désirabilité des attributs).

Compte tenu que l'évaluation des coefficients se fait sur un ensemble de choix formulés par les individus eux-mêmes (i.e. sur l'ensemble des choix d'un individu) et sur une population (i.e. plusieurs individus effectuant plusieurs choix), les coefficients aléatoires β_n peuvent être décomposés en deux parties, comme suit :

$$\beta_n = \bar{\beta} + \eta_n$$

Où $\bar{\beta}$ est la moyenne de la population et η_n est une déviation stochastique représentant l'hétérogénéité des préférences. Ainsi, l'équation (2) peut être reformulée comme suit :

$$U_{nj} = X'_{nj} \bar{\beta} + X'_{nj} \eta_n + \varepsilon_{nj}$$

La partie stochastique de l'utilité (i.e., $X'_{nj} \eta_n + \varepsilon_{nj}$) est corrélée entre les situations de choix en raison de l'influence commune de η_n .

Si l'on suppose que les individus considèrent leurs choix d'utilité indépendamment les uns aux autres (i.e. aucune influence des choix précédents et donc pas de variabilité entre les réponses des individus), alors $\eta_n = 0$. On est dans le cas du logit conditionnel (MNL).

Si l'on suppose maintenant les choix individuels peuvent être influencés par des facteurs spécifiques à chaque individu (i.e. fonction des choix précédent ou contextuel) ainsi que par des facteurs communs à l'ensemble de la population, alors on est dans un contexte de logit mixte (MXL) et $\eta_n \neq 0$. Il nous faudra donc prendre en compte l'hétérogénéité des préférences et des réponses au sein des k chirurgiens interrogés. Le MXL identifie les attributs pour lesquels il existe une variation significative des préférences sans expliquer en détail cette variation.

Avec $\beta_{kn} \sim N(\beta_k, \sigma_k)$, le MXL fournit à la fois un effet moyen et un écart type des effets dans l'échantillon. Autrement dit, le MXL suppose explicitement qu'il existe une distribution des poids de préférence (coefficient β) dans l'échantillon, reflétant les différences de préférences entre les répondants pour l'utilité dérivée de l'utilisation d'une prothèse personnalisée et connectée.

Dans notre modèle, le choix parmi les alternatives dépend de quatre attributs. La fonction d'utilité à spécifier est donc la suivante :

$$U_{nj} = \beta_0.ASC + \beta_{1n}.Personnalisation_j + \beta_{2n}.Capteurs_j + \beta_{3n}.Réalité\ augmentée_j + \beta_{4n}.CoûtAdditionnel_j + \varepsilon_{nj}$$

La Constante Spécifique à l'Alternative (ASC), représentée par β_0 , mesure l'effet de « l'option de sortie », c'est-à-dire l'influence de la possibilité de ne pas choisir une alternative. Dans le contexte de notre étude, qui se concentre sur les choix effectués par les chirurgiens, il est essentiel de permettre à ces professionnels de se comparer à leur propre pratique actuelle. Cela signifie que nous cherchons à capturer au mieux les choix qui s'offrent à eux, en tenant compte de la possibilité de rester fidèle à leurs méthodes actuelles de traitement ou d'envisager d'autres alternatives.

3 Article

A pilot study on preferences from surgeons to deal with an innovative customized and connected knee prosthesis – A Discret choice experiment

Author names

Mathieu LE STUM (MSc)^{1,2*}, Arnaud Clave (MD, Msc)³, Koffi Adzinyo Agbemanyole (MSc)⁴, Eric STINDEL (MD, PhD)^{1,2,5}, Myriam LE GOFF-PRONOST (PhD)⁴,

¹ Université de Brest, UBO, LATIM, UMR 1101, 22 rue Camille Desmoulins, 29200 Brest, France, mathieu.lestum@univ-brest.fr

² Institut national de la santé et de la recherche médicale, INSERM, Laboratory for Medical Information Processing (LATIM), UMR1101, 22 rue Camille Desmoulins, 29200 Brest, France

³ Service d'orthopédie, Clinique Saint George, 2 Avenue de Rimiez, 06100 Nice, France, arnaud.clave@orange.fr

⁴ Institut Mines-Telecom, IMT Atlantique, LATIM, UMR 1101, M@rsouin, 655 Av. du Technopôle, 29280 Plouzané, France, myriam.legoff@imt-atlantique.fr

⁵ Centre Hospitalo-Universitaire de Brest, CHRU Brest, LATIM, UMR 1101, 2 avenue Foch, 29200 Brest, France, eric.stindel@chu-brest.fr

ABSTRACT

BACKGROUND

To address the increasing global demand for Total Knee Arthroplasty and reduce the need for revisions, several technologies combining 3D planning and artificial intelligence have emerged. These innovations aim to enhance customization, improve component positioning accuracy and precision. The integration of these advancements paves the way for the development of personalized and connected knee implant.

QUESTIONS/PURPOSES

These groundbreaking advancements may necessitate changes in surgical practices. Hence, it is important to comprehend surgeons' intentions in integrating these technologies into their routine procedures. Our study aims to assess how surgeons' preferences will affect the acceptability of using this new implant and associated technologies within the entire care chain.

METHODS

We employed a Discrete Choice Experiment, a predictive technique mirroring real-world healthcare decisions, to assess surgeons' trade-off evaluations and preferences.

RESULTS

A total of 90 experienced surgeons, performing a significant number of procedures annually (mostly over 51) answered. Analysis indicates an affinity for technology but limited interest in integrating digital advancements like preoperative software and robotics. However, they are receptive to practice improvements and considering the adoption of future sensors.

CONCLUSIONS

In conclusion, surgeons prefer customized prostheses via augmented reality, accepting extra cost. Embedded sensor technology is deemed premature by them.

INTRODUCTION

Total Knee arthroplasty (TKA) is one of the most predominant orthopedic procedures worldwide with respectively 720,000 in 2019 and more than 700,000 surgeries in Europe [2] and the USA [39]. This number is continuously increasing for several decades and is expected to explode in the next years (+147% by 2030 in the USA [39]).

This overall increase in TKA is chiefly driven by the natural rise in the incidence of osteoarthritis, related in particular to the combined effects of population aging and obesity [20]. Nonetheless,

another factor is the broadening of TKA indications towards younger patients (<65 years) allowed by improvements in both surgical techniques and knee implants [17, 24]. As a result, implanted for more than 20 years in active subjects, these prostheses are more frequently revised, leading to expensive and less effective procedures. A +182% growth in revision Knee Arthroplasty is, for example, expected in the USA by 2030 [36].

To address this major public health problem and improve primary TKA surgery, thereby preventing revisions caused by premature wear, loosening, and infection, several factors must be considered: implant design, surgical technique, and patient follow-up[7, 22, 34].

Since the last decades, implant design has been improved by the use of advanced technologies mixing 3D planning and artificial intelligence. This led to the development of customized implants, suitable to patient morphology thanks to dedicated CT images [1, 31]. To improve accuracy and precision in components positioning, several assisted surgical technologies have been developed, such as navigation, robot, or Personalized Surgery Instrument (PSI) [1, 11, 16, 26, 40]. Among these new technologies, Augmented Reality (AR) is expanding and appeared to be a promising technology [21, 35]. At the same time, to provide not only therapeutic benefits but also follow-up capabilities, different sensors types have been developed [29]. These are smart electronic devices that measure physical properties such as pressure, cinematic, or temperature, and send information to an electronic processor [22]. The ability of sensors to measure several types of data allows them to be used in the surgery itself or during the postoperative patient follow-up. At present most stay in a research state but some technologies start to be implanted [15].

The integration of these improvements will enable the development of personalized and connected implants, as proposed in FollowKnee project [3]. However, these advancements also represent a breakthrough, and the implementation of this new care chain may necessitate adaptations and changes in surgical practices. Therefore, it is crucial to understand surgeons' intentions regarding the adoption of these technologies as part of their routine practice. By considering their preferences, we can better assess the impact of these technologies on patient care.

Thus to evaluate the trade-off made by surgeons, we conducted a Discrete Choice Experiment, which is a technique that is predictive of choices, and mimicked real-world decisions in healthcare decision-making, to elicit preference [9].

Our study aims to assess how surgeons' preferences will affect the acceptability of using this new implant and associated technologies within the entire care chain. To the best of our knowledge, no study on surgeons' choices has been reported thus far.

MATERIALS AND METHODS

Study Design

Discrete Choice Experiment (DCE) represents a quantitative stated preference technique for eliciting individual preferences [30]. In our experiment, a DCE was administered to French surgeons (1) via an online survey, distributed through the French Orthopaedic National Society (Sofcot) and (2) through a regional congress (SOO- Western Orthopaedic Society), from January to June 2022.

The survey takes 10 min to complete and was divided into five sections: (i) sociodemographic (ii) information on current surgical practice, (iii) preference, on the use of an innovative prosthesis, (iv) potential development of practice, and (v) affinity for technology interaction (ATI).

In the Preferences section, surgeons select their favorite scenario from a series of two hypothetical but realistic scenarios for a customized, connected prosthesis. They were asked in each to select the one they would prefer. The scenarios were described by a set of attributes which were further specified by levels.

To define attributes, good research practices for stated-preference studies [27] were followed. Attributes (table 1) were identified by a literature review and findings from interviews with representative experts (four orthopedic surgeons, a cognitive scientist specializing in technology adoption, and a rehabilitation physician). It was pointed out the importance of (1) the care pathway before and after the surgery, (2) anatomical planning, (3) precision of the prosthesis placement during the surgery, (4) post-surgery data and their usability, and (5) cost. The full questionnaire was pretested on eight representative orthopedic surgeons to assess their understanding of its content and gather feedback on the questions. The results led us to consider three technical attributes and one related to cost. The technical attributes are “Customized implant” (link to previous point 2), “integrated sensors” (points 1 and 5), and usage of “Augmented reality” (point 3). All the potential use of an innovative customized and connected

prosthesis is thus covered. The next step consisted of assigning levels to each attribute. The literature recommends that these should be realistic, well-defined, plausible, and should potentially involve trade-offs. All technical attributes were dichotomous to make able the expression of use, or not, in the current practice. As new technologies often led to an increase in cost, a relating attribute was defined by a low (“+10%”) or moderate (“+25%”) rise.

Attribute	Definition	Level
Customized Prosthesis	Prosthesis fitting to patient’s morphology	Yes No
Prosthesis including sensors	Prosthesis integrating pressure, movement, temperature and pH sensors. Data will allow a better post-operation follow-up in order to avoid retrievals (due to wear, loosening and infections)	Yes No
Augmented Reality	Use of augmented reality in the operating room to improve accuracy of the prosthesis placement	Yes No
Extra costs	If a clinical improvement is proven, an innovative prosthesis would have a possible additional cost for the health system and also for you in terms of training, investment, software... How much extra cost (€) would you be willing to accept for yourself due to the use of an innovative prosthesis?	+10% +25%

Table 1: Attributes and level included in the Discrete Choice Experiment.

Data were gathered anonymously. Because our study did not involve the collection of health or personal information, ethics committee approval was not required.

Experimental design

The four attributes with two levels have a possible $2^4 = 16$ scenarios (four attributes with two levels) and $(16 * 15) / 2 = 120$ possible pairwise choices. Since there are too many possible scenarios, it is impossible to present this full factorial design to the surgeons. Therefore, to simplify the scenario settings, a fractional plan (i.e. selection of the best interaction combinations) was developed that maximizes D-efficiency. D-efficiency is a standard measure of goodness of fit. It indicates how well the main effects can be estimated and retained. A D-efficient design (minimizing D(B) error) was generated by using the R package Idefix to reduce the number of choice scenarios into a manageable number of 16 choice sets for presentation [32, 43].

For most realistic results, it is recommended to stay as close to the real world as possible. When modeling the potential adoption of a new intervention or service, which is a key objective of this paper, there is much consensus that a DCE should include an opt-out option, that figures out a reference point, or their current situation [13, 18, 41, 46]. In this study, surgeons are presented with two generic alternatives and an opt-out option (figure 1). Opt-out was included to not force the surgeons to choose between the proposed alternatives when those were not considered suitable compared to their current practice. The opt-out option did not describe an alternative model of practice but encompassed all other actual well-proven technologies.

Study size

As there is no consensus to calculate the minimum required sample size in DCE, we used a common rule of thumb [8]. The minimum sample size (N) required for the experiment is thus obtained by the formula:

$$N > (500 * c) / (t * a)$$

In which c = equal to the largest number of levels for any of the attributes, t = number of choice set and a = number of alternatives). This results to a minimum sample size of 31 respondents.

Choice set 1 *

	Scenario A	Scenario B
Customized Prosthesis	no	yes
Prosthesis including sensors	no	no
augmented Reality	yes	no
Extra cost	+10%	+25%

Scenario A
 Scenario B
 Faced with these two scenarios, I would prefer to keep my current practice

Figure 1 : Example of a DCE choice set. DCE, discrete choice experiment.

Statistical model and data analysis

The answers were analyzed in accordance with McFadden’s Random Utility Theory, which incorporates economic rationality and utility maximization. Moreover, to address the variability in preference among surgeons, a Mixed Logit Model (MXL model) was used.

Analyses were performed on all surgeons who answered to the survey, resulting in four sub-groups. These sub-groups were determined based on the main factors that influence surgical outcomes, namely age and experience [44]. In the case of France, where the average age of orthopedic surgeons is 50 and the median age is 51, surgeons under 50 were compared to those over 50 [4]. It is also recognized that a surgeon's experience is related to the volume of procedures performed per year. Therefore, we assumed that experienced surgeons perform over 51 procedures annually, based on the available data. These experienced surgeons are compared to those who perform fewer procedures [6, 12, 23, 25].

This analysis is feasible as long as the minimum population size required is applied to each subgroup [10]. The sub-groups comparison was performed by using Pearson's χ^2 test on main variables. A p-value < .05 was considered to be statistically significant. Multivariate logistic regression was used to identify relationships between variables.

ATI scale, which is graduated on six levels, was studied through mean, standard error, and Cronbach alpha coefficient. Sub-groups were compared by using the Wilcoxon test. A mean above four indicates a high or very high (over five) ATI and, in contrast, below, a low (three) or very low (two) ATI [5, 19]. A Cronbach's alpha above 0.6 is considered satisfactory [42].

Data were analyzed by using R version 4.0.2

RESULTS

Respondents' characteristics

A total of 90 male surgeons completed the questionnaire, providing their characteristics (table 2). Most surgeons are over 50 years old, worked in public hospitals, and performed over 51 implants annually. They also mostly not used planning software, navigation systems, or robots in their surgeries. However, they expressed interest in adopting technological innovations, willing to extend surgical time by 10 to 20 minutes. Specifically, they were interested in using sensors to monitor patients, alongside standard consultations.

No significant relationships were found between categorical variables and age in terms of working structure, planning software use, navigation systems or robots use, extra surgical time, and sensor use. However, significance was found for the number of prostheses per year (Appendix A-1).

No significant relationships were found between categorical variables and the number of procedures performed per year with planning software, extra surgical time, and sensors. However, significance was observed for working structure, age, and use of navigation systems or robots (Appendix A-2).

		Number	Percent (%)	IC 95%
Sex	Male	90	100.0%	0.0%
	Female	0	0.0%	0.0%
Age	≤ 50 years old	34	37.8%	10.2%
	More than 50 year old	56	62.2%	10.0%
Structure	Public	54	60.0%	10.0%
	Private	36	40.0%	10.1%
Number of prosthesis per year	≤ 50	34	37.8%	10.0%
	51 - 100	26	28.9%	9.4%
	Morethan 100	30	33.3%	9.7%
Used of planification software	Yes	43	47.8%	10.3%
	<i>2D or 3D planning software</i>	24	55.8%	
	<i>For 3D printed PSI (Personnalised Surgery Instruments)</i>	12	27.9%	
	<i>Other (CT sheet - mixte)</i>	17	39.5%	
	No	47	52.2%	10.3%
Navigation or robot	Yes	28	31.1%	9.6%
	No	62	68.9%	9.6%
Extra surgical time	Yes	67	74.4%	9.0%
	<i>Less than 10 min</i>	6	9.0%	
	<i>More than 10 min</i>	44	65.7%	
	<i>Morethan 20 min</i>	16	23.9%	
	<i>Not defined</i>	2	3.0%	
	No	23	25.6%	9.0%
Used of sensors	Yes	66	73.3%	9.1%
	<i>Yes, in addition to a standard consultation</i>	47	71.2%	
	<i>Yes, in lieu of a follow-up consultation only</i>	2	3.0%	
	<i>Yes, but only if the system issues an alert</i>	20	30.3%	
	No, it is not helpful	13	14.4%	7.3%
	I don't know	11	12.2%	6.8%

Table 2: Respondents' characteristics. It is important to emphase that individuals under the age of 50 are distinct from those who performed fewer than 51 implants annually.

Logistic regression analysis revealed that being over 50 years old was associated with a higher probability of performing more than 51 procedures per year and not utilizing data from sensors. No significant impact of the other variables was observed (Appendix B-1). Logistic regression analysis showed that performing over 51 procedures per year was associated with a higher likelihood of working in a public structure, being over 50 years old, and using navigation or robots. No significant impact of other variables was observed (Appendix B-2).

Surgeons showed a high affinity for technology interaction with no significant differences between subgroups (Appendix C).

Discrete Choice Experiment

Table 3 displays the estimated parameters of the MXL model analysis. Positive and significant coefficients are observed for use of technology-related attributes such as customized and connected implant, and AR. This suggests that surgeons find utility in using these attributes in their current practice. In terms of financial considerations, surgeons prefer a "+10%" additional cost rather than "+25%", indicating a willingness to incur limited expenses for implementing these technology-related attributes. Furthermore, the significant ASC indicates that surgeons prefer maintaining current practice despite desiring certain benefits from proposed technologies. Higher coefficients for attributes indicate greater utility derived from them. Among the attributes considered, AR and personalization show similar levels of utility, making them the most significant factors. On the other hand, the use of sensors has the lowest coefficient, indicating relatively lower importance compared to other attributes (Table 3).

	All surgeons			Aged of 50 and less years old			Aged of more than 50 years old			50 and under procedures per year			51 and over procedures per year		
	Coeff	SE	p	Coeff	SE	p	Coeff	SE	p	Coeff	SE	p	Coeff	SE	p
ASC	0.503	0.069	***	0.389	0.089	***	0.641	0.108	***	0.264	0.110	*	0.649	0.089	***
Customized Implant															
Yes	0.829	0.069	***	1.193	0.105	***	0.262	0.091	**	0.949	0.116	***	0.853	0.088	***
No	-0.829	(x)		-1.193	(x)		-0.262	(x)		-0.949	(x)		-0.853	(x)	
Connected Implant															
Yes	0.383	0.062	***	0.563	0.088	***	0.124	0.088		0.546	0.106	***	0.339	0.078	***
No	-0.383	(x)		-0.563	(x)		-0.124	(x)		-0.546	(x)		-0.339	(x)	
Augmented Reality															
Yes	0.848	0.070	***	0.889	0.098	***	0.712	0.099	***	0.933	0.120	***	0.770	0.088	***
No	-0.848	(x)		-0.889	(x)		-0.712	(x)		-0.933	(x)		-0.770	(x)	
Over-cost															
+10%	0.580	0.064	***	0.670	0.089	***	0.505	0.093	***	0.590	0.106	***	0.602	0.081	***
+25%	-0.580	(x)		-0.670	(x)		-0.505	(x)		-0.590	(x)		-0.602	(x)	
sd. Customized Implant	1.062	0.080	***	0.930	0.116	***	1.021	0.115	***	0.817	0.131	***	1.180	0.102	***
sd. Connected Implant	0.825	0.087	***	0.888	0.119	***	0.656	0.125	***	0.753	0.139	***	0.848	0.110	***
sd. Augmented Reality	0.850	0.085	***	0.916	0.112	***	0.722	0.128	***	0.789	0.146	***	0.849	0.104	***
sd. Over-cost	0.690	0.083	***	0.696	0.115	***	0.636	0.120	***	0.754	0.142	***	0.654	0.100	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Table 5: Results from the random parameters mixed logit model. “ASC” stand for Alternative Specific Constant and “sd” for the standard deviation.

All sub-groups preferred the current practice over the proposed technologies (positive and significant ASC).

Age-based subgroup analysis reveals that individuals over 50 do not significantly prefer sensors. Among those under 50, sensors are their least preferred option. AR is most preferred by those over 50 and ranks second for those under 50. Personalized prostheses are strongly preferred by those under 50, whereas personalized implants are the least preferred option for the other group. Annual procedure numbers-based subgroup demonstrates a distinct contrast between the two groups. Personalized prostheses provide the highest utility in both groups. Among surgeons performing fewer than 51 procedures annually, AR ranks equally with it, with sensor usage and a slight financial surcharge ranking second. In contrast, among surgeons performing over 51 procedures per year, AR is the second-highest preference, while sensors rank last. Finally, significant standard deviations in all groups indicate statistically significant heterogeneity in surgeons' preferences for all attributes.

DISCUSSION

The analysis of our surgeon sample shows an experienced population, performing a significant number of procedures per year (mostly over 51) and spanning a wide age range. While they have a strong affinity for technology, they show limited inclination to integrate digital technology (e.g., preoperative software, navigation, robotics) into their surgeries. However, they are receptive to practice advancements and show willingness to allocate additional time and potentially adopt future sensors.

A detailed subcategory analysis reveals patterns beyond the correlation of annual procedures and age. Being over 50 years old negatively affects the utilization of sensor data, while performing over 51 procedures per year positively correlates with adopting navigation technology in a "public" work environment.

To assess surgeons' responses to implementing a new technological care chain, such as personalized and connected prostheses, we used the DCE method. Despite heterogeneity, all selected technological attributes positively influenced surgeons' preferences, with a willingness to

adopt if costs were minimized. Surgeons over 50 were reluctant about sensor data, and overall, surgeons preferred their current practices. AR was favored, followed by personalization, while sensor utilization ranked lowest. Preferences varied by age and experience, with older surgeons preferring AR and more experienced surgeons favoring personalization.

The technologies in this new care chain are at different stages of maturity and usage, reflecting the preferences expressed. Personalization and assistive technologies are more advanced, while sensing is in its early stages.

The utilization of 3D planning software and 3D printing enables customized implants (CI) to reduce revision problems through individualized approaches. Accurate positioning and fit of knee prostheses are crucial for patient outcomes. Although currently used selectively, recent developments aim to promote wider adoption. Customized implants preserve the patient's unique geometry compared to off-the-shelf implants, but further improvements in mechanical properties are needed. [14, 33, 37]. Surgeons in our study maintain high expectations for this technology [28]. Preference variation between young and experienced surgeons may be influenced by practical experience and the development stage of CI [34].

Proper positioning of CI is crucial due to individual patient morphology. Challenges in accurate positioning to ensure good functional outcomes that align with the anatomical needs have been reported. Nowadays, surgeons utilize navigation systems or robotics to replicate the resection plane from design software, aiding in achieving correct fit. Over the past two decades, the utilization of assisted technologies (Computer-Assisted Orthopedic Surgery [CAOS], robots, or PSI in Knee Arthroplasty has increased by 154% from 2008 to 2015. For instance, robot utilization in hospitals increased by over 500% from 2009 to 2013. [40]. Knee arthroplasty has the highest usage rate among other joints, with 18% of knee surgeons reporting assisted technologies use in 2015[11, 47]. This proportion is expected to reach 32% by 2032 [26]. CAOS and robots have demonstrated improved accuracy and precision in component positioning compared to PSI and conventional methods. However, no significant difference has been found in functional outcomes between them and conventional methods [47]. While current assisted technologies improve efficiency compared to conventional methods [47], they can be complex and bulky in the operating room, resulting in additional surgical time. On average, TKA takes an additional 15-25 minutes due to their use [40]. As part of the continuous effort to improve patient outcomes, AR

has emerged as a promising innovation, streamlining workflow procedures, although limited studies with clinical results exist [35]. Indeed, existing systems often require surgeons to divert attention to a monitor, whereas AR partially addresses these limitations [45].

In our study, 31.1% of surgeons utilized navigation systems or robots, with approximately 75% requiring additional surgical time under 20 minutes. These findings align with Boylan's study [11], reporting a 29.2% utilization rate of robotic assistance in New York hospitals in 2018. Surgeons' high preference for AR indirectly indicates their openness to user-friendly technologies.

Smart sensors, incorporated into implants to provide personalized data, show promise in monitoring post-operative and intraoperative parameters, assisting surgeons in problem detection and personalized rehabilitation [22]. However, challenges remain in areas like design, robustness, wireless communication, power, and biocompatibility. The use of connected implants in orthopedic surgeries (such as knee, hip, spine, and fractures) has been limited, with only around 100 patients involved, over the past few decades [29]. While some recent technologies have been adopted in routine practice, most evidence comes from clinical case studies [15]. Further advancements are needed to improve diagnostic capabilities, explore self-treatment options, ensure safety, data security, and reduce costs. Additionally, beyond technological aspects, it is crucial to enhance the safety of implants (including regulatory authorizations), ensure data security, and reduce costs. High costs may impede adoption in publicly funded healthcare systems [22]. Despite their potential, these technologies still have limitations and insufficient evidence. Surgeons' preferences reflect this.

Economic considerations affect indirectly choices and global adoption of technologies, depending on affordability and healthcare models [38]. For instance, in the United States, patients with private insurance and high-volume hospitals are more likely to undergo technology-assisted surgery, compared respectively to Medicare and Medicaid patients and lower-volume hospitals [11]. Larger hospitals can distribute technology costs and develop cost-effective care pathways [11, 38]. In France, where the healthcare system determines costs, surgeons have limited control and moderate expense increases are expected to adopt these new technologies. However, a significant increase (+25%) would negatively impact technology utilization.

This study has limitations. Firstly, surgeons were asked about technologies still under development, preventing pre-testing prior to answering the scenarios. Envisioning potential usage

may have caused cognitive fatigue, possibly influencing choices towards the end of the 16 choice sets. The methodology was adapted to mitigate this effect. Secondly, survey respondents showed a tech-oriented population based on the ATI score. This introduces a potential selection bias, especially considering the small sample size, even if it meets the DCE criteria, in comparison to the practitioner population as a whole. However, this aligns with the "diffusion of innovation" theory, proposed by E. Rogers, new technologies and practices typically require endorsement from "early adopters" among surgeons [38].

Technology spread and adoption vary across countries due to different influencing factors [38] . Comparing relative preferences between French surgeons and those from other countries can provide insights into convergences and divergences in perceptions of new technologies.

In conclusion, our study reveals that, despite heterogeneity in responses, surgeons express a preference for utilizing a customized prosthesis through augmented reality, even at an additional measured cost. However, it appears that embedded sensor technology is currently less appealing to them, possibly due to its early-stage development.

References

1. Andrés-Cano P, Calvo-Haro JA, Fillat-Gomà F, Andrés-Cano I, Perez-Mañanes R. Role of the orthopaedic surgeon in 3D printing: current applications and legal issues for a personalized medicine. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología (English Edition)*. 2021;65:138-151.
2. Anon. Base de données - Eurostat. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/data/database> [Accessed April 14, 2022].
3. Anon. Improve Follow-up of Knee surgery. *Agence nationale de la recherche*. Available at: <https://anr.fr/ProjetIA-17-RHUS-0005> [Accessed August 24, 2023].
4. Arnault DF. ATLAS DE LA DÉMOGRAPHIE MÉDICALE EN FRANCE.
5. Attig C, Wessel D, Franke T. Assessing Personality Differences in Human-Technology Interaction: An Overview of Key Self-report Scales to Predict Successful Interaction. In: Stephanidis C, ed. *HCI International 2017 – Posters' Extended Abstracts*. Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer International Publishing; 2017:19-29.
6. Barral M, Lalande L, Viste A, Besse J-L, Fessy M-H, Carré E. Utilisation des ciments orthopédiques dans un centre hospitalier universitaire multisite. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*. 2019;105:227-232.
7. Batailler C, Swan J, Sappey Marinier E, Servien E, Lustig S. New Technologies in Knee Arthroplasty: Current Concepts. *Journal of Clinical Medicine*. 2021;10:47.
8. de Bekker-Grob EW, Donkers B, Jonker MF, Stolk EA. Sample Size Requirements for Discrete-Choice Experiments in Healthcare: a Practical Guide. *Patient*. 2015;8:373-384.
9. de Bekker-Grob EW, Swait JD, Kassahun HT, Bliemer MCJ, Jonker MF, Veldwijk J, Cong K, Rose JM, Donkers B. Are Healthcare Choices Predictable? The Impact of Discrete Choice Experiment Designs and Models. *Value in Health*. 2019;22:1050-1062.
10. Berchi C, Launoy G. Principe, intérêts et limites de la méthode des choix discrets pour la révélation des préférences en santé. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*. 2007;55:133-139.
11. Boylan M, Suchman K, Vigdorichik J, Slover J, Bosco J. Technology-Assisted Hip and Knee Arthroplasties: An Analysis of Utilization Trends. *The Journal of Arthroplasty*. 2018;33:1019-1023.

12. Brandenberg JE. Nombre minimal de cas – gage de qualité ou succédané? *Bulletin des médecins suisses*. 2018;99:1647-1648.
13. Campbell D, Erdem S. Including Opt-Out Options in Discrete Choice Experiments: Issues to Consider. *Patient*. 2019;12:1-14.
14. Culler SD, Martin GM, Swearingen A. Comparison of adverse events rates and hospital cost between customized individually made implants and standard off-the-shelf implants for total knee arthroplasty. *Arthroplasty Today*. 2017;3:257-263.
15. Detchemendy P. Zimmer and Canary's smart knee implant receives FDA clearance. *Canary Medical*. 2021. Available at: <https://canarymedical.com/zimmer-and-canarys-smart-knee-implant-receives-fda-clearance/> [Accessed January 3, 2023].
16. Duan X, Wang B, Yang L, Kadakia AR. Applications of 3D Printing Technology in Orthopedic Treatment. *BioMed Research International*. 2021;2021:e9892456.
17. Falez F. Knee arthroplasty today. *International Orthopaedics (SICOT)*. 2014;38:221-225.
18. Fawsitt CG, Bourke J, Greene RA, McElroy B, Krucien N, Murphy R, Lutomski JE. What do women want? Valuing women's preferences and estimating demand for alternative models of maternity care using a discrete choice experiment. *Health Policy*. 2017;121:1154-1160.
19. Franke T, Attig C, Wessel D. A Personal Resource for Technology Interaction: Development and Validation of the Affinity for Technology Interaction (ATI) Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2019;35:456-467.
20. Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. *The Lancet*. 2019;393:1745-1759.
21. Iacono V, Farinelli L, Natali S, Piovan G, Screpis D, Gigante A, Zorzi C. The use of augmented reality for limb and component alignment in total knee arthroplasty: systematic review of the literature and clinical pilot study. *J EXP ORTOP*. 2021;8:52.
22. Iyengar KP, Gowers BTV, Jain VK, Ahluwalia RS, Botchu R, Vaishya R. Smart sensor implant technology in total knee arthroplasty. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 2021:101605.
23. Katz JN, Barrett J, Mahomed NN, Baron JA, Wright RJ, Losina E. Association Between Hospital and Surgeon Procedure Volume and the Outcomes of Total Knee Replacement. *JBJS*. 2004;86:1909.

24. Kurtz SM, Lau E, Ong K, Zhao K, Kelly M, Bozic KJ. Future Young Patient Demand for Primary and Revision Joint Replacement: National Projections from 2010 to 2030. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2009;467:2606.
25. Kurtz SM, Ong KL, Schmier J, Zhao K, Mowat F, Lau E. Primary and Revision Arthroplasty Surgery Caseloads in the United States from 1990 to 2004. *The Journal of Arthroplasty*. 2009;24:195-203.
26. Lan Y-T, Chen Y-W, Niu R, Chang DC, Hollenbeck BL, Mattingly DA, Smith EL, Talmo CT. The trend and future projection of technology-assisted total knee arthroplasty in the United States. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. n/a:e2478.
27. Lancsar E, Louviere J. Conducting discrete choice experiments to inform healthcare decision making: a user's guide. *Pharmacoeconomics*. 2008;26:661-677.
28. Le Stum M, Bertin T, Le Goff-Pronost M, Apremont C, Dardenne G, Rolland-Lozachmeur G, Stindel E. Three-Dimensional Printed Knee Implants: Insights into Surgeons' Points of View. *Journal of Personalized Medicine*. 2023;13:811.
29. Ledet EH, Liddle B, Kradinova K, Harper S. Smart implants in orthopedic surgery, improving patient outcomes: a review. *IEH*. 2018;5:41-51.
30. Mangham LJ, Hanson K, McPake B. How to do (or not to do) ... Designing a discrete choice experiment for application in a low-income country. *Health Policy and Planning*. 2009;24:151-158.
31. Martelli N, Serrano C, van den Brink H, Pineau J, Prognon P, Borget I, El Batti S. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery*. 2016;159:1485-1500.
32. Milte R, Huynh E, Ratcliffe J. Assessing quality of care in nursing homes using discrete choice experiments: How does the level of cognitive functioning impact upon older people's preferences? *Social Science & Medicine*. 2019;238:112466.
33. Moret CS, Hirschmann MT, Vogel N, Arnold MP. Customised, individually made total knee arthroplasty shows promising 1-year clinical and patient reported outcomes. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2021;141:2217-2225.

34. Namin AT, Jalali MS, Vahdat V, Bedair HS, O'Connor MI, Kamarthi S, Isaacs JA. Adoption of New Medical Technologies: The Case of Customized Individually Made Knee Implants. *Value in Health*. 2019;22:423-430.
35. Rossi SMP, Mancino F, Sangaletti R, Perticarini L, Lucenti L, Benazzo F. Augmented Reality in Orthopedic Surgery and Its Application in Total Joint Arthroplasty: A Systematic Review. *Applied Sciences*. 2022;12:5278.
36. Schwartz AM, Farley KX, Guild GN, Bradbury TL. Projections and Epidemiology of Revision Hip and Knee Arthroplasty in the United States to 2030. *The Journal of Arthroplasty*. 2020. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883540320301911> [Accessed May 7, 2020].
37. Schwarzkopf R, Brodsky M, Garcia GA, Gomoll AH. Surgical and Functional Outcomes in Patients Undergoing Total Knee Replacement With Patient-Specific Implants Compared With "Off-the-Shelf" Implants. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2015;3:2325967115590379.
38. Shah SM. After 25 years of computer-navigated total knee arthroplasty, where do we stand today? *Arthroplasty*. 2021;3:41.
39. Sloan M, Premkumar A, Sheth NP. Projected Volume of Primary Total Joint Arthroplasty in the U.S., 2014 to 2030. *JBJS*. 2018;100:1455-1460.
40. Sousa PL, Sculco PK, Mayman DJ, Jerabek SA, Ast MP, Chalmers BP. Robots in the Operating Room During Hip and Knee Arthroplasty. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2020;13:309-317.
41. Szinay D, Cameron R, Naughton F, Whitty JA, Brown J, Jones A. Understanding Uptake of Digital Health Products: Methodology Tutorial for a Discrete Choice Experiment Using the Bayesian Efficient Design. *J Med Internet Res*. 2021;23:e32365.
42. Taber KS. The Use of Cronbach's Alpha When Developing and Reporting Research Instruments in Science Education. *Res Sci Educ*. 2018;48:1273-1296.
43. Traets F, Sanchez DG, Vandebroek M. Generating Optimal Designs for Discrete Choice Experiments in R: The idefix Package. *Journal of Statistical Software*. 2020;96:1-41.
44. Tsugawa Y, Newhouse JP, Zaslavsky AM, Blumenthal DM, Jena AB. Physician age and outcomes in elderly patients in hospital in the US: observational study. *BMJ*. 2017;357:j1797.
45. Tsukada S, Ogawa H, Nishino M, Kurosaka K, Hirasawa N. Augmented reality-based navigation system applied to tibial bone resection in total knee arthroplasty. *J Exp Orthop*. 2019;6:44.

46. Veldwijk J, Lambooi MS, Bekker-Grob EW de, Smit HA, Wit GA de. The Effect of Including an Opt-Out Option in Discrete Choice Experiments. *PLOS ONE*. 2014;9:e111805.
47. Via GG, Brueggeman DA, Lyons JG, Ely IC, Froehle AW, Krishnamurthy AB. Funding has no effect on clinical outcomes of total joint arthroplasty emerging technologies: a systematic review of bibliometrics and conflicts of interest. *Arthroplasty*. 2022;4:45.

Appendix A

1.

2.

Characteristic	Influence of age ?			p-value ²
	50 and under, N = 56 ¹	Over 50, N = 34 ¹	Overall, N = 90 ¹	
Working Structure				0.5
public	32 (57%)	22 (65%)	54 (60%)	
private	24 (43%)	12 (35%)	36 (40%)	
Prosthesis number per year				0.030
51 and over	30 (54%)	26 (76%)	56 (62%)	
50 and under	26 (46%)	8 (24%)	34 (38%)	
Use of plannification software				0.4
no	31 (55%)	16 (47%)	47 (52%)	
yes	25 (45%)	18 (53%)	43 (48%)	
Use of navigation or robot				0.8
no	38 (68%)	24 (71%)	62 (69%)	
yes	18 (32%)	10 (29%)	28 (31%)	
Extra surgical time				0.4
yes	40 (71%)	27 (79%)	67 (74%)	
no	16 (29%)	7 (21%)	23 (26%)	
Use of sensor data				0.11
yes	45 (80%)	21 (62%)	66 (73%)	
no	5 (8.9%)	8 (24%)	13 (14%)	
no opinion	6 (11%)	5 (15%)	11 (12%)	

¹ n (%)
² Pearson's Chi-squared test; Fisher's exact test

Characteristic	Influence of the number of prostheses performed per year ?			p-value ²
	51 and over, N = 56 ¹	50 and under, N = 34 ¹	Overall, N = 90 ¹	
Working Structure				<0.001
public	26 (46%)	28 (82%)	54 (60%)	
private	30 (54%)	6 (18%)	36 (40%)	
Age				0.030
50 and under	30 (54%)	26 (76%)	56 (62%)	
Over 50	26 (46%)	8 (24%)	34 (38%)	
Use of plannification software				0.3
no	27 (48%)	20 (59%)	47 (52%)	
yes	29 (52%)	14 (41%)	43 (48%)	
Use of navigation or robot				0.038
no	43 (77%)	19 (56%)	62 (69%)	
yes	13 (23%)	15 (44%)	28 (31%)	
Extra surgical time				0.2
yes	39 (70%)	28 (82%)	67 (74%)	
no	17 (30%)	6 (18%)	23 (26%)	
Use of sensor data				>0.9
yes	41 (73%)	25 (74%)	66 (73%)	
no	8 (14%)	5 (15%)	13 (14%)	
no opinion	7 (13%)	4 (12%)	11 (12%)	

¹ n (%)
² Pearson's Chi-squared test; Fisher's exact test

Table A: Comparison of sub-group. 1. Age. 2. Number of procedures performed per year

Appendix B

1. Age

Variable		N	Odds ratio	p
Working Structure	public	54	Reference	
	private	36	0.46 (0.15, 1.32)	0.157
Prosthesis number per year	51_and_over	56	Reference	
	50_and_under	34	0.21 (0.06, 0.64)	0.008
Use of plannification software	no	47	Reference	
	yes	43	1.24 (0.47, 3.27)	0.668
Use of navigation or robot	no	62	Reference	
	yes	28	1.09 (0.35, 3.37)	0.883
Extra surgical time	yes	67	Reference	
	no	23	0.29 (0.07, 1.04)	0.073
Use of sensor data	yes	66	Reference	
	no	13	7.99 (1.74, 47.98)	0.012
	no_opinion	11	2.35 (0.56, 9.89)	0.232

2. Number of procedures

Variable		N	Odds ratio	p
Working Structure	public	54	Reference	
	private	36	0.11 (0.03, 0.36)	<0.001
Age	50_and_under	56	Reference	
	Over_50	34	0.21 (0.06, 0.65)	0.009
Use of plannification software	no	47	Reference	
	yes	43	0.51 (0.17, 1.44)	0.209
Use of navigation or robot	no	62	Reference	
	yes	28	4.16 (1.30, 15.03)	0.021
Extra surgical time	yes	67	Reference	
	no	23	0.46 (0.09, 1.93)	0.305
Use of sensor data	yes	66	Reference	
	no	13	1.99 (0.38, 10.57)	0.409
	no_opinion	11	1.33 (0.24, 6.70)	0.731

Table B: Logistic multivariate results (p = p-value). **1.** Age (as main variable). **2.** Number of procedures performed per year (as main variable).

Appendix C

	Mean	SD	Cronbach coefficient α
Global	4.58	1.32	0.65
50 years old and less	4.58	1.15	0.75
More than 50 years old	4.58	1.42	0.56
50 and under acts performed per year	4.62	1.29	0.77
51 and over acts performed per year	4.62	1.33	0.56

Table C: Affinity for Technology Interaction (ATI) score. No significant differences were observed between subgroups ($p > 0.05$). Affinity for technology interaction are as follow: between 1 and 2, very low; between 2 and 3 low; between 3 and 4 medium; between 4 and 5 high; and between 5 and 6 very high.

1 Titre

Three-Dimensional Printed Knee Implants: Insights into Surgeons' Points of View

2 Objectif 5

Dans le domaine des arthroplasties du genou et des avancées technologiques et méthodologiques qui les accompagnent, notre précédent article explorait les préférences des chirurgiens concernant les innovations sur lesquelles ils pouvaient directement intervenir.

Dans le cadre du projet FollowKnee, une autre innovation d'importance majeure pour la personnalisation des implants est l'impression 3D. En effet, la prothèse FollowKnee sera imprimée en 3D après la validation du modèle issu du logiciel de planification. Cette étape se déroulera en amont chez l'industriel en charge de la conception et de la fabrication de l'implant.

Les avantages de l'impression 3D sont de reproduire la morphologie du genou du patient, un gain de temps dans la chaîne logistique et une fabrication à la demande.

Ainsi, étant donné les avantages potentiels de l'impression 3D par rapport aux technologies de traitement conventionnelles, la faible adoption de cette technologie par les chirurgiens est sujet à question. Il est donc essentiel de mieux comprendre la divergence entre les développements technologiques observés et leur adoption lente dans la pratique.

L'objectif de cet article, en se focalisant sur une analyse linguistique, et non sur les améliorations techniques ou d'études de cas, comme c'est habituellement le cas, visera directement à comprendre le point de vue des chirurgiens, au travers l'étude du langage qu'ils utilisent.

3 Article

Article

Three-Dimensional Printed Knee Implants: Insights into Surgeons' Points of View

Mathieu Le Stum ^{1,2,*}, Thomas Bertin ¹, Myriam Le Goff-Pronost ³, Claire Apremont ¹, Guillaume Dardenne ⁴, Ghislaine Rolland-Lozachmeur ¹ and Eric Stindel ^{1,4}

¹ Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale (LATIM), UMR 1101, Faculté de Médecine de Brest, Université de Brest, Université de Bretagne Occidentale, 29200 Brest, France

² Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale (LATIM), UMR 1101, Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, INSERM, 29200 Brest, France

³ Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale (LATIM), UMR 1101, M@rsouin, Institut Mines-Telecom, IMT Atlantique, 29200 Brest, France

⁴ Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale (LATIM), UMR 1101, Centre Hospitalo-Universitaire de Brest, CHU Brest, 29200 Brest, France

* Correspondence: mathieu.lestum@univ-brest.fr

Abstract: Three-dimensional printing is a technology that has been developed and applied in several medical specialties, especially orthopedic surgery. Knee arthroplasty is the most commonly performed procedure. To fit the morphology of each knee, surgeons can choose between different standardized off-the-shelf implant sizes or opt for customized 3D-printed implants. However, routine adoption of the latter has been slow and faces several barriers. Existing studies focus on technical improvements or case studies and do not directly address the surgeon's perspective. Our study invited surgeons to express themselves freely and answer the question "What do you think about the manufacture of a prosthesis by 3D printing?". The questionnaire was completed by 90 surgeons. On average, they had more than 10 years of experience (52, 57.8% ± 10.2%), worked in public hospitals (54, 60% ± 10.1%), and performed between 0 and 100 prostheses per year (60, 66.7% ± 9.7%). They also reported not using planning software (47, 52.2% ± 9.7%), navigation systems, or robots (62, 68.9% ± 9.6%). Regarding the use of technological innovation, they agreed on the extra surgical time needed (67, 74.4% ± 9.0%). The answers obtained were classified according to two criteria: (i) opinions, and (ii) motivations. Among the respondents, 51 (70% ± 9.5%) had positive and 22 (30% ± 9.5%) had negative opinions about 3D printing. The motivations were distributed among seven categories (surgery, materials, costs, logistics, time, customization, and regulatory) and mainly related to "pre-surgery" and "post-surgery" concerns. Finally, the results showed that the use of navigation systems or robots may be associated with a more positive view of 3DP. The purpose of our study was to examine knee surgeons' perceptions of 3DP at a time of significant expansion of this technology. Our study showed that there was no opposition to its implementation, although some surgeons indicated that they were waiting for validated results. They also questioned the entire supply chain, including hospitals, insurance companies, and manufacturers. Although there was no opposition to its implementation, 3D printing is at a crucial point in its development and its full adoption will require advances in all areas of joint replacement.

Keywords: 3D-printed implant; discourse analysis; knee; orthopedic; surgeon's point of view



Citation: Le Stum, M.; Bertin, T.; Le Goff-Pronost, M.; Apremont, C.; Dardenne, G.; Rolland-Lozachmeur, G.; Stindel, E. Three-Dimensional Printed Knee Implants: Insights into Surgeons' Points of View. *J. Pers. Med.* **2023**, *13*, 811. <https://doi.org/10.3390/jpm13050811>

Academic Editor: Yiting Lei

Received: 24 March 2023

Revised: 5 May 2023

Accepted: 6 May 2023

Published: 10 May 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Three-dimensional printing (3DP), also known as additive manufacturing, is a technology first developed by Charles W. Hull in the early 1980s. Although it has been known for over 40 years, its development has advanced rapidly in the last decade and it is now considered to be part of the third technological and industrial revolution [1,2]. Based on

different technologies (stereolithography, selective laser sintering, etc.) and materials (plaster, metal, plastic, ceramics, etc.), 3DP technology has been applied in various industries such as aerospace, education, automotive, architecture, pharmaceutical, and medical [1–4].

In medicine, the use of 3DP utilities has developed and grown exponentially in recent years in several specialties, including dentistry, maxillofacial surgery, neurosurgery, orthopedics, and traumatology. This technology allows the production of models or replicas, customized tools or surgical guides (Personalized Surgery Instruments (PSI), etc.), customized implants, drugs, and biocompatible tissues [2,5]. This is the result of improved machine accessibility and easy-to-use software [6]. Among the medical fields using 3DP, joint surgery is the most studied (45.18% of the studies), followed by maxillofacial (24.12%), cranial (12.72%), and spinal (7.46%) surgeries. Around two-thirds of 3DP are used for PSI and customized implants (CIs) account for around 10% [7].

In the medical field, orthopedic and traumatology surgery was one of the earliest adopters of 3DP, as it is one of the most dynamic specialties, with rapid and innovative advances in treatment and surgery [6,8]. In this field, 3DP has seen great success due to the ease of medical image processing, as it mainly involves bone structures that provide clear visibility and contrast in computed tomography [9]. Thanks to the use of 3D planning software, the images are processed, analyzed, and then translated into a virtual 3D model, which replicates all patient's anatomy to allow the virtual design of a replica, PSI, or customized implant (CI). Once validated by surgeons, this model is sent for 3DP (layer by layer) and finishing. In terms of customized implants, this technology is designed to reproduce the native anatomy of the joint, unlike standard methods that use a series of manufactured standard sizes [8]. This printing technology has several advantages, such as replicating the patient's own geometry, saving time, and decreasing production costs [1,2]. The disadvantages of this technology are related to the mechanical properties of the printed implant, the loss of information on soft tissue (cartilage, ligament, etc.) that can influence bone cuts, and the prolonged postprocessing process [1,6,8].

In knee surgery, total knee arthroplasty is the most commonly performed procedure. However, the results are unsatisfactory in 20% of cases and between 8 and 12% of patients ask for revisions [10–12]. The main reasons for revisions are infection, mechanical loosening (including instability and malalignment), and polyethylene wear [11–13]. Theoretically, these problems could be minimized by a more individualized strategy since the positioning and fit of knee prostheses determine the functional outcome for patients. Nowadays, to fit the morphology of each knee, surgeons mainly use conventional, off-the-shelf implants, which come in different sizes and models. These implants are based on standardized anthropometric measurements, which cannot take into account all individual characteristics [14,15]. To address this issue, CIs were developed using 3D-printing technology. Several studies have shown the potential benefits of CIs in improving mechanical alignment, implant fit, bone coverage (overhang/underhang) and restoration, bone preservation, knee strength, range of motion, and axial rotation [16]. However, some recent studies of knee CIs have produced conflicting results [14,17]. Despite their potential advantages, their adoption in the operating room has been slow, as they face several barriers related to (1) surgeon practices such as initial training, familiarity, and comfort with off-the-shelf implants, and (2) costs and insurance coverage [16]. To the best of our knowledge, custom knee implants are still in development and are mainly used for patients who present less conventional anthropometric characteristics [7,14,16].

In the majority of studies, mostly focusing on PSI, medical outcomes were reported to be improved with the use of 3DP [1]. However, the existing studies on CIs focused only on the technical improvements or costs. Additionally, they analyzed isolated clinical cases or case studies and did not include comparative analyses with traditional implants [7,13,15,17]. Moreover, a publication bias may explain these results, with positive results being more commonly published than negative ones [1]. Furthermore, issues related to implementation by surgeons were rarely considered.

Given the potential advantages of 3DP over conventional processing technologies, its limited adoption by surgeons is thus questionable. To the best of our knowledge, no study has addressed the surgeon's point of view. However, just as patient preferences are yet to be taken into consideration in evidence-based medicine [18,19], a better understanding of the discrepancy between observed technological developments and their slow adoption in practice seems of paramount importance. This is why this study aimed to identify surgeons' thoughts regarding 3DP. This approach is in line with that of numerous other works (in social sciences) that investigate, question, and analyze users' opinions and their social representations about various phenomena that influence habits, including the emergence of a new technology.

2. Material and Method

2.1. Questionnaire

A questionnaire was randomly addressed to French surgeons (1) via an online survey and distributed through the French National Orthopedic Society (Sofcot), and (2) at a regional congress (SOO-Western Orthopedic Society) between January and June 2022. The questions were developed based on a literature review and insights were gained from interviews with representative experts (four orthopedic surgeons, a cognitive scientist specializing in technology adoption, and a rehabilitation physician). It was divided into five sections: (I) sociodemographic information, (II) current surgical practices, (III) preferences, (IV) thoughts on using an innovative 3D prosthesis, and (V) affinity for interacting with technology. To achieve our objective, we focused on the first two sections and the unique open-ended question in Section III, which allowed surgeons to freely express their opinions. Indeed, they had to answer the question, "What do you think about manufacturing a prosthesis using 3DP?". The ethics committee was not required since no personal data were collected.

2.2. Categorization of Answers

To this common approach used in public health, a complementary approach rooted in language science was introduced.

We performed a discourse analysis [20] of the entire corpus of answers to the open-ended question from Section III. This analysis took into account the lexicon (which words were used?), semantics (to refer to what?), syntactic parameters (sentence configuration), enunciative point of view (how does the surgeon express his views?). The original French text of the answers given as examples below and its translation into English can be found in Appendix A.

This led us to establish a main criterion for categorizing surgeons' opinions (strongly positive, strongly negative, weakly positive, and weakly negative) and a secondary criterion for justifying each opinion (whether it was supported by a motivation or not). For instance, while one respondent answered, "Not interested, this is not the right target" (strongly negative/motivation), others responded with "Brilliant" (strongly positive/no motivation) or "Don't see the point" (strongly negative/no motivation).

Surgeons who indicated they were strongly positive either explicitly agreed with the 3DP solution or provided a positive motivation in support of 3DP (sometimes both). Those who indicated they were strongly negative either explicitly disagreed with the 3DP solution or provided a negative motivation against 3DP (sometimes both). Those who indicated they were weakly positive either formulated a weak agreement or expressed a positive opinion that was immediately challenged by a contrary motivation usually introduced using "but" or "if" (French words: "mais" and "si"). Those who indicated they were weakly negative either formulated a weak disagreement or expressed a skeptical opinion supported by negative motivations.

In the second step, the motivations were categorized into seven categories as follows. Surgery included motivations related to the surgical procedure itself and its planning. The

other six motivations were lexically expressed in a very transparent way: costs, logistics, materials, time, regulatory, and customization (Table 1).

Table 1. Categorization of motivations with verbal examples (translated from French).

Category	Examples of Surgeons' Motivations
Surgery	"Yes if combined with a kinematic alignment and a CT cone beam" "Not interested, this is not the right target"
Cost	"The benefit remains to be demonstrated in the light of the extra cost" "Costs ?; [...] Why not though"
Logistics	"[...] Manufacturing time and availability, especially in hospitals" "Ordering issues [...]"
Material	"Mechanical strength?" "Lifespan issue"
Time	"very attractive but increases the time needed for preoperative preparation" "don't think it's useful (time-consuming + costly)"
Regulatory	"Difficult to obtain marketing authorization?" "Issues dealing with resistance's official approvals"
Customization	"Interest in customization" "[...] Potential customized biomechanical interest for our patients"

Finally, we classified the motivations into surgical phases: pre-operative, intra-operative, and post-operative. Pre-operative included motivations related to the preparation of the fitting of the prosthesis before the surgical act. Intra-operative included motivations related to the procedure itself and post-operative included motivations related to the strength of the material and the follow-up (Table 2).

Table 2. Categorization of motivations according to the surgical phase with verbal examples (translated from French).

Category	Examples of Surgeons' Motivations
Pre-operative	"It will deeply depend on manufacturing's criteria"
Intra-operative	"It [3DP prosthesis] has to be compatible with operator's habits and skills"
Post-operative	"Ok if as reliable as standard prostheses"

2.3. Statistical Analysis

Descriptive statistics were used to describe data with a 95% confidence interval and a 5% alpha risk. The categorical variables extracted from the questionnaire were related to sociodemographic information and current surgical practices.

For statistical analysis, both strongly and weakly positive opinions were grouped as positive, and both strongly and weakly negative opinions were grouped as negative. The Chi-squared test of independence was used on the descriptive statistics to test whether the main criterion (i.e., positive or negative) was related to the categorical variables.

Logistic regression was used to describe the influence of the categorical variables on the primary outcome of interest. The variables were adjusted for each other. ANOVA was used to assess the significant effect of the variables on the model.

Statistical tests were performed using the R version 4.0.2 software and corresponding packages (questionR, gtsummary).

3. Results

3.1. Demographics

A total of 90 surgeons answered the questionnaire. All were male and most had more than 10 years of experience (52, 57.8% ± 10.2%), worked in public hospitals (54, 60% ± 10.1%),

and performed between 0 and 100 prostheses fittings per year (60, 66.7% ± 9.7%). They also mostly reported not using planning software (47, 52.2% ± 9.7%), navigation systems, or robots (62, 68.9% ± 9.6%). Regarding the use of technological innovation, most surgeons agreed to additional surgical time (67, 74.4% ± 9.0%). As part of their patient follow-up, most surgeons also reported a desire for sensors to be integrated into the implant (66, 73.3% ± 9.1%).

3.2. Opinions Expressed

Out of the 90 questionnaires received, the open question was left unanswered 14 times. In addition, three responses explicitly stated that they had no opinion (e.g., “aucun avis”, *no opinion*). Although these responses may be viewed as ironic (for instance, a surgeon wrote “RIEN” in capitals, which is French for “NOTHING”), we decided to discard them to avoid the risk of misinterpretation.

The remaining 73 responses were categorized according to our main criterion: 51 (70% ± 9.5%) were positive (43.8% ± 10.3% strongly positive and 26% ± 9.1% weakly positive) and 22 (30% ± 9.5%) were negative (15.1% ± 7.4% strongly negative and 15.1% ± 7.4% weakly negative). No relationship was found between the categorical variables and the opinions (positive or negative) ($p > 0.05$) according to the experience, working structure, number of prostheses per year, and use of planning software. The p -value was significant for the variables, “use of navigation or robotics” and extra surgical time (Table 3).

Table 3. Opinions expressed regarding surgeons’ sociodemographics and technology usage. Positive indicates both strongly and weakly positive. Negative indicates both strongly and weakly negative.

	3DP Expressed Opinion			p-Value ²
	Negative, n = 22 ¹	Positive, n = 51 ¹	Total, n = 73 ¹	
Experience (years)				0.8
≤10	9 (41%)	19 (37%)	28 (38%)	
More than 10	13 (59%)	32 (63%)	45 (62%)	
Working structure				0.8
Private	9 (41%)	19 (37%)	28 (38%)	
Public	13 (59%)	32 (63%)	45 (62%)	
Number of prostheses per year				0.4
≤100	16 (73%)	32 (63%)	48 (66%)	
>100	6 (27%)	19 (37%)	25 (34%)	
Use of planning software				>0.9
Yes	11 (50%)	25 (49%)	36 (49%)	
No	11 (50%)	26 (51%)	37 (51%)	
Use of navigation system or robot				0.022
Yes	3 (14%)	21 (41%)	24 (33%)	
No	19 (86%)	30 (59%)	49 (67%)	
Extra surgical time				0.034
Yes	13 (59%)	42 (82%)	55 (75%)	
No	9 (41%)	9 (18%)	18 (25%)	

¹ n (%). ² Chi-squared test of independence.

Logistic regression showed that the “use of navigation or robot” was associated with more positive views on 3DP, with an odds ratio p -value result of 0.056 (Figure 1, rounded to 0.06), which needs some discussion. There was no impact of the variable “extra surgical time” ($p \geq 0.1$). A significant effect of the variable “use of navigation or robot” on the model ($p = 0.039$), unlike the variable “extra surgical time” ($p \geq 0.1$), was demonstrated by the complementary ANOVA analysis. This implies a confounding relationship between these two variables related to “extra surgical time”.

An explicit motivation (secondary criterion) was expressed in 39 (53.4% ± 11.4%) answers, whereas the remaining 34 (46.6% ± 11.4%) answers did not provide any motivations. Of the responses providing motivations, 61.5% (24) were accompanied by positive opinions and 38.5% (15) were accompanied by negative ones (Table 4).

Variable	N	Odds ratio	p
Experience (year)	≤ 10	28	Reference
	> 10	45	1.42 (0.43, 4.76) 0.56
Working structure	Private	28	Reference
	Public	45	1.36 (0.41, 4.52) 0.61
Prosthesis number per year	≤ 100	48	Reference
	> 100	25	1.73 (0.47, 7.13) 0.42
Use of planning software	No	37	Reference
	Yes	36	0.62 (0.19, 1.91) 0.41
Use of navigation or robot	No	49	Reference
	Yes	24	4.01 (1.07, 19.94) 0.06
Extra surgical time	No	18	Reference
	Yes	55	2.63 (0.78, 9.05) 0.12

Figure 1. Results of the logistic regression to measure the probability of the positive opinions relative to the negative opinions. The exact *p*-value for “use of navigation or robot” is *p* = 0.056.

Table 4. Expressed motivations related to the justification of opinions. Due to the multiple motivations expressed in one response, the percentages for “Classification of Motivation” and “Motivation and Stage of Surgery” are relative to the number of surgeons who provided motivations in their primary opinions. Positive indicates both strongly and weakly positive. Negative indicates both strongly and weakly negative.

	Positive		Negative		Total
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	
Explicit motivation	51	70%	22	30%	73
YES	24	47%	15	68%	39
NO	27	53%	7	32%	34
Classification of motivation					
Surgery	11	46%	7	47%	18
Costs	3	13%	2	13%	5
Logistics	2	8%	3	20%	5
Materials	2	8%	5	33%	7
Customization	4	17%	-	-	-
Time	3	13%	1	7%	4
Regulatory	-	-	3	20%	-
Sub-total	25	-	21	-	46
Motivation and stage of surgery					
Pre	15	63%	9	60%	24
Intra	3	13%	1	7%	4
Post	7	29%	6	40%	13
Sub-total	25	-	16	-	41

3.3. Expressed Motivations Related to the Justification of Opinions

When focusing on the various categories of motivation, surgery was the most expressed motivation (39.1% of the responses), followed by materials (15.2%), costs (10.9%), logistics (10.9%), time (8.7%), customization (8.7%), and regulatory (6.5%). The positive motivations focused more on surgery and customization, whereas the negative motivations focused more on surgery and materials (Table 4).

Pre-operative (58.5% of the responses) and post-operative (31.7%) were the most common motivations when focusing on the stage of surgery. The intra-operative stage was barely mentioned (9.7%) (Table 4).

Beyond statistics, the syntactic study showed that most of the strongly positive responses were rather brief and expressed no motivations at all (e.g., “excellent; it may be the future”). A few of them supported their enthusiasm with motivations (e.g., “good idea

given the speed of the prosthesis manufacturing process"). A unique response provided a raw positive motivation instead of an opinion (e.g., "Interest in customization").

Out of the rarer strongly negative answers, most of them dismissed 3DP technology rather harshly (e.g., "useless; insignificant"). The remaining responses supported the negative opinions with motivations (e.g., "don't think it's useful (time-consuming + costly)") or provided solely negative motivations (e.g., "what is the patient's normal knee").

Most of the weakly positive answers combined two elements: (a) spontaneous confidence (b) counterbalanced by concerns (e.g., (a) "is a good solution" (b) "if it meets current standards"). Such answers show that many surgeons are open to the 3DP perspective and are willing to be convinced of its benefits. A few weakly positive answers formulated a raw prudent opinion (e.g., "not bad").

Finally, weakly negative answers did not dismiss 3DP explicitly but expressed skepticism. They consisted of (i) a focal point to be addressed (e.g., "fragility; lifespan issue"), (ii) a question to be answered (e.g., mechanical strength?), (iii) a doubt to be dispelled (e.g., "dubious about the quality of materials"), or (iv) a direct expression of circumspection (e.g., "prudence, prudence").

4. Discussion

In our study, two-thirds of surgeons had "positive opinions", whereas one-third had "negative opinions". Predominantly, they had more than 10 years of experience, worked in the public sector, and performed a maximum of 100 prostheses per year. Regarding their use of technology, both groups typically did not use navigation or robotic systems but were prepared to add extra time to their surgeries. However, there was an equal number of users and non-users of planning software (Table 3).

Statistical analysis showed that experience, working structure, number of prostheses per year, use of planning software, and extra surgical time did not influence the opinions. However, as a variable, the use of navigation or robotic systems may be questionable. With a significant overall effect, its exact influence needs to be clarified. We can assume a significant relationship between its use and a positive opinion of 3DP ($p = 0.056$) (Table 3 and Figure 1). A larger sample size is necessary to determine its exact influence.

For two decades, the use of assisted technologies (Computer-Assisted Orthopedic Surgery (CAOS), which includes navigation systems or robots) to reduce complications and help surgeons in knee arthroplasty has increased (+154% from 2008 to 2015). Compared to other joints, knee arthroplasty is the main application, with 18% of knee surgeons using it in 2015 [21,22]. This proportion is expected to reach 32% by 2032 [23]. More specifically, the use of robots by hospitals has increased by over 500% from 2009 to 2013 [24]. Compared to PSI and conventional methods, CAOS and robots have demonstrated better accuracy and precision as far as component positioning is concerned. Nevertheless, the functional results of CAOS and robots in comparison to conventional methods are still controversial [22]. As a result of these assisted technologies, extra surgical time has been noticeable, averaging 15–25 additional minutes for TKA [24]. Surgeons who are already using these technological tools are, therefore, accustomed to the additional time required for the surgical procedure. This would explain the observed confounding effect between the additional time devoted to the placement and the use of technology such as CAOS (e.g., navigation) or robotic systems.

Due to the unique morphology of each patient, it is crucial to have good positioning of the CI. Correct placement will result in good functional outcomes that meet the anatomical needs of patients. However, difficulties have been reported in the accurate placement of CIs. Surgeons can use tools such as navigation systems or robotics to replicate the same resection plane used in the design software to achieve the correct fit [25]. However, the majority of studies that address the use of navigation or robotic systems have been conducted in an academic setting or with previously trained surgeons. For these individuals, expertise and familiarity with these technologies may be a factor in the achievement of favorable outcomes. In the hands of a less experienced surgeon, these technologies may provide unproven benefits [26]. Designing a CI involves many steps, including using numerous

imaging and prosthesis design software programs, which are not always easy to use [25]. In our pilot study, this experience-based point of view was supported by the emergence of two potential user groups based on their use or non-use of navigation or robotic technologies.

The ways they expressed their opinions of 3DP were the secondary results. It was either expressed directly (i.e., without any associated explicit motivation) or associated with an argument and thus expressed a motivation. “positive opinions” were mainly concerned with the anatomical and technical aspects of the surgical procedure, and, to a lesser extent, with the financial, material strength, or time-saving aspects. “negative opinions” were more likely to be influenced by normality (i.e., standardization) surrounding the surgical procedure, material strength, and, to a lesser extent, the regulatory issues, administrative delays of order, or financial issues. The study also showed that surgeons primarily focused on the pre-surgical phase (with mainly surgical procedure concerns) and the post-surgical phase (with mainly “material” strength and lifespan concerns). These observations indicate that physicians focus more on the environment of the surgical act. The procedure itself is rarely an issue.

In our study, we observed that an undecided (i.e., weakly convinced) population exists, which requires more in-depth results. Therefore, 3DP is an expected technology within the surgeon community.

To better understand the “weakly convinced” concerns regarding the use of 3DP (and thus CIs), it would be appropriate to look at the barriers mentioned. The technological nature of their words suggests that for surgeons, the surgical outcomes are the most important of these barriers. However, to obtain a complete picture, other concerns, such as cost, administrative barriers (public procurement, regulatory approval, etc.), and training, should be addressed. Our study did not allow us to weigh these motivations against each other.

Our results are consistent with those of previous studies showing that CI adoption depends on several factors. The most important of these are surgeons’ recommendations [16]. Because there is little evidence to show that CI improves patient outcomes compared to OTS implants, surgeons remain in a “wait and see” position and continue to use their current practices. Further clinical trials that demonstrate the long-term superiority of CI are thus expected [14,17,27,28]. Additionally, improvements would be more robust by integrating sensors into the implants, as requested by surgeons, and taking into account patient preferences [19]. Furthermore, there will be a time lag before we observe the better performance and use of new products [16]. A balance must also be ensured between surgeons’ workloads (before and during surgery) and the safety aspect of the implants (wear and tear) [29]. These positions are highlighted by the “weakly convinced” responses in our study.

In addition to this main factor, which is directly related to surgeons’ expertise, several other external factors have to be taken into consideration. Financial considerations, such as total costs, contracts between hospitals and insurance companies, or OTS implant manufacturers, may influence the acceptance of CIs [16]. Short-term goals, such as ensuring known surgical outcomes with OTS implants for insurance or hospitals and market share for vendors, have to be balanced with long-term goals [16]. A cost-effectiveness study would be useful to compare 3DP and OTS implants [29]. In fact, although technological developments (e.g., printers, software, and materials) have allowed a reduction in the cost of producing CIs (mainly through outsourcing to manufacturers), there has been an increase in costs linked to the additional processing time before surgery (e.g., conversion of 2D images into 3D, individual analysis of the joint, planning of the operation). Compared to OTS, 3DP-designed and manufactured implants require more interactions between surgeons and engineers [1,6,8]. The expected future growth of revision surgery resulting from the actual burden of primary joint arthroplasty is the perfect illustration of a long-term goal [30]. In this case, the adoption of CIs and the expected outcomes could lead to improvements in patient outcomes (intra- and post-operatively) and, consequently, a reduction in revision surgery [27,28]. A higher adoption rate could lead to a decrease in costs for hospitals and an increase in market share for manufacturers [16,31]. Our study uncovered these concerns, although they were not predominant.

Another barrier is related to the surgery itself, with the need to maintain backup implants in case of problems with CIs or a potential increase in malpractice liability (with legal risks or administrative issues). This leads us to the last obstacle, which is the surgeons' overall preferences for OTS implants due to their training, familiarity, and comfort with them [16]. Since it is accepted that 3DP in orthopedics has a promising future, surgeons are encouraged to consider its use. However, this requires adequate pre-operative planning and the use of software, as well as other advanced skills in understanding 3DP [32]. The need for education in this rapidly changing field is therefore growing. In addition to training, facilitating its use, particularly through the use of artificial intelligence or predictive models, could be another way to address these adoption challenges [8]. The latter could, for example, make it easier to preprocess images and reduce the time needed to process them. Such technologies are currently under development.

Indeed, surgeons do not have to worry if the clinical benefits of 3DP are not realized as intended. Innovation comes with the adoption and subsequent critical evaluation of technology [26].

The main limitation of our study was the administration of the questionnaire to academic or research-oriented knee surgeons, which may have introduced a selection bias. As this was in the context of a pilot study, we focused on knee surgeons to address the research project to which this study is attached (the FollowKnee project). The aim of this project is the development of a new chain of care for customized and connected knee prostheses. In light of this pilot analysis, a comparison with the opinions of surgeons specializing in other joints could be of interest. In this way, the opinions expressed about 3DP could be differentiated according to the respective joint. Distributing this pilot questionnaire directly to a larger panel of surgeons in hospitals could also reduce the selection bias.

However, we can also consider the respondents as opinion leaders, as they are mostly already convinced and can contribute significantly to the diffusion of this technology. Another limitation was the lack of contextualization of the responses due to the lack of an interview component. This may have been helpful for better classifying the opinions and motivations. Finally, the small sample size may be the source of a representativeness bias. However, as the respondents came from all over France, we can assume that the collected opinions provided a broad and relevant view of the different practice contexts of the surgeons (e.g., private and public hospitals, less than or more than ten years of experience, usage or not of navigation systems or robots).

Another limitation was related to the surgery itself. Indeed, the arthroplasty procedure can be performed either as primary or revision surgery. As the number of younger patients undergoing primary knee arthroplasty increases, the risk of early prosthesis failure requiring revision is expected to increase due to their higher functional demands. Revision knee arthroplasties have poorer outcomes in terms of patient satisfaction and longevity. There is a need for improvement in primary and revision knee arthroplasty [33]. The use of 3DP CIs with individualized implementation is one possible strategy, as it can be used either at the time of the initial implantation or the time of the revision itself. In primary TKA, a CI can provide an individual fit that optimizes coverage and closely mimics the normal kinematics of the patient [34]. In revision surgery, problems that occur during the lifetime of the prosthesis and bone loss amounts could be taken into account. This information about bone quality (e.g., bone thickness, fracture risk zone during surgery, etc.) could be added to the design of the CI [35]. In our study, we did not have the opportunity to distinguish between these two cases. Primary knee arthroplasty and revision need to be addressed in a separate study.

Our study was conducted in France and, therefore, reflects the opinions of French surgeons. Identifying concerns about 3DP in other countries could be of interest to examine any agreements or divergences of opinion.

5. Conclusions

The objective of our study was to examine knee surgeons' perceptions of 3DP at a time of significant expansion of this technology. Our study showed that there was no opposition

to its implementation. However, approximately half of the surgeons indicated that they were waiting for validated results. They also asked questions about the entire supply chain, including hospitals, insurance companies, and manufacturers. Full adoption of 3DP will require advances in all areas of joint replacement.

Author Contributions: Conceptualization, M.L.S., T.B. and E.S.; Methodology, M.L.S., T.B. and G.R.-L.; Formal analysis, M.L.S., T.B. and G.R.-L.; Investigation, M.L.S.; Data curation, M.L.S.; Writing—original draft preparation, M.L.S. and T.B.; Writing—review and editing, M.L.S., T.B., M.L.G.-P., C.A., G.D., G.R.-L. and E.S.; Project administration, M.L.S., M.L.G.-P. and E.S.; Funding acquisition, E.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work benefited from state aid managed by the National Research Agency under the Future Investment Program with reference no. ANR-17-RHUS-0005 (Project FollowKnee). No commercial funding was received for this study.

Institutional Review Board Statement: The ethics committee was not required because no personal data were collected.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data supporting the results are available from the corresponding author on reasonable request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Appendix A

Original Text in French	Proposed Translation into English
Pas intéressé, pas la cible je pense	<i>Not interested, this is not the right target</i>
Génial	<i>Brilliant</i>
Je ne vois pas l'intérêt	<i>Don't see the point</i>
Oui si combinée à un alignement cinématique et un cône beam tdm	<i>Yes if combined with a kinematic alignment and a CT cone beam</i>
Bénéfice reste à prouver à la vue du surcout	<i>The benefit remains to be demonstrated in the light of the extra cost</i>
Le coût ?, Fiabilité ?, Mais pourquoi pas ...	<i>Costs ?, Reliability ?, Why not though ...</i>
Délai de fabrication et accessibilité notamment centre hospitalier	<i>Manufacturing time and availability, especially in hospitals</i>
Difficultés de commande liées à imagerie complémentaire nécessaire Tom etc ...	<i>Ordering issues [...]</i>
Résistance mécanique ?	<i>Mechanical strength ?</i>
Problème de la durée de vie	<i>Lifespan issue</i>
très séduisant mais allonge les délais de confection en préopératoire	<i>very attractive but increases the time needed for preoperative preparation</i>
ne pense pas que ce soit utile (chronophage + coûteux)	<i>don't think it's useful (time-consuming + costly)</i>
Autorisation de mise sur le marché difficile à obtenir?	<i>Difficult to obtain marketing authorization?</i>
Problème d'homologation de résistance	<i>Issues dealing with resistance's official approvals</i>
Intérêt de personnalisation	<i>Interest in customization</i>
[...] Probable intérêt biomécanique personnalisée pour nos patients.	<i>[...] Potential customized biomechanical interest for our patients</i>
Ça va beaucoup dépendre de s critères sur lesquels on se base pour la fabrication.	<i>It will deeply depend on manufacturing's criteria</i>
Elle doit pouvoir "cohabiter" avec la compétence et les habitudes de l'opérateur.	<i>It [3DP prosthesis] has to be compatible with operator's habits and skills</i>
Ok si performance identique aux prothèses classiques	<i>Ok if as reliable as standard prostheses</i>
Aucun avis	<i>No opinion</i>
Rien	<i>Nothing</i>
excellent	<i>excellent</i>
ça peut être le futur	<i>it may be the future</i>
c'est une bonne idée en raison de la rapidité de la réalisation de la prothèse	<i>good idea given the speed of the prosthesis manufacturing process</i>
inutile	<i>useless</i>
négligeable	<i>insignificant</i>
quel est le genou normal du patient	<i>what is the patient's normal knee</i>
bonne solution si rencontre les standards actuels	<i>good solution if it meets current standards</i>
pas mal	<i>not bad</i>
fragilité	<i>fragility</i>
dubitatif quant à la qualité des matériaux	<i>dubious about the quality of materials</i>
prudence, prudence	<i>prudence, prudence</i>

References

1. Martelli, N.; Serrano, C.; van den Brink, H.; Pineau, J.; Prognon, P.; Borget, I.; El Batti, S. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery* **2016**, *159*, 1485–1500. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Andrés-Cano, P.; Calvo-Haro, J.A.; Fillat-Gomà, F.; Andrés-Cano, I.; Perez-Mañanes, R. Role of the orthopaedic surgeon in 3D printing: Current applications and legal issues for a personalized medicine. *Rev. Española Cirugía Ortopédica Traumatol. (Engl. Ed.)* **2021**, *65*, 138–151. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Fan, D.; Li, Y.; Wang, X.; Zhu, T.; Wang, Q.; Cai, H.; Li, W.; Tian, Y.; Liu, Z. Progressive 3D Printing Technology and Its Application in Medical Materials. *Front. Pharmacol.* **2020**, *11*, 122. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Trauner, K.B. The Emerging Role of 3D Printing in Arthroplasty and Orthopedics. *J. Arthroplast.* **2018**, *33*, 2352–2354. [[CrossRef](#)]
5. Duan, X.; Wang, B.; Yang, L.; Kadakia, A.R. Applications of 3D Printing Technology in Orthopedic Treatment. *BioMed Res. Int.* **2021**, *2021*, e9892456. [[CrossRef](#)]
6. Rodriguez Colon, R.; Nayak, V.V.; Parente, P.E.L.; Leucht, P.; Tovar, N.; Lin, C.C.; Rezzadeh, K.; Hacquebord, J.H.; Coelho, P.G.; Witek, L. The presence of 3D printing in orthopedics: A clinical and material review. *J. Orthop. Res.* **2023**, *41*, 601–613. [[CrossRef](#)]
7. Tack, P.; Victor, J.; Gemmel, P.; Annemans, L. 3D-printing techniques in a medical setting: A systematic literature review. *BioMed Eng. OnLine* **2016**, *15*, 115. [[CrossRef](#)]
8. Batailler, C.; Swan, J.; Sappey Marinier, E.; Servien, E.; Lustig, S. New Technologies in Knee Arthroplasty: Current Concepts. *J. Clin. Med.* **2021**, *10*, 47. [[CrossRef](#)]
9. Auricchio, F.; Marconi, S. 3D printing: Clinical applications in orthopaedics and traumatology. *EFORT Open Rev.* **2016**, *1*, 121–127. [[CrossRef](#)]
10. Carr, A.J.; Robertsson, O.; Graves, S.; Price, A.J.; Arden, N.K.; Judge, A.; Beard, D.J. Knee replacement. *Lancet* **2012**, *379*, 1331–1340. [[CrossRef](#)]
11. Dalury, D.F.; Pomeroy, D.L.; Gorab, R.S.; Adams, M.J. Why are Total Knee Arthroplasties Being Revised? *J. Arthroplast.* **2013**, *28*, 120–121. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Rupp, M.; Walter, N.; Lau, E.; Worlicek, M.; Kurtz, S.M.; Alt, V. Recent trends in revision knee arthroplasty in Germany. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 15479. [[CrossRef](#)]
13. Delanois, R.E.; Mistry, J.B.; Gwam, C.U.; Mohamed, N.S.; Choksi, U.S.; Mont, M.A. Current Epidemiology of Revision Total Knee Arthroplasty in the United States. *J. Arthroplast.* **2017**, *32*, 2663–2668. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Moret, C.S.; Hirschmann, M.T.; Vogel, N.; Arnold, M.P. Customised, individually made total knee arthroplasty shows promising 1-year clinical and patient reported outcomes. *Arch Orthop. Trauma Surg.* **2021**, *141*, 2217–2225. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Budhiparama, N.C.; Lumban-Gaol, I.; Ifran, N.N.; de Groot, P.C.J.; Nelissen, R.G.H.H. Anthropometric Measurement of Caucasian and Asian Knees, Mismatch with Knee Systems? *Orthop. J. Sport. Med.* **2020**, *8*, 2325967120S00104. [[CrossRef](#)]
16. Namin, A.T.; Jalali, M.S.; Vahdat, V.; Bedair, H.S.; O'Connor, M.I.; Kamarthi, S.; Isaacs, J.A. Adoption of New Medical Technologies: The Case of Customized Individually Made Knee Implants. *Value Health* **2019**, *22*, 423–430. [[CrossRef](#)]
17. Beit Ner, E.; Dosani, S.; Biant, L.C.; Tawy, G.F. Custom Implants in TKA Provide No Substantial Benefit in Terms of Outcome Scores, Reoperation Risk, or Mean Alignment: A Systematic Review. *Clin. Orthop. Relat. Res.* **2021**, *479*, 1237–1249. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Taïeb, S.; Vennin, P.; Carpentier, P. Evidence-Based Medicine et Choix du Patient. In Proceedings of the 27^e Journées de la Société Française de Sénologie et de Pathologie Mammaire (SFSPM), Deauville, France, 16–18 November 2005; pp. 67–81.
19. Bergmann, J.H.M.; Chandaria, V.; McGregor, A. Wearable and Implantable Sensors: The Patient's Perspective. *Sensors* **2012**, *12*, 16695–16709. [[CrossRef](#)]
20. Maingueneau, D. *Les Termes Clés de L'analyse du Discours*; Seuil: Paris, France, 2009.
21. Boylan, M.; Suchman, K.; Vigdorchik, J.; Slover, J.; Bosco, J. Technology-Assisted Hip and Knee Arthroplasties: An Analysis of Utilization Trends. *J. Arthroplast.* **2018**, *33*, 1019–1023. [[CrossRef](#)]
22. Via, G.G.; Brueggeman, D.A.; Lyons, J.G.; Ely, I.C.; Froehle, A.W.; Krishnamurthy, A.B. Funding has no effect on clinical outcomes of total joint arthroplasty emerging technologies: A systematic review of bibliometrics and conflicts of interest. *Arthroplasty* **2022**, *4*, 45. [[CrossRef](#)]
23. Lan, Y.-T.; Chen, Y.-W.; Niu, R.; Chang, D.C.; Hollenbeck, B.L.; Mattingly, D.A.; Smith, E.L.; Talmo, C.T. The trend and future projection of technology-assisted total knee arthroplasty in the United States. *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.* **2022**, *19*, e2478. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Sousa, P.L.; Sculco, P.K.; Mayman, D.J.; Jerabek, S.A.; Ast, M.P.; Chalmers, B.P. Robots in the Operating Room during Hip and Knee Arthroplasty. *Curr. Rev. Musculoskelet. Med.* **2020**, *13*, 309–317. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Wong, K.C. 3D-printed patient-specific applications in orthopedics. *Orthop. Res. Rev.* **2016**, *8*, 57–66. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Beal, M.D.; Delagrammaticas, D.; Fitz, D. Improving outcomes in total knee arthroplasty—Do navigation or customized implants have a role? *J. Orthop. Surg. Res.* **2016**, *11*, 60. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
27. Culler, S.D.; Martin, G.M.; Swearingen, A. Comparison of adverse events rates and hospital cost between customized individually made implants and standard off-the-shelf implants for total knee arthroplasty. *Arthroplast. Today* **2017**, *3*, 257–263. [[CrossRef](#)]
28. Schwarzkopf, R.; Brodsky, M.; Garcia, G.A.; Gomoll, A.H. Surgical and Functional Outcomes in Patients Undergoing Total Knee Replacement with Patient-Specific Implants Compared with “Off-the-Shelf” Implants. *Orthop. J. Sport. Med.* **2015**, *3*, 2325967115590379. [[CrossRef](#)]

29. Nuryyeva, E.; De Wilde, R. 3-D Printing Is Revolutionizing the Medical Devices World, but Are Payers Ready? *Value Health* **2016**, *19*, A311. [[CrossRef](#)]
30. Kurtz, S.M.; Lau, E.; Ong, K.; Zhao, K.; Kelly, M.; Bozic, K.J. Future Young Patient Demand for Primary and Revision Joint Replacement: National Projections from 2010 to 2030. *Clin. Orthop. Relat. Res.* **2009**, *467*, 2606. [[CrossRef](#)]
31. Baj, A.; Bolzoni, A.R.; Gianni, A.B. Virtual Planning and Patient-Specific Implants in Mandibular Reconstructionsurgery: A Micro-Costing Analysis. *Value Health* **2016**, *19*, A723. [[CrossRef](#)]
32. Alemayehu, D.G.; Zhang, Z.; Tahir, E.; Gateau, D.; Zhang, D.-F.; Ma, X. Preoperative Planning Using 3D Printing Technology in Orthopedic Surgery. *BioMed Res. Int.* **2021**, *2021*, e7940242. [[CrossRef](#)]
33. Dion, C.; Yamomo, G.; Howard, J.; Teeter, M.; Willing, R.; Lanting, B. Revision total knee arthroplasty using a novel 3D printed titanium augment: A biomechanical cadaveric study. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **2020**, *110*, 103944. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Lee, J.-A.; Koh, Y.-G.; Kang, K.-T. Biomechanical and Clinical Effect of Patient-Specific or Customized Knee Implants: A Review. *J. Clin. Med.* **2020**, *9*, 1559. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Rosso, F.; Rossi, R.; Cottino, U.; Dettoni, F.; Bruzzone, M.; Bonasia, D.E. Three-Dimensional Printed Models in Pre-Operative Planning of Complex Primary and Revision Total Knee Arthroplasty. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 9618. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Conclusion et perspective

1 Discussion

En raison du vieillissement de la population et des pathologies dégénératives du genou qui y sont associées, le nombre d'arthroplasties du genou est en augmentation constante sur l'ensemble des pays du globe.

Les arthroplasties du genou sont devenues courantes dans les pays développés en raison de l'avancée de leurs systèmes de santé, mais elles sont également de plus en plus pratiquées. Dans un phénomène de diffusion, de nombreux pays développent leur expertise dans ce domaine, comme en témoigne le développement de cette pratique en Amérique du Sud ou Afrique subsaharienne, par exemple.

Cependant, pour obtenir des données précises sur le nombre exact d'arthroplasties réalisées, il est nécessaire de mettre en place des outils de mesure fiables, reproductibles et éprouvés à grande échelle, tels que les bases de données des assurances maladies ou les registres. De plus, pour permettre des comparaisons internationales, il est important d'utiliser une codification et/ou des définitions similaires à celles utilisées dans d'autres pays.

Dans notre première étude, nous avons ainsi constaté que les taux de croissance varient d'un pays à l'autre et dépendent de plusieurs facteurs internes. Ces facteurs sont liés à la fois aux caractéristiques de la population, tels que l'augmentation du surpoids, de l'obésité, du vieillissement, etc. ; ainsi qu'à la structure des systèmes de santé, aux aspects culturels, au développement économique et à l'évolution des recommandations médicales.

À cet égard, il est important de mentionner les améliorations techniques, comme un design plus adapté des prothèses et des procédures telles que l'opération de type « fast-track », ainsi que l'utilisation de nouvelles technologies telles que la chirurgie assistée par ordinateur et les robots (CAOS). De plus, l'accessibilité à ces procédures s'est améliorée, tout comme la perception générale de ces interventions, qui ne sont plus réservées exclusivement aux personnes âgées de plus de 65 ans, mais sont désormais également proposées à des patients plus jeunes.

Il est également important de noter qu'il est constaté une croissance plus importante des arthroplasties du genou chez les hommes par rapport aux femmes, bien que les femmes restent majoritaires. Les raisons de cette tendance chez les hommes nécessitent encore des investigations.

La cartographie réalisée sur les arthroplasties du genou nous a également révélé l'existence de dynamiques de croissance différenciées selon les pays. En se fondant sur l'analyse de séries temporelles longues ou sur plusieurs études couvrant différentes périodes mais basées sur la même base de données, nous avons identifié trois phases principales.

Ainsi, la croissance suit trois phases bien définies : une période initiale à faible incidence, à laquelle succède une croissance rapide, pendant laquelle l'incidence augmente fortement. Cette croissance se stabilise ensuite à un niveau élevé, tout en étant accompagnée d'une croissance ultérieure plus modérée. Chaque pays se trouve donc dans une phase de croissance différente reflétant son stade de développement socio-économique.

Dans nos deux premières études, nous avons également identifié trois tendances observées dans différents pays : la croissance linéaire et la croissance exponentielle, toutes deux caractérisées par une croissance continue, et la croissance de type logarithmique, incluant la croissance logistique, qui se caractérise par l'atteinte d'un plateau et donc d'un seuil maximum.

Ce seuil d'incidence maximal peut indiquer soit un fort développement du système de santé en ce qui concerne les arthroplasties (c'est-à-dire que tous les patients éligibles à une prothèse peuvent en bénéficier), soit l'atteinte d'une ou plusieurs limites du système (comme par exemple le nombre de chirurgiens, la disponibilité des centres de soins, des paramètres socio-économiques etc...).

En poursuivant notre analyse sur les taux d'incidences, nous nous sommes focalisés, dans notre deuxième étude, sur onze pays européens, pour lesquels nous avons identifié différentes dynamiques. Les pays qui se trouvent en phase asymptotique peuvent s'attendre à des changements futurs limités, tandis que ceux en phase exponentielle ou linéaire atteindront probablement un plateau dans un avenir prévisible, bien que la prédiction précise du moment de ce plateau nécessite une analyse exhaustive sur plusieurs années. De plus, il est essentiel de noter que l'atteinte d'un plateau n'implique pas forcément l'arrêt de toute croissance future mais peut

aussi signifier l'atteinte d'une limite. Autrement dit, bien que non nulle sur le plateau, la croissance peut s'accélérer de nouveau une fois cette limite dépassée.

Cependant, obtenir des données exactes pour cette analyse a été une difficulté. Les analyses précédentes ont principalement utilisé des données provenant de la littérature ou de bases de données accessibles publiquement. L'accès aux bases de données nationales, tout en respectant les réglementations qui les régissent, est nécessaire pour obtenir des données plus précises. De plus, il est important de souligner que les données accessibles au public sont souvent hétérogènes, regroupant toutes les prothèses de genou existantes, à savoir les prothèses totales, unicompartmentales et parfois celles utilisées pour les reprises.

Dans le cadre du projet FollowKnee, dans lequel s'inscrit cette thèse et qui vise à revisiter la chaîne de soins grâce au développement de technologies innovantes, notre étude se concentre sur le segment des prothèses totales de genou. Nous cherchons à mieux comprendre les évolutions passées et futures de ce segment. Pour ce faire, nous avons réalisé une analyse spécifique à la France, le seul pays dont nous avons accès à une base de données détaillée.

Notre troisième étude, menée en France de 2009 à 2019, met en évidence une forte croissance des prothèses totales du genou, avec une dynamique plus prononcée chez les hommes. Cette croissance est observée dans toutes les tranches d'âge, mais le taux d'incidence augmente de manière plus significative chez les moins de 65 ans et chez les patients présentant peu de comorbidités.

À long terme, il est donc probable que l'évolution du taux d'incidence suive une dynamique de type logistique, atteignant théoriquement un plateau vers 2030, avec une prévision de croissance de +33 % d'ici 2050, représentant un total de 151 575 prothèses totales du genou. Face à cette demande croissante, une augmentation de la charge de soins est à anticiper, à moins que des solutions innovantes, qu'elles soient d'ordre organisationnel ou technologique, ne soient mises en place d'ici 2050.

Si les tendances actuellement observées dans le monde pour les actes de première intention se maintiennent, on peut s'attendre, en conséquence, à une forte augmentation des actes de reprise chirurgicale. En effet, le taux de reprise est resté relativement stable, oscillant entre 8% et 12% depuis plusieurs années. Il est important de rappeler que ces reprises sont plus iatrogènes, plus chronophages et plus coûteuses.

La combinaison d'une forte croissance, conjuguée à l'existence d'un seuil, indique une pression importante actuelle ou à venir sur les systèmes de santé. Cette pression peut se manifester à la fois sur le plan physique (c'est-à-dire le nombre maximal d'opérations réalisables par chirurgien et par bloc opératoire) et sur le plan médical (c'est-à-dire soins et parcours de soin). C'est pourquoi l'innovation devient nécessaire.

L'innovation peut prendre plusieurs formes. Tout d'abord, elle peut consister à retarder l'opération en améliorant à la fois les traitements préventifs de l'arthrose et les traitements curatifs. Il s'agit notamment de développer des médicaments capables de ralentir la progression de la maladie. De nombreuses recherches sont actuellement en cours à ce sujet.

L'innovation peut également jouer un rôle crucial dans le domaine des reprises chirurgicales. Les éviter permettrait de gagner un temps précieux pour les chirurgiens. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel d'améliorer la chirurgie initiale. C'est pourquoi le projet FollowKnee a été mis en place pour améliorer la chirurgie de première intention en y introduisant des innovations majeures, voire disruptives. Elles intègrent la planification tridimensionnelle, la collecte et le traitement des paramètres fonctionnels de la prothèse, ainsi que l'intelligence artificielle, le tout dans une prothèse personnalisée et connectée.

Toutefois, pour qu'un système innovant puisse être pleinement intégré dans la pratique médicale courante, il est essentiel que son adoption soit soigneusement prise en compte. En effet, l'introduction de nouvelles technologies peut entraîner des perturbations dans les processus existants et nécessiter des ajustements organisationnels significatifs. D'où la nécessité de bien mesurer leurs préférences dans un usage en routine.

Dans notre quatrième étude, nous avons ainsi analysé les usages des chirurgiens en interrogeant leurs préférences concernant les technologies de personnalisation automatique des prothèses, l'utilisation de la réalité augmentée lors de la pose, ainsi que l'intégration de capteurs pour améliorer la collecte de données postopératoires. Nous avons également évalué l'impact du coût de ces nouvelles technologies.

En conclusion, notre étude révèle que, malgré la diversité des réponses, les chirurgiens expriment une préférence pour l'utilisation d'une prothèse personnalisée posée grâce à l'assistance d'une réalité augmentée, pour un coût supplémentaire mesuré. Toutefois, la technologie des capteurs

intégrés semble actuellement moins attrayante pour eux, probablement en raison de son développement encore à un stade préliminaire.

Dans cette quatrième étude, nous avons ainsi évalué les préférences des chirurgiens concernant les innovations sur lesquelles ils pouvaient intervenir directement. Cependant, dans le cadre du projet FollowKnee, il y a une autre innovation d'importance majeure : l'intégration de l'impression 3D métal dans la conception de la prothèse personnalisée. Cette étape est réalisée en amont par le fabricant, et le chirurgien ne peut pas intervenir directement dessus ; il peut seulement en mesurer l'impact grâce à l'utilisation du produit fini.

Toutefois, malgré les avantages potentiels de l'impression 3D par rapport aux techniques conventionnelles, la faible utilisation de cette technologie par les chirurgiens suscite des interrogations. Il est ainsi crucial de comprendre pourquoi il existe un écart entre les avancées technologiques et leur adoption lente dans la pratique médicale.

L'objectif de notre cinquième étude fut donc de se concentrer sur une analyse linguistique, plutôt que sur l'effet des améliorations techniques ou des études de cas, comme c'est habituellement le cas. Elle vise ainsi directement à comprendre le point de vue des chirurgiens en examinant le langage qu'ils utilisent.

Notre étude a montré qu'il n'y avait aucune opposition à la mise en œuvre de l'impression 3D. Cependant, près de la moitié des chirurgiens ont exprimé leur attente de résultats validés, et ils ont soulevé des questions sur la capacité d'adaptation et d'intégration de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, notamment les hôpitaux, les compagnies d'assurance et les fabricants. Pour parvenir à une adoption complète de l'impression 3D, des avancées seront ainsi nécessaires dans tous les domaines de la chirurgie de remplacement des articulations.

2 Synthèse

Les recherches menées au cours de cette thèse ont révélé une demande mondiale croissante pour les arthroplasties du genou. Cette demande est principalement due au vieillissement de la population, à l'augmentation des facteurs de comorbidité tels que l'obésité ou le surpoids, ainsi qu'aux avancées technologiques continues de ces dernières décennies. La dynamique de croissance du nombre d'interventions (et du taux d'incidence) suit trois étapes caractéristiques d'une courbe sigmoïdale, aboutissant finalement à un plateau, symbolisant une limite du système

de soins pour la gonarthrose. L'évolution à travers ces phases dépend à la fois des caractéristiques spécifiques à chaque pays et des facteurs liés à la demande (les patients) et à l'offre (les chirurgiens, le système de santé).

En examinant les données relatives à la France, il apparaît que le pays suit ces tendances observées internationalement et, que la croissance du taux d'incidence, bien que continue au cours des dernières années, montre des signes de ralentissement, indiquant ainsi l'entrée dans la phase de plateau.

Pour faire face à cette hausse de la demande, des innovations technologiques sont indispensables et sont proposées dans le cadre de nombreux projets de recherche, parmi lesquels FollowKnee figure en bonne place. Cependant, se pose la question de leur intégration dans la pratique clinique quotidienne. Notre étude des préférences des chirurgiens révèle que ces innovations sont positivement accueillies, bien que la majorité des praticiens reste majoritairement attachée à leurs pratiques actuelles. Il est donc essentiel d'apporter des preuves robustes, tant sur le plan médical que sur les bénéfices sociétaux, pour promouvoir leur adoption. En outre, des mesures de soutien au niveau des autorités de régulation et des structures hospitalières sont nécessaires pour faciliter la diffusion de ces nouvelles technologies.

3 Limites

Cette étude présente plusieurs limites. Tout d'abord, du point de vue de l'analyse épidémiologique, nous avons rencontré des difficultés d'accès à des données complètes. Ces données auraient permis, d'une part, une comparaison internationale, et d'autre part, une analyse exhaustive par sous-variable. Les seules bases de données internationales publiquement accessibles étaient celles de l'OCDE et d'EUROSTAT, qui alimentent également la première pour les pays européens. Cependant, bien que ces bases de données soient construites sur des définitions communes et répondent à un code international identique, tous les pays n'ont pas fourni des données sur de longues périodes, ce qui a empêché une analyse historique à long terme. Les États-Unis sont un exemple de pays pour lesquels cette situation s'applique à la base de données de l'OCDE.

Il convient également de noter que pour certains pays, l'origine des sources des données figurant dans les bases de données internationales, diffèrent de celles utilisées pour les publications de références. Une certaine incohérence dans les analyses peut ainsi être observée. La Suède en est un exemple, car elle se base sur son registre national pour ses données de références, données qui diffèrent en valeur de celles d'EUROSTAT, qui sont transmises par le ministère de la santé.

De plus, le manque de variables disponibles à l'échelle internationale, limité au seul nombre de prothèses de genou posées, constitue une autre limite de cette étude, et il nous a été impossible d'approfondir davantage les analyses, en fonction du sexe ou de l'âge par exemple.

En ce qui concerne l'analyse des préférences, qui constitue la deuxième partie de cette étude, la principale limite que nous avons rencontrée concerne le recrutement des chirurgiens pour répondre au questionnaire. D'une part, la diffusion du questionnaire n'a pu se faire, pour des raisons pratiques, qu'auprès d'une population "alertée" (via les réseaux sociaux) et localisée (lors d'un congrès dont le bassin de recrutement se situe dans l'ouest de la France). Cette approche a pu introduire un biais de sélection.

4 Perspective

Les perspectives de ce travail peuvent se situer sur les aspects épidémiologie, sociétal et environnemental.

En ce qui concerne l'aspect épidémiologique, il est important de noter que nous avons utilisé la base de données nationale SNDS/PMSI sous une forme agrégée grâce à la procédure simplifiée MR-005. Bien que cette procédure nous ait permis de gagner du temps par rapport à l'utilisation de la procédure complète, elle ne nous a pas donné accès aux données individuelles, ce qui aurait été nécessaire pour étudier plus en détail l'influence d'autres variables sur le développement de la pathologie ayant conduit à l'acte d'arthroplastie. En complément, coupler les données disponibles dans le SNDS/PMSI avec le dossier médical, nous aurait également permis d'analyser des variables, telles que la masse corporelle (IMC), la présence d'autres comorbidités, l'activité socio-professionnelle, la pratique d'une activité physique, etc. Une étude approfondie de ces autres variables nous aurait également permis de mieux comprendre la forte croissance observée chez les hommes. Cela peut constituer la base de travaux future via les entrepôts de données de santé.

De plus, pour mieux comprendre la croissance des actes d'arthroplastie du genou, une analyse plus approfondie de la démographie médicale aurait été également nécessaire. Malheureusement, aucune donnée publique n'est disponible à ce sujet.

En ce qui concerne l'aspect sociétal, plusieurs aspects peuvent être abordés.

Tout d'abord, il convient de noter que notre enquête a porté exclusivement sur les chirurgiens français, ce qui signifie que l'étude de préférences ne reflète que leur point de vue. Élargir cette étude pour inclure les chirurgiens d'autres pays, en vue de comparaisons, serait également une perspective intéressante. À cette fin, des contacts ont été établis lors de congrès internationaux tels qu'ISTA et CAOS International pour évaluer la faisabilité d'une telle étude. Il est ensuite important de rappeler que nous avons précédemment discuté des préférences des prothèses personnalisées et connectées du point de vue des chirurgiens. Cependant, il ne faut pas négliger l'avis des patients, car pour que ces nouvelles technologies soient pleinement adoptées, elles doivent être acceptées par ces deux parties. Les patients et les chirurgiens auront, en effet, dans les faits, des usages différents des technologies issues de la prothèse.

Les chirurgiens se concentreront davantage sur l'aspect pratique de l'opération et du suivi, étant donné qu'ils sont responsables de l'intervention chirurgicale. En revanche, les patients mettront l'accent sur le suivi post-opératoire et la qualité de vie après l'opération, y compris les mesures à prendre, les consultations médicales et la rééducation. L'utilisation à proprement dite de cette nouvelle prothèse impliquera également l'utilisation de nouvelles technologies via des terminaux mobiles et connectés. Cela nécessitera donc que les deux parties s'adaptent à de nouvelles habitudes de suivi et de communication.

L'usage global des prothèses personnalisées et connectées dépendra donc de la bonne complémentarité entre les patients et les chirurgiens. Il est important de noter que l'aspect patient n'a pas été abordé dans ce manuscrit. Une étude complémentaire est cependant en cours de réalisation sur ce point.

La méthodologie utilisée pour cette dernière étude est similaire à celle employée pour l'étude des préférences des chirurgiens, avec des ajustements des attributs pour les adapter aux besoins des patients. Après une revue de la littérature, nous avons débuté une phase d'identification et de classification des attributs les plus importants en interrogeant un échantillon de patients. Cette démarche a permis de dégager cinq attributs principaux : le choix d'une prothèse personnalisée,

les personnes ayant aux données transmises automatiquement par les capteurs, la gestion des exercices de rééducation personnalisés, la notification en cas de complication, et enfin, la question du coût. Un pré-questionnaire a ensuite été testé auprès d'un groupe de patients restreint pour évaluer la faisabilité et le corriger. Le questionnaire final est actuellement en cours de diffusion dans cinq hôpitaux et cliniques répartis dans trois villes de France : Brest, Lorient et Nice.

Ensuite, le postulat théorique de la prothèse personnalisée et connectée, est qu'une intervention plus précoce en cas d'infection, d'usure ou de descellement pourrait éviter les réhospitalisations, réduire les coûts pour le système de santé et améliorer la qualité de vie du patient. Pour ce faire, le patient effectuera régulièrement des mesures à domicile et, lors de consultations ponctuelles, ces données seront transmises aux médecins, qui adapteront le protocole de soins. Ces gains ne sont toutefois, au stade actuel que théorique, et une analyse de vérification sera nécessaire avec les systèmes actuels. Pour mener à bien ces comparaisons de coût avec les prothèses actuelles, il sera nécessaire de faire soit une analyse coût efficacité, soit une analyse coût utilité, lorsque la prothèse personnalisée et connectée sera certifiée.

Enfin dans une société de plus en plus sensible à la question du développement durable et de la transition écologique, l'aspect environnemental, face aux fortes croissances prévus, ne peut être occulté. Au-delà du coût économique, il devient aussi nécessaire de prendre en compte le coût écologique de la prothèse personnalisée et connectée, et plus particulièrement son empreinte carbone et environnemental sur son cycle de vie.

Pris globalement, le secteur de la santé est responsable de 8% des émissions de gaz à effet de serre de la France, soit environ 46 millions de tonnes équivalent carbone teqCO_2 . Dans le détail, les émissions liées à l'achat de médicaments représentent 34% (environ 15,6 M teqCO_2), celle des dispositifs médicaux (incluant les prothèses de genou) 22% (environ 10 M teqCO_2) et celles liés aux déplacements des patients 15% (environ 5 M teqCO_2). A eux trois, ces sous-secteurs représentent 75% des émissions globales du secteur de la santé [92,93]. Ainsi, le projet FollowKnee, au-delà de l'amélioration de la santé des patients pourrait également avoir un impact sur ce bilan.

Si l'on se focalise sur la prothèse elle-même, elle est composée de métal, auquel sera adjoint une partie électronique permettant les mesures de paramètres et leur transmission. Les prothèses sont, de nos jours, à 95% constituée avec un alliage de chrome-cobalt [94]. Depuis quelques années, apparaissent des alliages à base de titane pour le remplacer [[95–97]. Au-delà des

caractéristiques propres des métaux nécessaires à la conception d'une prothèse solide, résistante et robuste, plusieurs questions peuvent se poser sur les métaux utilisés. D'une part, ceux-ci sont en criticité avérée, et d'une autre leur extraction et raffinage, demande une grosse quantité d'énergies et de ressources, dans des mines et usines, localisées hors des pays consommateurs de prothèses. A cela, il faut également rajouter, en raison de la transition énergétique actuellement en cours, une forte demande de ces mêmes métaux pour des usages tels que les batteries (voitures électriques, terminaux numériques par exemple) ou énergie renouvelable (éolienne par exemple) [98,99]. Des conflits d'usages et d'accaparement de ressources pourraient se faire jour.

Face à cela, il peut légitimement se poser la question du recyclage des prothèses issues des reprises chirurgicales, et qui pourraient être refondues en des prothèses de première intention. Aucune donnée précise n'a été trouvée à ce propos.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la prothèse intègre une composante électronique qui transmet des données à un terminal. Ce terminal, à son tour, transfère ces données vers un centre de stockage, où elles sont rendues accessibles aux médecins pour consultation. De plus, cette même prothèse est conçue de manière automatisée grâce à l'intelligence artificielle et est installée à l'aide d'un système de réalité augmentée.

Cependant, au-delà des métaux constitutifs de l'électronique, domaine sur lequel des tensions se font jour actuellement, il est important de se poser des questions sur l'impact environnemental des dispositifs numériques utilisés dans ce processus. Actuellement, l'utilisation du numérique représente 2,5% de l'empreinte carbone en France, avec une prévision de croissance de 60% d'ici 2040 [100–102]. Il convient toutefois de mettre en perspective cette croissance avec le potentiel de réduction des émissions que ces technologies numériques peuvent entraîner dans d'autres secteurs grâce à des gains d'efficacité. Par exemple, elles peuvent contribuer à la réduction des déplacements liés aux consultations médicales ou à une utilisation plus rationnelle des médicaments antidouleur.

Ainsi, l'utilisation des technologies numériques développées dans le cadre du projet FollowKnee, qui favorisent les analyses à distance et une pose plus précise des prothèses, pourrait avoir un impact indirect positif sur d'autres secteurs tels que les transports et l'achat de médicaments. Actuellement, un protocole uniforme est appliqué à tous les patients, nécessitant des visites

régulières chez les professionnels de la santé. Ces visites entraînent des déplacements fréquents, souvent effectués en véhicules personnels ou médicalisés, tels que des ambulances.

Grâce à l'utilisation des technologies mentionnées précédemment, il pourrait en résulter une réduction des déplacements nécessaires. De plus, une prothèse correctement posée engendre moins de douleurs et, par conséquent, réduit la consommation de médicaments. Cela offre un potentiel d'économies, en plus d'améliorer la qualité de vie des patients.

5 Conclusion

En conclusion, cette thèse montre l'intérêt d'une évolution technologique dans les arthroplasties totales du genou. Les aides technologiques développées trouvent un intérêt chez les chirurgiens et répondent à un réel besoin. Toutefois, elles doivent être éprouvées et validées, au risque de n'être vues que comme des « gadgets ». On notera la sensibilité des chirurgiens à l'amélioration potentielle de la qualité des soins au travers d'un gain de temps et d'usage de matériels.

Travaux de valorisation relatifs à la thèse

1 Articles directement liés au travaux de thèse

- **Article 1** : Rédigés et soumis à la Revue « OTSR » (Orthopaedic and Traumatology : Surgery and Research)
- **Article 2** : En cours de révision « The Journal of Arthroplasty »
- **Article 3** : Accepté dans la revue « OTSR »
 1. Le Stum M, Gicquel T, Dardenne G, Le Goff-Pronost M, Stindel E, Clavé A. Total knee arthroplasty in France: Male-driven rise in procedures in 2009-2019 and projections for 2050. Orthop Traumatol Surg Res. 2022 Oct 29;103463. doi: 10.1016/j.otsr.2022.103463. Epub ahead of print. PMID: 36374765.
- **Article 4** : Rejeté par « CORR » (Clinical Orthopaedic and Related Research). En cours de révision pour publication dans « Social Science and Medicine »
- **Article 5** : Accepté dans la revue « Journal of Personalized Medicine »
 2. Le Stum, M.; Bertin, T.; Le Goff-Pronost, M.; Apremont, C.; Dardenne, G.; Rolland-Lozachmeur, G.; Stindel, E. Three-Dimensional Printed Knee Implants: Insights into Surgeons' Points of View. J. Pers. Med. 2023, 13, 811. <https://doi.org/10.3390/jpm13050811>

2 Articles écrit en co-auteur principal et basés sur les méthodologies et données acquises lors de la thèse

- Les articles ci-dessous ont été rédigés en relation avec les méthodologies développées dans les articles 2 et 3.
 1. M. Vinet, M. Le Stum, T. Gicquel, A. Clave, F. Dubrana, Unicompartmental knee arthroplasty: A Multicenter retrospective descriptive study from 2009 to 2019 in France and projections to 2050, 2023 Feb 14;103581. doi: 10.1016/j.otsr.2023.103581

2. Guezou-Philippe A, Le Stum M, Le Goff-Pronost M, Stindel E, Dardenne G, Letissier H. Prothèse totale d'épaule en France : analyse des tendances entre 2009 et 2019 et projection à l'horizon 2070. Orthop Traumatol Surg Res. 2023. Accepté.

3 Conférences nationales et internationales directement liés au travaux de thèse

- **Article 3 :** Communication à EPICLIN (conférence francophone d'Épidémiologie CLINique) 2022
 1. Le Stum M, Clavé A, Le Goff Pronost M, Stindel E. Epidémiologie des prothèses articulaires de genou : analyse des tendances entre 2009 et 2019 et projection à 2050. 16ème conférence francophone d'Épidémiologie CLINique (EPICLIN). Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique. 2022. 70,2:S114, ISSN 0398-7620, <https://doi.org/10.1016/j.respe.2022.03.050>.
- **Article 4 :** Communication à ISTA (International society for Technology in Arthroplasty) 2022.
 2. Le Stum M, Le Goff-Pronost M, Stindel E. A Pilot Study on Preferences from Surgeon to Deal With an Innovative Personalized and Connected Knee Prosthesis. 33rd International Congress ISTA (International society for Technology in Arthroplasty), USA. 2022.
- **Article en co-auteur** sur les prothèse unicompartmentale de genou :
 3. Vinet M, Le Stum M, Gicquel T Clave A, Dubrana E, Prothèse unicompartmentale de genou : Étude épidémiologique descriptive rétrospective multicentrique de 2009 à 2019 en France et projections à 2050, 97ème Congrès SOFCOT (PARIS – 13 au 15 Novembre 2023), Société Française de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique (SOFCOT).

Références

- [1] Gray's Anatomie - Le Manuel pour les étudiants | Livre + Compl. | 9782294762239. Elsevier Masson SAS n.d. <https://www.elsevier-masson.fr/grays-anatomie-le-manuel-pour-les-etudiants-9782294762239.html> (accessed July 17, 2023).
- [2] Kamina Anatomie Tome 1 : Anatomie Clinique de Kamina Tome 1 - Anatomie Clinique Tome 1, Anatomie Générale, Membre de Pierre Kamina. Sauramps Medical n.d. <https://www.livres-medicaux.com/etudiants-medecine/1679-kamina-anatomie-clinique-4-edition-tome-1-anatomie-generale-membres.html> (accessed July 17, 2023).
- [3] Anatomie Fonctionnelle Tome 2, Kapandji, Maloine, 9782224034955, livres-medicaux.com. Sauramps Medical n.d. <https://www.livres-medicaux.com/etudiants/16402-anatomie-fonctionnelle-t2-7e-ed.html> (accessed July 17, 2023).
- [4] Douleurs du genou : à quoi sont-elles dues ? n.d. <https://www.ameli.fr/assure/sante/themes/gonalgie/definition-symptomes-causes> (accessed July 13, 2023).
- [5] Fracture des plateaux tibiaux à Paris. Institut de kinésithérapie 2018. <https://www.institut-kinesitherapie.paris/actualites/fracture-plateaux-tibiaux/> (accessed July 18, 2023).
- [6] Boisgard S, Erivan R, Villatte G, Descamps S. Les luxations du genou, les lésions ligamentaires graves dites Bicroisées 2020.
- [7] <https://www.facebook.com/inserm.fr>. Arthrose · Inserm, La science pour la santé. Inserm n.d. <https://www.inserm.fr/dossier/arthrose/> (accessed May 11, 2023).
- [8] Tout savoir sur l'arthrose. Fondation pour la Recherche Médicale n.d. <https://www.frm.org/recherches-autres-maladies/arthrose/tout-savoir-sur-arthrose> (accessed July 18, 2023).
- [9] Troa. Arthrose du genou : gonarthrose | Orthosud Montpellier n.d. <http://www.orthosudmontpellier.com/les-pathologies/genou/arthrose-du-genou-gonarthrose.html> (accessed July 18, 2023).
- [10] <https://www.facebook.com/inserm.fr>. Polyarthrite rhumatoïde · Inserm, La science pour la santé. Inserm n.d. <https://www.inserm.fr/dossier/polyarthrite-rhumatoide/> (accessed July 13, 2023).
- [11] <https://www.facebook.com/inserm.fr>. Avant la retraite – C'est quoi l'arthrite ? · Inserm, La science pour la santé. Inserm n.d. <https://www.inserm.fr/c-est-quoi/avant-la-retraite-cest-quoi-larthrite/> (accessed July 13, 2023).
- [12] Peña M, Quirós-Donate J, Pérez Fernández E, Crespí-Villarías N, Dieguez Costa E, García-Vadillo A, et al. Orthopedic Surgery in Rheumatoid Arthritis: Results from the Spanish National Registry of Hospitalized Patients over 17 Years. *J Rheumatol* 2020;47:341–8. <https://doi.org/10.3899/jrheum.190182>.
- [13] Des articulations raides et douloureuses, symptômes d'une polyarthrite rhumatoïde 2019. <https://sante.lefigaro.fr/article/des-articulations-raides-et-douloureuses-symptomes-d-une-polyarthrite-rhumatoide/> (accessed July 18, 2023).
- [14] Moynot J-C, Huynh-Moynot S, Baynat C, Perchoc A, Schiele P, Gunepin F-X, et al. Les ostéonécroses du genou postopératoires après ménisectomies réalisées par voie arthroscopique : mise au point à travers une revue de la littérature. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique* 2013;99:S120–9. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2013.03.011>.
- [15] Lafforgue P. Ostéonécrose spontanée du genou : le résultat d'une fracture sous-chondrale ? *Revue du Rhumatisme Monographies* 2016;83:113–8. <https://doi.org/10.1016/j.monrhu.2016.01.002>.
- [16] Narváez J, Narváez JA, Rodriguez-Moreno J, Roig-Escofet D. Osteonecrosis of the knee: differences among idiopathic and secondary types. *Rheumatology (Oxford)* 2000;39:982–9. <https://doi.org/10.1093/rheumatology/39.9.982>.

- [17] Traitement de l'arthrose du genou n.d. <https://www.ameli.fr/finistere/assure/sante/themes/arthrose-genou/traitement-medical-chirurgical> (accessed July 17, 2023).
- [18] Loriaut DP. Arthrose : les solutions pour soulager la douleur, régénérer ou réparer le cartilage. Dr Philippe LORIAUT | Chirurgien Orthopédiste Paris n.d. <https://www.chirurgienorthopedisteparis.com/arthrose-les-solutions-pour-soulager-la-douleur-regenerer-ou-reparer-le-cartilage/> (accessed November 3, 2023).
- [19] Arthrose du genou (Gonarthrose) - Traitements, opérations & prothèses. Chirurgie Orthopédique n.d. <https://www.chirurgie-orthopedique.fr/genou/arthrose-du-genou-ou-gonarthrose/> (accessed November 3, 2023).
- [20] Eléments concourant à la décision d'arthroplastie du genou et du choix de la prothèse n.d.
- [21] Niemeläinen MJ, Mäkelä KT, Robertsson O, W-Dahl A, Furnes O, Fenstad AM, et al. Different incidences of knee arthroplasty in the Nordic countries. *Acta Orthopaedica* 2017;88:173–8. <https://doi.org/10.1080/17453674.2016.1275200>.
- [22] Pedersen AB, Mehnert F, Odgaard A, Schrøder HM. Existing data sources for clinical epidemiology: The Danish Knee Arthroplasty Register. *Clin Epidemiol* 2012;4:125–35. <https://doi.org/10.2147/CLEP.S30050>.
- [23] Kawata M, Sasabuchi Y, Inui H, Taketomi S, Matsui H, Fushimi K, et al. Annual trends in knee arthroplasty and tibial osteotomy: Analysis of a national database in Japan. *Knee* 2017;24:1198–205. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2017.06.005>.
- [24] Turkiewicz A, Petersson IF, Björk J, Hawker G, Dahlberg LE, Lohmander LS, et al. Current and future impact of osteoarthritis on health care: a population-based study with projections to year 2032. *Osteoarthritis and Cartilage* 2014;22:1826–32. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2014.07.015>.
- [25] Price AJ, Alvand A, Troelsen A, Katz JN, Hooper G, Gray A, et al. Knee replacement. *The Lancet* 2018;392:1672–82. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32344-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32344-4).
- [26] Docteur Nicolas CHANZY - chirurgie orthopédique et traumatologique, Paris - La prothèse de genou n.d. <http://www.chirurgie-orthopedie-chanzy.com/chirurgie-orthopedique/prothese-de-genou.php> (accessed July 18, 2023).
- [27] Causero A, Di Benedetto P, Beltrame A, Gisonni R, Cainero V, Pagano M. Design evolution in total knee replacement: which is the future? *Acta Bio-Medica : Atenei Parmensis* 2014;85:5–19.
- [28] Deroche P. Historique, évolution des concepts, différentes prothèses actuelles. In: Bonnin M, Chambat P, editors. *La gonarthrose: Traitement chirurgical : de l'arthroscopie à la prothèse*, Paris: Springer; 2003, p. 218–38. https://doi.org/10.1007/2-287-30285-9_17.
- [29] Prothèse du genou | CHIRURGIE DU GENOU ET DE LA HANCHE n.d. <https://www.chirurgie-genou-hanche.fr/prothese-du-genou/> (accessed July 18, 2023).
- [30] Rivière C, Lazic S, Villet L, Wiart Y, Allwood SM, Cobb J. Kinematic alignment technique for total hip and knee arthroplasty. *EFORT Open Reviews* 2018;3:98–105. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.3.170022>.
- [31] Planification 3D préopératoire des prothèses de genou. Dr Yves ROUXEL n.d. <https://www.docteurrouxel.com/genou/planification-3d-preoperatoire-des-protheses-de-genou/> (accessed July 20, 2023).
- [32] Prothèse totale du genou à Paris | Chirurgie, soins, rééducation... | CPHG. Clinique Parisienne de la Hanche et du Genou n.d. <https://www.chirurgie-hanche-genou.fr/prothese-totale-du-genou/> (accessed July 20, 2023).
- [33] Prothèse Totale de Genou – Chirurgie-toulouse.fr 2017. <https://chirurgie-toulouse.fr/prothese-totale-de-genou/> (accessed July 19, 2023).
- [34] Prothèse Totale de Genou (PTG) par assistance robotique MAKO. Orthopedie Bordeaux n.d. <https://www.orthopedie-bordeaux.fr/prothese-totale-de-genou-ptg-assistance-robotique-mako/> (accessed July 20, 2023).
- [35] Lustig S, Batailler C, Servien E. Résultats à long terme des prothèses du genou. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine* 2018;202:1071–85. [https://doi.org/10.1016/S0001-4079\(19\)30274-2](https://doi.org/10.1016/S0001-4079(19)30274-2).

- [36] Sharkey PF, Lichstein PM, Shen C, Tokarski AT, Parvizi J. Why Are Total Knee Arthroplasties Failing Today—Has Anything Changed After 10 Years? *The Journal of Arthroplasty* 2014;29:1774–8. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2013.07.024>.
- [37] Pivec R, Johnson AJ, Mears SC, Mont MA. Hip arthroplasty. *The Lancet* 2012;380:1768–77. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60607-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60607-2).
- [38] Lustig S, Sappey-Marinié E, Fary C, Servien E, Parratte S, Batailler C. Personalized alignment in total knee arthroplasty: current concepts. *SICOT J* n.d.;7:19. <https://doi.org/10.1051/sicotj/2021021>.
- [39] Elsevier. Aligment dans les prothèses totales de genou. Elsevier Connect n.d. <https://www.elsevier.com/fr-fr/connect/chirurgie/aligment-dans-les-protheses-totales-de-genou> (accessed July 1, 2021).
- [40] Moret CS, Hirschmann MT, Vogel N, Arnold MP. Customised, individually made total knee arthroplasty shows promising 1-year clinical and patient reported outcomes. *Arch Orthop Trauma Surg* 2021;141:2217–25. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-04045-1>.
- [41] Budhiparama NC, Lumban-Gaol I, Ifran NN, de Groot PCJ, Nelissen RGHH. Anthropometric Measurement of Caucasian and Asian Knees, Mismatch with Knee Systems? *Orthopaedic Journal of Sports Medicine* 2020;8:2325967120S00104. <https://doi.org/10.1177/2325967120S00104>.
- [42] Namin AT, Jalali MS, Vahdat V, Bedair HS, O’Connor MI, Kamarthi S, et al. Adoption of New Medical Technologies: The Case of Customized Individually Made Knee Implants. *Value in Health* 2019;22:423–30. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2019.01.008>.
- [43] Beit Ner E, Dosani S, Biant LC, Tawy GF. Custom Implants in TKA Provide No Substantial Benefit in Terms of Outcome Scores, Reoperation Risk, or Mean Alignment: A Systematic Review. *Clinical Orthopaedics and Related Research®* 2021;479:1237–49. <https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000001651>.
- [44] Dalury DF, Pomeroy DL, Gorab RS, Adams MJ. Why are Total Knee Arthroplasties Being Revised? *The Journal of Arthroplasty* 2013;28:120–1. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2013.04.051>.
- [45] Rupp M, Walter N, Lau E, Worlicek M, Kurtz SM, Alt V. Recent trends in revision knee arthroplasty in Germany. *Sci Rep* 2021;11:15479. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94988-7>.
- [46] Schroer WC, Berend KR, Lombardi AV, Barnes CL, Bolognesi MP, Berend ME, et al. Why Are Total Knees Failing Today? Etiology of Total Knee Revision in 2010 and 2011. *The Journal of Arthroplasty* 2013;28:116–9. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2013.04.056>.
- [47] Vieillissement et santé n.d. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health> (accessed August 18, 2023).
- [48] OCDE. Panorama de la santé 2021: Les indicateurs de l’OCDE. OECD; 2021. <https://doi.org/10.1787/fea50730-fr>.
- [49] D’ici 2070, un tiers des régions perdraient des habitants - Insee Première - 1930 n.d. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6658362#titre-bloc-13> (accessed August 18, 2023).
- [50] Wendelboe AM, Hegmann KT, Biggs JJ, Cox CM, Portmann AJ, Gildea JH, et al. Relationships between body mass indices and surgical replacements of knee and hip joints. *American Journal of Preventive Medicine* 2003;25:290–5. [https://doi.org/10.1016/S0749-3797\(03\)00218-6](https://doi.org/10.1016/S0749-3797(03)00218-6).
- [51] Manek NJ, Hart D, Spector TD, MacGregor AJ. The association of body mass index and osteoarthritis of the knee joint: An examination of genetic and environmental influences. *Arthritis & Rheumatism* 2003;48:1024–9. <https://doi.org/10.1002/art.10884>.
- [52] Pabinger C, Lothaller H, Geissler A. Utilization rates of knee-arthroplasty in OECD countries. *Osteoarthritis and Cartilage* 2015;23:1664–73. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2015.05.008>.
- [53] Losina E, Thornhill TS, Rome BN, Wright J, Katz JN. The Dramatic Increase in Total Knee Replacement Utilization Rates in the United States Cannot Be Fully Explained by Growth in Population Size and the Obesity Epidemic. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94:201–7. <https://doi.org/10.2106/JBJS.J.01958>.
- [54] Kurtz SM, Lau E, Ong K, Zhao K, Kelly M, Bozic KJ. Future Young Patient Demand for Primary and Revision Joint Replacement: National Projections from 2010 to 2030. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 2009;467:2606. <https://doi.org/10.1007/s11999-009-0834-6>.

- [55] Julin J, Jämsen E, Puolakka T, Konttinen YT, Moilanen T. Younger age increases the risk of early prosthesis failure following primary total knee replacement for osteoarthritis. *Acta Orthopaedica* 2010;81:413–9. <https://doi.org/10.3109/17453674.2010.501747>.
- [56] Gelber AC, Hochberg MC, Mead LA, Wang NY, Wigley FM, Klag MJ. Joint injury in young adults and risk for subsequent knee and hip osteoarthritis. *Ann Intern Med* 2000;133:321–8. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-133-5-200009050-00007>.
- [57] Driban JB, Hootman JM, Sitler MR, Harris KP, Cattano NM. Is Participation in Certain Sports Associated With Knee Osteoarthritis? A Systematic Review. *Journal of Athletic Training* 2017;52:497–506. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.2.08>.
- [58] Ackerman IN, Bohensky MA, Zomer E, Tacey M, Gorelik A, Brand CA, et al. The projected burden of primary total knee and hip replacement for osteoarthritis in Australia to the year 2030. *BMC Musculoskeletal Disorders* 2019;20:90. <https://doi.org/10.1186/s12891-019-2411-9>.
- [59] A Snapshot of U.S. Orthopaedic Surgeons: Results from the 2018 OPUS Survey n.d. <https://www.aaos.org/aaosnow/2019/sep/youraaos/youraaos01/> (accessed August 21, 2023).
- [60] Arnault DF. ATLAS DE LA DÉMOGRAPHIE MÉDICALE EN FRANCE n.d.
- [61] FACT SHEET: Orthopaedic Surgeons Will Need to Double Total Joint Arthroplasty Caseload to Meet Demand by 2050. AAOS 2023 Annual Meeting Press Kit 2023. <https://aaos-annualmeeting-presskit.org/2023/research-news/fact-sheet-orthopaedic-surgeons-will-need-to-double-total-joint-arthroplasty-caseload-to-meet-demand-by-2050/> (accessed August 21, 2023).
- [62] Les médecins d’ici à 2040 : une population plus jeune, plus féminisée et plus souvent salariée | Direction de la recherche, des études, de l’évaluation et des statistiques n.d. <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/publications/etudes-et-resultats/les-medecins-dici-2040-une-population-plus-jeune-plus-feminisee-et> (accessed August 18, 2023).
- [63] European Commission. Directorate General for Economic and Financial Affairs. The 2021 ageing report: economic & budgetary projections for the EU Member States (2019 2070). LU: Publications Office; 2021.
- [64] Lopez CD, Boddapati V, Neuwirth AL, Shah RP, Cooper HJ, Geller JA. Hospital and Surgeon Medicare Reimbursement Trends for Total Joint Arthroplasty. *Arthroplast Today* 2020;6:437–44. <https://doi.org/10.1016/j.artd.2020.04.013>.
- [65] Heo K, Karzon A, Shah J, Ayeni A, Rodoni B, Erens G, et al. Trends in Costs and Professional Reimbursements for Revision Total Hip and Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2023.08.062>.
- [66] Sloan M, Premkumar A, Sheth NP. Projected Volume of Primary Total Joint Arthroplasty in the U.S., 2014 to 2030. *JBJS* 2018;100:1455–60. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.01617>.
- [67] Wu A, Huang C-C, Weaver MJ, Urman RD. Use of Historical Surgical Times to Predict Duration of Primary Total Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty* 2016;31:2768–72. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2016.05.038>.
- [68] Peterson J, Sodhi N, Khlopas A, Piuze NS, Newman JM, Sultan AA, et al. A Comparison of Relative Value Units in Primary Versus Revision Total Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty* 2018;33:S39–42. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2017.11.070>.
- [69] Palsis JA, Brehmer TS, Pellegrini VD, Drew JM, Sachs BL. The Cost of Joint Replacement: Comparing Two Approaches to Evaluating Costs of Total Hip and Knee Arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am* 2018;100:326–33. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.00161>.
- [70] Gadinsky NE, Manuel JB, Lyman S, Westrich GH. Increased Operating Room Time in Patients With Obesity During Primary Total Knee Arthroplasty: Conflicts for Scheduling. *The Journal of Arthroplasty* 2012;27:1171–6. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2011.12.012>.
- [71] Mari K, Dégliseux P, Mistretta F, Guillemin F, Richette P. Cost utility modeling of early vs late total knee replacement in osteoarthritis patients. *Osteoarthritis and Cartilage* 2016;24:2069–76. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2016.07.013>.

- [72] Garbarino LJ, Gold PA, Sodhi N, Anis HK, Ehiorobo JO, Boraiah S, et al. The effect of operative time on in-hospital length of stay in revision total knee arthroplasty. *Ann Transl Med* 2019;7:66. <https://doi.org/10.21037/atm.2019.01.54>.
- [73] Okafor C, Hodgkinson B, Nghiem S, Vertullo C, Byrnes J. Cost of septic and aseptic revision total knee arthroplasty: a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord* 2021;22:706. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04597-8>.
- [74] Sousa PL, Sculco PK, Mayman DJ, Jerabek SA, Ast MP, Chalmers BP. Robots in the Operating Room During Hip and Knee Arthroplasty. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2020;13:309–17. <https://doi.org/10.1007/s12178-020-09625-z>.
- [75] Perlick L, Balthis H, Tingart M, Perlick C, Grifka J. Navigation in total-knee arthroplasty CT-based implantation compared with the conventional technique. *Acta Orthopaedica Scandinavica* 2004;75:464–70. <https://doi.org/10.1080/00016470410001259-1>.
- [76] Siebert W, Mai S, Kober R, Heeckt PF. Technique and first clinical results of robot-assisted total knee replacement. *The Knee* 2002;9:173–80. [https://doi.org/10.1016/S0968-0160\(02\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0968-0160(02)00015-7).
- [77] Improve Follow-up of Knee surgery. Agence nationale de la recherche n.d. <https://anr.fr/ProjetIA-17-RHUS-0005> (accessed August 24, 2023).
- [78] Makhni MC, Riew GJ, Sumathipala MG. Telemedicine in Orthopaedic Surgery: Challenges and Opportunities. *Journal of Bone and Joint Surgery* 2020; Publish Ahead of Print. <https://doi.org/10.2106/JBJS.20.00452>.
- [79] WHO EMRO | eHealth | Health topics. World Health Organization - Regional Office for the Eastern Mediterranean n.d. <http://www.emro.who.int/health-topics/ehealth/> (accessed October 11, 2023).
- [80] Reina N. Connected orthopedics and trauma surgery: New perspectives. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 2019;105:S15–22. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2018.05.018>.
- [81] Lambrey P-J, Mainard N, Graf S, Elegbe BA, Perrin A. La vidéo-téléconsultation en orthopédie-traumatologie française restera-t-elle une parenthèse sanitaire ? Une enquête nationale auprès de 280 chirurgiens. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique* 2023;109:73–9. <https://doi.org/10.1016/j.rcot.2022.10.018>.
- [82] 2019 U.S. Telehealth Satisfaction Study. JD Power 2019. <https://www.jdpower.com/business/press-releases/2019-us-telehealth-satisfaction-study> (accessed November 3, 2023).
- [83] 2022 U.S. Telehealth Satisfaction Study. JD Power 2022. <https://www.jdpower.com/business/press-releases/2022-us-telehealth-satisfaction-study> (accessed October 27, 2023).
- [84] Téléconsultation n.d. <https://www.ameli.fr/finistere/medecin/exercice-liberal/telemedecine/teleconsultation/teleconsultation> (accessed November 3, 2023).
- [85] Brangier É, Valléry G. Acceptabilité. *Ergonomie : 150 notions clés*, Paris: Dunod; 2021, p. 25–7.
- [86] Bobillier-Chaumon M-É, Dubois M. L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ? *Le travail humain* 2009;72:355–82. <https://doi.org/10.3917/th.724.0355>.
- [87] Lancsar E, Louviere J. Conducting discrete choice experiments to inform healthcare decision making: a user's guide. *Pharmacoeconomics* 2008;26:661–77. <https://doi.org/10.2165/00019053-200826080-00004>.
- [88] Choix méthodologiques pour l'évaluation économique à la HAS. Haute Autorité de Santé n.d. https://www.has-sante.fr/jcms/r_1499251/fr/choix-methodologiques-pour-l-evaluation-economique-a-la-has (accessed August 24, 2023).
- [89] Hauber AB, González JM, Groothuis-Oudshoorn CGM, Prior T, Marshall DA, Cunningham C, et al. Statistical Methods for the Analysis of Discrete Choice Experiments: A Report of the ISPOR Conjoint Analysis Good Research Practices Task Force. *Value in Health* 2016;19:300–15. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2016.04.004>.
- [90] Lancsar E, Fiebig DG, Hole AR. Discrete Choice Experiments: A Guide to Model Specification, Estimation and Software. *Pharmacoeconomics* 2017.
- [91] Marti J. Assessing preferences for improved smoking cessation medications: a discrete choice experiment. *Eur J Health Econ* 2012;13:533–48. <https://doi.org/10.1007/s10198-011-0333-z>.

- [92] Climat, crises - Éditions Odile Jacob. www.odilejacob.fr n.d. https://www.odilejacob.fr/catalogue/campagnes/climat-crisis_9782738154262.php (accessed September 15, 2023).
- [93] Rapports. The Shift Project 2023. <https://theshiftproject.org/category/publications/rapports/> (accessed September 15, 2023).
- [94] La fin programmée des prothèses de genou en Chrome Cobalt (CrCo) ? DeviceMedFr 2018. <https://www.devicemed.fr/dossiers/reglementation/la-fin-programmee-des-protheses-de-genou-en-chrome-cobalt-crco/17507> (accessed September 11, 2023).
- [95] Knee Replacement Implant Materials. BoneSmart® n.d. <https://bonesmart.org/knee/knee-replacement-implant-materials/> (accessed September 11, 2023).
- [96] Kim J-K, Park IW, Ro DH, Mun B-S, Han H-S, Lee MC. Is a Titanium Implant for Total Knee Arthroplasty Better? A Randomized Controlled Study. *The Journal of Arthroplasty* 2021;36:1302–9. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2020.11.010>.
- [97] Deroche E, Batailler C, Shatrov J, Gunst S, Servien E, Lustig S. No clinical difference at mid-term follow-up between TiN-coated versus uncoated cemented mobile-bearing total knee arthroplasty: a matched cohort study. *SICOT-J* 2023;9:5. <https://doi.org/10.1051/sicotj/2023001>.
- [98] L'enfer numérique n.d. http://www.editionslesliensquilibrent.fr/livre-L_enfer_num%C3%A9rique-662-1-1-0-1.html (accessed September 15, 2023).
- [99] Comité pour les Métaux Stratégiques | MineralInfo n.d. <https://www.mineralinfo.fr/fr/acteurs/comite-pour-metiaux-strategiques> (accessed September 15, 2023).
- [100] Enquête annuelle “Pour un numérique soutenable” - édition 2023. Arcep 2023. <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/impact-environnemental/enquete-annuelle-pour-un-numerique-soutenable-edition-2023.html> (accessed September 12, 2023).
- [101] Impact environnemental du numérique en 2030 et 2050 : l'ADEME et l'Arcep publient une évaluation prospective. ADEME Presse n.d. <https://presse.ademe.fr/2023/03/impact-environnemental-du-numerique-en-2030-et-2050-lademe-et-larcep-publent-une-evaluation-prospective.html> (accessed September 12, 2023).
- [102] L'empreinte environnementale du numérique. Arcep 2023. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-thematiques-transverses/lempreinte-environnementale-du-numerique.html> (accessed September 12, 2023).

1 Annexe 1

Questionnaire diffusé dans le cadre l'étude impliquant la méthode des choix discret.

Etude des préférences des chirurgiens pour la pose d'une prothèse de genou personnalisée et connectée

Objectif/cadrage de l'étude

Cette étude rentre dans le cadre de ma thèse de science en médico-économie et s'inscrit dans le projet de recherche hospitalo-universitaire (RHU) FollowKnee, financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche).

L'objectif de ce questionnaire est d'étudier vos préférences au regard d'une prothèse de genou innovante issue du projet FollowKnee (www.followknee.com).

Afin de répondre au défi de l'explosion de la demande en prothèse totale de genou, le projet FollowKnee ambitionne d'en optimiser la conception, la fabrication, l'implantation et le suivi.

Personnalisée de manière automatique, grâce à une suite logicielle dédiée ; bardée de capteurs (pression, mouvement, température et pH), d'où partiront une série de données à destination des chirurgiens, pour améliorer le suivi post-opératoire ; et posée grâce à la chirurgie augmentée, la technologie FollowKnee apportera une amélioration de la précision et une aide à la décision à toutes les étapes de l'intervention.

Après quelques questions générales, le questionnaire consiste à vous demander d'indiquer, parmi les 2 types de schéma opératoire et de suivi, lequel vous préférez, par rapport à votre pratique actuelle. 16 scénarios possibles vous seront proposés. Etant donné que l'étude explore vos préférences, et que la prothèse personnalisée et connectée FollowKnee n'existe pas encore au stade de l'expérimentation, le principe de l'étude consiste à vous demander de choisir entre des schémas opératoires et de suivi hypothétiques. Il est également précisé de considérer ces scénarios dans la cas d'un usage en routine et non réservé à des cas particuliers.

Le temps requis pour compléter le questionnaire est de 10 minutes.

Nous vous remercions du temps que vous prendrez pour répondre à ce questionnaire.

Les données recueillies sont strictement confidentielles et elles le sont dans un but uniquement statistique. Conformément à la loi "informatique et libertés", vous avez un droit d'accès et de modification des informations vous concernant. Le traitement informatique des informations restera anonyme

PARTIE 1

Questions générales

[Lors diffusion via CAOS 2022 : introduire une question sur le pays d'origine ?]

A- Vous êtes :

- Un Homme
- Une Femme

B- Vous avez entre :

- 30-40 ans
- 40-50 ans
- 50-60 ans
- Plus de 60 ans

C- Vous travaillez dans :

- Un établissement public (CHU, CH, HIA, etc...)
- Un établissement privé à but non lucratif
- Un établissement privé à but lucratif

D- Vous exercez principalement en région

- Auvergne-Rhône-Alpes
- Bourgogne-Franche-Comté
- Bretagne
- Centre-Val de Loire
- Corse
- Grand Est
- Hauts-de-France
- Île-de-France
- Normandie
- Nouvelle-Aquitaine
- Occitanie

- Pays de la Loire
- Provence-Alpes-Côte d'Azur
- Guadeloupe
- Martinique
- Guyane
- La Réunion
- Mayotte

E- Vous exercez majoritairement sous statut :

- Salarié
- Libéral

F- Votre expérience (nombre d'année d'exercice) :

- Moins de 5 ans
- Entre 5 et 10 ans
- Entre 10 et 15 ans
- Plus de 15 ans

G- Nombre de prothèse totale du genou posées par an

- Moins de 10
- Entre 10 et 50
- Entre 50 et 100
- Entre 100 et 200
- > 200

PARTIE2:

L'objectif de cette partie est de mieux situer votre pratique actuelle.

Pratique opératoire

1- Utilisez-vous un logiciel de planification pré-opératoire ?

- Oui souvent
- Oui parfois
- Non
- Ne sais pas

Si oui :

- Informatique 2D ou 3D
- Pour PSI (guide de coupe)
- Sur radio (avec claques papiers)
- Autre

2- Quel type d'alignement pratiquez-vous ?

- Mécanique
- Cinématique
- Anatomique
- Ne sais pas
- Autre

3- Utilisez-vous la navigation ou un robot ?

- Oui
- Non

PARTIE 3 :

Présente les différents scénarios de choix

Liste des attributs :

Attribut	Définition	Niveau
Prothèse personnalisée	Prothèse s'adaptant à la morphologie du patient	Oui Non
Prothèse avec capteurs	Prothèse intégrant des capteurs de pressions, mouvement, température et pH. Les données permettront un meilleur suivi post-opératoire dans l'objectif d'éviter les reprises (usures, descellements et infections)	Oui Non
Réalité augmentée	Usage de la réalité augmentée au bloc opératoire pour une meilleure précision dans la pose de la prothèse.	Oui Non
Surcoût	Si une amélioration clinique est prouvée, une prothèse innovante aurait un surcoût éventuel pour le système de santé et aussi pour vous en termes de formation, investissement, logiciels... Quel serait le surcoût (€) que vous seriez prêt à accepter pour vous du fait de l'utilisation d'une prothèse innovante ?	+10% +25%

Rajout d'une alternative = Scénario « non choix » ou optout : « Face à ces deux scénarios, je préfèrerais garder ma pratique actuelle »

	Scénario A	Scénario B
Choix 1		
Prothèse personnalisée	non	oui
Prothèse avec capteurs	non	non
Réalité augmentée	oui	non
Surcoût	+10%	+25%

Choix 2

	Scénario A	Scénario B
Prothèse personnalisée	oui	non
Prothèse avec capteurs	oui	non
Réalité augmentée	non	oui
Surcoût	+25%	+25%

PARTIE 4 :

Concernant l'usage d'une prothèse innovante

1. Etes-vous prêt à accepter un temps supplémentaire de pose ?

Oui

Non

Ne sais pas

Si oui

Plus de 10 min

Plus de 20 min

Ne sais pas

Autre

2. Suivi Opérateur

Dans le cadre du suivi de votre patient, utiliseriez-vous les données issues des capteurs :

Non cela n'est pas utile

Oui, en complément d'une consultation classique

Oui, à la place d'une consultation de suivi seule

Oui mais seulement en cas d'alerte émise par le système

Je ne sais pas

3. Comment vous positionnez-vous par rapport à la fabrication d'une prothèse par impression 3D ?

.....

PARTIE 5 :

Affinity for Technology interaction / Affinité pour l'interaction technologique

Dans le questionnaire suivant, vous serez interrogé sur votre interaction avec les nouvelles technologies. Le terme "nouvelle technologie" fait référence à des applications ou autres logiciels mais aussi à des appareils digitaux complet (ex: téléphone portable, ordinateur, TV, navigation automobile embarquée etc...)

Veuillez indiquer dans quelle mesure vous êtes En accord/désaccord avec les affirmations suivantes.		Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
01	J'aime regarder en détail la façon dont une nouvelle technologie fonctionne.	<input type="checkbox"/>					
02	J'aime tester les différentes fonctionnalités des nouvelles technologies	<input type="checkbox"/>					
03	Le principal, pour moi, est qu'une nouvelle technologie fonctionne. Savoir comment et pourquoi il fonctionne ne m'intéresse pas	<input type="checkbox"/>					
04	Connaître les fonctionnalités de base d'une nouvelle technologie est suffisant pour moi.	<input type="checkbox"/>					

Nous vous remercions vivement pour votre participation

Merci d'avoir pris le temps de répondre à ce questionnaire

Titre : Nouvelle génération de Prothèse Totale de Genou personnalisées et connectées : Opportunités épidémiologiques et perception des opérateurs.

Mots clés : Arthroplastie, genou, épidémiologie, chirurgie, préférence, orthopédie

Résumé : La chirurgie de remplacement articulaire par prothèse du genou est devenue courante dans de nombreux pays, avec une augmentation constante du nombre d'implants posés.

Plusieurs facteurs, comme le vieillissement de la population, l'amélioration des résultats chirurgicaux et la qualité des implants, ainsi que les attentes de patients jeunes atteints d'arthrose précoce, expliquent cette tendance.

Face aux défis futurs liés à la croissance attendue, et à l'augmentation prévisible des coûts de prise en charge, des innovations systémiques et techniques sont indispensables. Les acteurs de l'industrie de la santé et les chercheurs s'efforcent donc constamment d'améliorer les technologies et les processus.

C'est dans ce contexte que le projet FollowKnee a été initié, visant à repenser la chaîne de soins actuelle en concevant une prothèse personnalisée et connectée.

La présente thèse interroge donc les origines de cette croissance et les préférences des chirurgiens vis-à-vis de ces technologies disruptives.

L'analyse épidémiologique des arthroplasties du genou montre une croissance mondiale hétérogène entre les pays. Elle résulte de combinaisons de causes étiologiques et de facteurs exogènes comme les améliorations technologiques, les politiques publiques ou les recommandations médicales. En conséquence, plusieurs typologies de croissance sont observées.

L'analyse des préférences révèle une perception positive et un souhait d'utilisation de ces nouvelles technologies, dont, l'usage reste toutefois dépendant du contexte de travail et du degré de maturité.

En conclusion, cette thèse montre l'intérêt d'une évolution technologique, en réponse à la croissance observée et prévue.

Title: A New Generation of Personalized and Connected Total Knee Implants: Epidemiological Opportunities and Operator Perceptions.

Keywords: Arthroplasty, knee, epidemiology, surgery, preference, orthopaedic

Abstract: Knee replacement surgery has become an established practice in many countries, with a steady increase in the number of implants placed.

Several factors, such as an aging population, improved surgical results and implant quality, as well as the expectations of younger patients with early-onset osteoarthritis, explain this trend.

Faced with the future challenges of expected growth and the foreseeable increase in treatment costs, systemic and technical innovations are essential. Healthcare industry players and researchers are therefore constantly striving to improve technologies and processes.

This is the background to the FollowKnee project, which aims to rethink the current care chain by designing a personalized, connected prosthesis.

This thesis, therefore, investigates the origins of this growth and surgeons' preferences for these disruptive technologies.

Epidemiological analysis of knee arthroplasties shows heterogeneous growth worldwide. This is the result of a combination of etiological causes and exogenous factors such as technological improvements, public policies, and medical recommendations. As a result, several growth typologies are observed.

Preference analysis reveals a positive perception and a desire to use these new technologies, although their use remains dependent on the work context and degree of maturity.

In conclusion, this thesis shows the interest of a technological evolution in response to the observed and predicted growth.