

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique
Université BADJI MOKHTAR
Faculté de Médecine
Département de Médecine



La Modélisation 3D dans la Reconstruction Anatomique des Lésions Cranio-Faciales

Thèse pour l'obtention du grade de
Docteur En Sciences Médicales (DESM)

Présentée par : **Dr IMEKRAZ Sofiane**
Maître Assistant en **Anatomie Normale**

Directeur de thèse : **Pr BOUAZIZ Mourad** (Annaba)

Président du Jury : **Pr MAHDADI Salah** (Sétif)

Examineurs :

Pr DANOUNE Abdelmalek (Béjaïa)

Pr AMOURA Kamel (Annaba)

Pr BOUATTOU Fadila (Annaba)

Pr BOUBLATA Lotfi (Constantine)

Pr NAMOUNI Monia (Annaba)

Année Universitaire : 2024-2025

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LISTE DES FIGURES & TABLEAUX	i
---	----------

LISTE DES ACRONYMES	iii
----------------------------------	------------

INTRODUCTION	1
A- Domaine d'étude	1
B- Problématique	2
C- Matériels et Méthodes	3
D- Avantages attendus	4
E- Structure de La thèse	4

Partie I : ETAT de L'ART

CHAPITRE 1 : ANATOMIE VIRTUELLE & IMPRESSION 3D	7
1-1 Technologie de l'anatomie virtuelle	7
1-2 Segmentation d'Images Radiologiques	12

CHAPITRE 2 : IMPRESSION 3D	15
2-1 Introduction	15
2-2 Histoire de l'impression 3D	17
2-3 L'impression 3D médicale	19
2-3.1 Applications Actuelles de l'Impression 3D Médicale	19
2-3.2 Avantages de l'Impression 3D Médicale	21
2-3.3 Perspectives Futures	23
2-4 Les types d'impression 3D	26
2-4.1 Fusion et Solidification par Laser (SLM/SLS)	26
2-4.2 Modélisation par Dépôt de Fil Fondu (FDM/FFF)	27
2-4.3 Stéréolithographie (SLA)	27
2-4.4 Dépôt de Matériau par Liage et Extrusion (MELD).....	28
2-4.5 Jet d'Encre (PolyJet et MultiJet)	29

2-5	Impression 3D durant le COVID	30
2-5.1	Fabrication de Matériel Médical Critique	30
2-5.2	Prototypage Rapide de Dispositifs Médicaux	30
2-6	Conclusion	31
CHAPITRE 3 : LE CRANE & LES DEFAUTS OSSEUX CRANIENS.....		33
3-1	Le Crâne	33
3-2	La symétrie Crânienne	33
3-3	Les points anthropométriques crâniens	34
3-4	Evaluation de la symétrie crânienne (Indice de Symétrie)	36
3-5	L'Asymétrie crânienne	39
3-6	La Régénération Osseuse	40
3-7	Les Causes des Défauts Osseux Crâniens	42
3-8	Conséquences physiopathologiques du Défaut Crânien	42
3-9	Trephined Syndrome	45
3-10	Impact Psycho-social du Défaut Crânien	48
3-11	Conclusion	49
CHAPITRE 4 : LES CRANIOPLASTIES		50
4-1	Histoire des cranioplasties	50
4-2	Limites des cranioplasties avant l'impression 3D	52
4-3	Types de cranioplasties	53
4-4	Types de matériaux utilisés dans les prothèses crâniennes.....	53
4-5	Le ciment osseux vs le Titane	56
4-6	Techniques de Fixation des cranioplasties :	59
4-7	Complications Possibles des cranioplasties	60
4-8	Conclusion	61
 Partie II : CONTRIBUTION PRATIQUE		
CHAPITRE 5 : MATERIELS & METHODES		63
5-1	Matériels	63
5-2	Méthodes	66
5-2-1	Segmentation	66

5-2-2	Conception du moule numérique	68
5-2-3	Impression 3D du moule	68
5-2-4	Conception de la prothèse en Per-opératoire	70
5-2-5	Evaluation de la surface du Défaut crânien et de la surface du crâne	71
5-2-6	L'estimation de l'index de symétrie crânienne	74
5-3	Conclusion	77
CHAPITRE 6 : RESULTATS		78
6-1	Données Démographiques	78
6-2	Paramètres du Défaut Crânien	79
6-3	Paramètres Géométriques et Radiologiques des Crânes des Patients	81
6-4	Caractéristiques du Moule	85
6-5	Paramètres Chirurgicaux des Cranioplasties	88
6-6	Satisfaction	91
CHAPITRE 7 : DISCUSSION		94
7-1	Relation Lésion causale du défaut, l'Age et la Localisation	94
7-2	La géométrie crânienne	95
7-3	La conception du moule	95
7-4	L'ajustement per-opératoire de la cranioplastie	95
7-5	Les complications	96
7-6	La disponibilité	97
7-7	La précision	97
7-8	La simplicité	97
7-9	Le coût	98
7-10	La satisfaction	98
7-11	Technique innovante	98
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		99
BIBLIOGRAPHIE		101

Remerciements

À l'aimable attention des membres du jury de ma thèse :

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour l'honneur que vous me faites en acceptant d'évaluer mon travail.

- **Monsieur le Président du jury le Professeur MAHDADI Salah, Chef de service d'Anatomie de la faculté de médecine de Sétif,**

Je tiens à vous exprimer ma reconnaissance pour avoir accepté de présider ce jury. Votre évaluation accordera à ce travail de la crédibilité et de l'affirmation en vue de votre longue expérience dans le domaine de l'anatomie, notamment votre vision pour l'anatomie moderne.

- **Monsieur le Professeur BOUAZIZ Mourad, mon directeur de thèse et le chef de service de neurochirurgie au CHU d'Annaba**

Mes plus vifs remerciements pour votre guidance constante tout au long de ce parcours doctoral. Votre rigueur scientifique, votre disponibilité et vos conseils avisés ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail. Cette thèse est le fruit de votre confiance en moi et de votre engagement sans faille.

- **Monsieur le Professeur DANOUNE Abdelmalek, Chef de service d'Anatomie Médico-Chirurgicale de la faculté de Médecine de Béjaïa,**

Mon Maître pendant tout mon cursus de spécialité en anatomie, merci infiniment d'avoir accepté d'examiner cette thèse. Votre renommée de pilier de cette discipline fait de votre évaluation à la fois un énorme honneur et une occasion inestimable de valorisation scientifique de ce manuscrit.

- **Monsieur le Professeur AMOURA Kamel, Doyen de la Faculté de Médecine d'Annaba**

Je vous remercie chaleureusement pour votre participation à ce jury en qualité d'examineur. Votre éminente position en qualité du Doyen de la Faculté de Médecine d'Annaba confère à ce jury une dimension particulièrement honorifique.

- **Madame la Professeure BOUATTOU Fadila, Chef de service de Chirurgie Plastique du CHU d'Annaba,**

Merci d'avoir accepté de consacrer de votre temps pour examiner cette thèse de doctorat. Votre expertise reconnue dans le domaine de la chirurgie réparatrice me permettra d'avoir un avis professionnel et déterminant pour le contexte abordé dans ce travail.

- **Monsieur le Professeur BOUBLATA Lotfi, Chef de service de Neurochirurgie du CHU de Constantine,**

je vous remercie d'avoir accepté d'être examinateur dans ce jury. Cette thèse de doctorat en anatomie a eu comme champ d'application la réparation crânienne dans un service de neurochirurgie. En votre qualité d'expert en neurochirurgie, vos remarques apporteront sans doute une valeur ajoutée importante à ce travail.

- **Madame la Professeure NAMOUNI Monia, Chef de service de Radiologie du CHU d'Annaba,**

je vous remercie d'avoir accepté d'être examinatrice de ce travail de recherche. Dans cette thèse de doctorat en anatomie, l'aspect radiologique a été abordé, raison pour laquelle, votre évaluation en votre qualité d'experte en imagerie médicale constituera un repère académique et professionnel quant aux informations élaborées dans ce manuscrit.

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figures & Tableaux	Page
Figure 1.1 : planification pré-opératoire d'une déformation rachidienne avec modèles imprimés en 3D. ([Belvedere2022])	8
Figure 1.2 : Modèles imprimés en 3D d'anatomie humaine destinés aux étudiants de médecine. ([Radzi2022])	9
Figure 1.3 : Applications de l'impression 3D dans la recherche médicale. ([Sharma2019])	9
Figure 1.4 : La réalité virtuelle dans la formation médicale. (Laerdal)	10
Figure 1.5 : Représentation schématique du concept du jumeau numérique « digital twin ». (MathWorks)	11
Figure 1.6 : La segmentation par regroupement de pixels vs par contour actif.	13
Figure 1.7 : Surface Rendering à gauche vs Volume Rendering à droite. ([Cavalcanti2002])	13
Figure 2.1 : différence entre la fabrication soustractive (a) et fabrication additive (b). ([Chen2020])	16
Figure 2.2 : Evolution de l'imprimante 3D. (InnovationM2)	18
Figure 2.3 : Modèle anatomique réalisé avec une imprimante 3D couleur. (Monash University)	19
Figure 2.4 : Entraînement sur la chirurgie des anévrysmes à l'aide d'une maquette imprimée en 3D. ([Nagassa2019])	20
Figure 2.5 : prothèse personnalisée en monocoque conçue par impression 3D. ([Nicoloso2021])	20
Figure 2.6 : Des implants orthopédiques réalisés à l'aide de l'impression 3D. (All3DP)	21
Figure 2.7 : Prothèses crâniennes personnalisées imprimées en 3D. ([Ebel2023])	21
Figure 2.8 : Equipements médicaux conçus par impression 3D. ([Aydin2021])	23
Figure 2.9 : Fabrication rapide et en quantité de dispositifs médicaux conçus par impression 3D. ([Aydin2021])	23
Figure 2.10 : Un comprimé comportant plusieurs médicaments imprimé en 3D. ([Robles-Martinez2019])	24
Figure 2.11 : Un programme de réhabilitation par la production de prothèses pour les amputés à l'aide d'imprimantes 3D. (UNDP The Gambia, 2022)	25
Figure 2.12 : impression 3D par Fusion et solidification. A : Principe de fonctionnement ([Carew2020]). B : processus de fusion avec Laser (GE Additive). C : dépoudrage et nettoyage de l'objet final (Sinterit).	26
Figure 2.13 : impression 3D par Dépôt de fil fondu. A : Principe de fonctionnement ([Carew2020]). B : des modèles (UltiMaker)	27
Figure 2.14 : impression 3D par Stéréolithographie. A : Principe de fonctionnement ([Carew2020]). B : Exemple (3Dnatives)	28
Figure 2.15 : impression 3D Dépôt de Matériau par Liage et Extrusion. A : Principe de fonctionnement (MELD Manufacturing). B : Exemple (3Dnatives)	28
Figure 2.16 : impression 3D par Jet d'Encre. A : Principe de fonctionnement ([Wei2022]). B : Exemples (All3DP).	29
Figure 2.17 : Rôle de l'impression 3D durant le Covid ([Ishack 2021]).	31
Figure 3.1 : Schéma représentant les différents points crâniens. ([Cordeiro2015])	35
Tableau 3.1 : les points crâniens latéraux. ([Cordeiro2015])	35
Tableau 3.2 : les points crâniens médiaux. ([Cordeiro2015])	36
Figure 3.2 : Evaluation de la symétrie crânienne. ([Ashtiani2019], [Ulcay2021])	38
Figure 3.3 : Schéma montrant les conséquences physiopathologiques du défaut crânien. ([Ashayeri2016])	44
Figure 3.4 : Diagramme résumant les altérations survenues au-cours du Trephined syndrome. ([Annan2015])	45
Tableau 3.3 : les signes cliniques au-cours du trephined syndrome	46
Figure 3.5 : Photo d'un patient présentant le trephined syndrome. ([Romero2013])	46
Figure 3.6 : Aspects radiologiques du Trephined syndrome. ([Cassagne2022])	47
Figure 4.1 : Un manuscrit arabe décrivant une fracture crânienne et sa gestion. ([Aciduman2021])	50
Figure 4.2 : Histoire de l'évolution des cranioplasties dans les temps modernes. ([Alkhaibary2020])	51
Figure 4.3 : Cranioplastie en titane. ([Policicchio2020])	54
Figure 4.4 : Cranioplastie Polyméthacrylate de méthyle (ciment osseux).	55
Figure 4.5 : Cranioplastie en polyéthylène poreux. ([Wolfswinkel2017])	56
Tableau 4.1 : Comparaison entre le ciment osseux et le titane	58

Figure 4.6 : les complications de la chirurgie des prothèses crâniennes.	61
Figure 5.1 : Imprimante 3D utilisée dans la conception du moule qui servira de guide pour la cranioplastie.	65
Figure 5.2 : Interface du logiciel Slicer3D montrant l'import des données scannographiques DICOM.	66
Figure 5.3 : Interface du logiciel Slicer3D expliquant la segmentation et l'isolement du crâne.	67
Figure 5.4 : Interface du logiciel Slicer3D montrant l'étape d'export du crâne isolé en format exploitable par les logiciels de modélisation 3D.	67
Figure 5.5 : Interface du logiciel Slicer3D montrant les étapes de conception du moule numérique. (A) import de l'objet. (B) la symétrie du modèle. (C) la conception du surface du moule.	68
Figure 5.6 : Impression du moule physique. (A) ajustement des paramètres de l'impression. (B) simulation de l'impression 3D. (C) Impression 3D du moule physique	69
Figure 5.7 : l'étape per-opératoire de la conception de la cranioplastie. (A) le moule physique et le ciment osseux. (B-D) façonner le ciment osseux qui se transforme en une pâte malléable. (E) application du ciment sur le moule. (F) démoulage après durcissement du ciment osseux. (G) mise en place de la prothèse après avoir confectionné des pores. (H) recouvrement cutané.	70
Figure 5.8 : Interface Slicer3D montrant l'importation de la surface du défaut et du crâne	71
Figure 5.9 : Conversion du modèle en format exploitable pour les mesures de grandeurs.	71
Figure 5.10 : le module <i>Segment Statistics</i> du logiciel Slicer3D pour la mesure de surface	72
Figure 5.11 : Détermination des surfaces à calculer sur le module <i>Segment Statistics</i> du logiciel Slicer3D.	72
Figure 5.12 : Ajustement des paramètres de calcul des surfaces sur le module <i>Segment Statistics</i> du logiciel Slicer3D.	73
Figure 5.13 : Calcul des surfaces sur le module <i>Segment Statistics</i> du logiciel Slicer3D.	73
Figure 5.14 : Visualisation du crâne à l'aide du module <i>Volume Rendering</i> sur le logiciel Slicer3D.	74
Figure 5.15 : Détermination des points crâniens à l'aide du module <i>Markups</i> sur le logiciel Slicer3D.	75
Figure 5.16 : Détermination des distances entre les points crâniens sur le logiciel Slicer3D.	75
Figure 5.17 : les longueurs des distances entre les points crâniens sur le logiciel Slicer3D et leur export vers un tableau.	76
Tableau 5.1 : les distances entre les points crâniens utilisées pour le calcul de l'index de symétrie.	76
Figure 6.1 : Paramètres démographiques des patients. (A) répartition par sexe. (B) répartition par âge.	78
Figure 6.2 : les causes des défauts crâniens des patients. (A) répartition en fonction de l'origine. (B) répartition en fonction du sexe. (C) répartition en fonction de l'âge.	79
Tableau 6.1 : Les causes tumorales des défauts crâniens.	80
Figure 6.3 : Répartition des défauts crâniens selon leur localisation.	80
Figure 6.4 : Schéma représentant la localisation, la forme et les paramètres géométrique des défauts crâniens. SD (surface d défaut). SC (surface du crâne). D/C (pourcentage de a surface du défaut par rapport au crâne)	81-82
Tableau 6.2 : les distances en millimètres entre les points crâniens latéraux (droits et gauches) et médiaux et l'index de symétrie des patients.	83
Figure 6.5 : Index de symétrie de la calvaria des patients présentant des défauts crâniens.	84
Figure 6.6 : Paramètres du moule servant comme guide pour la cranioplastie. (A) répartition selon la conception par symétrie ou de la ligne médiane. (B) méthode de stérilisation.	85
Tableau 6.3 : Répartition des malades en fonction des paramètres de leur Moule : méthode de conception par symétrie ou de la ligne médiane, temps d'impression, longueur de filament PLA consommé et la méthode de stérilisation.	86
Figure 6.7 : Photos per-opératoires des moules imprimés en 3D servant comme guide pour la conception de la cranioplastie.	87
Tableau 6.4 : Les paramètres chirurgicaux des cranioplasties : l'approche chirurgicale, le délai entre la craniectomie et la mise en place de la cranoplastie, l'ajustement per-opératoire de la prothèse, la méthode de fixation et les complications.	89
Figure 6.8 : Photos per-opératoires de patients qui ont bénéficié d'une cranioplastie conçue par impression 3D.	90
Figure 6.9 : Score de satisfaction des Patients qui ont subi une cranioplastie par impression 3D.	91
Figure 6.10 : Photos de Patients qui ont subi une cranioplastie par impression 3D. (pré-opératoire, TDM, per-opératoire et résultat après l'intervention.	91-93

LISTE DES ACRONYMES

3D	Trois Dimensions
2D	Deux Dimensions
AR	Augmented Reality
ATM	Articulation Temporo-Mandibulaire
BMP	Bone Morphogenetic Protein
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CHU	Centre Hospitalo-universitaire
COVID	Coronavirus Disease
CT	Computed Tomography
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
EPI	Équipement de Protection Individuelle
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
Go	Gigaoctet
IGF	Insulin-like Growth Factor
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCR	Liquide Cérébro-Rachidien
PLA	Acide Polylactique
PMMA	Polyméthylméthacrylate
QI	Quotient Intellectuel
RAM	Random Access Memory
SLA	StereoLithography Apparatus
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography
TDM	Tomodensitométrie
TGF-β	Transforming Growth Factor-beta
UV	Ultraviolet
VR	Virtual reality

INTRODUCTION

La réparation des défauts crâniens par impression 3D est une avancée remarquable dans le domaine de la chirurgie cranio-faciale et de la reconstruction osseuse. Cette technique révolutionnaire permet de restaurer la forme et la fonction du crâne à l'aide de modèles sur mesure, créés à partir de données anatomiques spécifiques du patient et fabriqués grâce à la technologie de l'impression 3D (la fabrication additive).([Lin2020], [Csámer2023])

La technologie numérique et l'impression 3D ont gagné des niveaux intéressants pour les impliquer en santé. En plus, leur disponibilité sur le marché ainsi que leur coût les rendent abordables non seulement à l'échelle institutionnelle mais aussi individuelle (imprimante 3D de bureau). ([Schön2020], [Kropla2023], [Kopačin2024])

Notre travail consiste à proposer une méthode innovante de conception et de mise en application de cranioplasties personnalisées à l'aide d'un matériel numérique performant et abordable. D'un point de vue éthique, l'innovation apportée par ce travail ne prédispose en aucun cas le malade à un risque infectieux ou autre. Le matériau utilisé pour la prothèse est du ciment osseux (connu pour sa biotolérabilité et largement utilisé en neurochirurgie).

Les étapes de stérilisation sont respectées. Le temps de réalisation de la cranioplastie est court (une dizaine de minutes pour le volet digital, quelques heures pour l'impression ; façonnage instantané de la prothèse avec le ciment osseux lors de l'opération neurochirurgicale) avec un cout global abordable.

A- Domaine d'étude :

Le travail entrepris par cette thèse aborde l'application de l'anatomie virtuelle dans la chirurgie des défauts crâniens. Cette nouvelle discipline émergente est de plus en plus convoitée dans le domaine médical. Elle présente des outils précieux facilitant la

communication et la coopération entre les anatomistes, les cliniciens, les radiologues, les chirurgiens ainsi que les informaticiens. L'approche décrit une technique personnalisée alliant l'exploitation des données radiologiques du patient, la conception numérique de prothèses crâniennes sur mesure par des logiciels disponibles et leur réalisation par la technologie de l'impression 3D.

B- Problématique :

Les défauts crâniens, qu'ils soient d'origine congénitale, résultant de traumatismes ou de procédures chirurgicales, représentent une problématique complexe et multidimensionnelle avec des implications médicales, esthétiques et psychologiques importantes.

L'impact physique des défauts crâniens est de compromettre la fonctionnalité du crâne en altérant la protection du cerveau et en perturbant les mécanismes physiologiques normaux. Des conséquences telles que des troubles de la circulation cérébrale et des complications neurologiques peuvent découler de ces défauts, affectant la qualité de vie des individus.

L'impact esthétique se voit dans l'altération de l'apparence de l'individu affectant la symétrie faciale et la morphologie du crâne. Ces altérations peuvent avoir un impact négatif sur l'estime de soi et influencer leur perception de la beauté et de la normalité.

L'impact psychosocial est la conséquence directe de l'impact esthétique. Les patients peuvent faire face à des problèmes d'acceptation de soi, de stigmatisation sociale et d'isolement. Ces défis psychosociaux peuvent contribuer au développement de troubles anxieux et dépressifs.

Le traitement des défauts crâniens nécessite une approche personnalisée. Il repose sur la réalisation d'une prothèse sur mesure. Façonner cette dernière par les techniques traditionnelles en utilisant les matériaux malléables comme le ciment osseux conduit souvent à des résultats imparfaits (manque de précision, risque accru de complications, esthétique pas garantie). La commander et la fabriquer par des sociétés spécialisées la rend plus onéreuse avec des délais de livraison longs.

L'objectif principal de cette thèse est d'établir une méthode simple et économique, permettant la réalisation de cranioplasties personnalisées de façon rapide et optimale. Ces dernières seront mises en place chez les malades souffrant de défauts crâniens.

C- Matériels et Méthodes :

Pour mener à bonne fin notre étude, il est nécessaire de déterminer un échantillon assez significatif de patients souffrant de défauts crâniens de manière à mettre en place des prothèses crâniennes au niveau du service de neurochirurgie d'Annaba. Les cranioplasties seront conçues par une méthode innovante qui consiste en la réalisation d'un moule modelé numériquement et imprimé 3D. Ce moule servira comme support sur lequel est appliqué le ciment osseux pour façonner la prothèse crânienne.

Le principe de la création du moule repose sur l'exploitation des données DICOM des scanners des patients, la conception numérique du moule par la segmentation et des opérations de traitement d'images simples à l'aide de logiciels dédiés. Le moule physique final sera synthétisé par impression 3D. En per opératoire, la cranioplastie est faite à l'aide du moule stérilisé préalablement et appliquée chirurgicalement sur le patient.

D- Avantages attendus :

Les patients souffrants de défauts crâniens de diverses causes, doivent bénéficier de la mise en place d'une cranioplastie fabriquée sur mesure. La symétrie crânienne est essentielle pour la conception numérique du moule. Pour cela, des paramètres morphométriques en rapport avec la symétrie crânienne (index de symétrie) seront analysés.

La réalisation de la prothèse par l'impression 3D garantit une précision et un résultat esthétique satisfaisant. Cette méthode permettra de réduire le temps opératoire et le risque de complication post-opératoire.

E- Structure de La thèse :

La thèse est organisée comme suit :

Une 1^{ère} partie abordant l'état de l'art en rapport avec la question commençant par :

Le 1^{er} chapitre qui traite l'anatomie virtuelle et l'impression 3D et leur contribution en médecine et chirurgie. Le concept de segmentation, essentiel dans le traitement des images radiologiques pour l'extraction de modèles 3D. Cette étape constitue l'élément fondamental de conception de toute prothèse.

Le 2^{ème} chapitre décrit l'impression 3D, son historique, ses applications médicales, les différents aspects de cette technologie ainsi que sa précieuse contribution durant la période COVID

Le chapitre 3 analyse l'anatomie morphométrique crânienne et les points crâniens anthropométriques, la symétrie crânienne et son évaluation, les causes de l'asymétrie crânienne et son impact sur le malade. Les défauts crâniens seront traités ensuite en abordant la régénération osseuse et sa différence entre les adultes et les enfants. Les causes et les

conséquences des défauts crâniens seront analysées en mettant lumière sur le « trephined syndrome » et l'impact psycho-social sur les malades porteur de déformations crâniennes.

Le chapitre 4 expose les cranioplasties en analysant leur histoire, les insuffisances de leur conception avant l'avènement de l'impression 3D, les types de cranioplasties ainsi que les matériaux utilisés dans leur réalisation seront détaillés. Le ciment osseux sera développé en le comparant avec le titane, en exposant ses avantages et ses inconvénients. Les techniques de fixation des prothèses crâniennes seront abordées ainsi que les complications possibles immédiates et tardives.

Une 2^{ème} partie traite la contribution pratique au sujet de la conception des cranioplasties,

Le chapitre 5 aborde le matériel physique et numérique utilisés dans notre travail pour la conception du moule utile pour la réalisation de la prothèse crânienne. Le sous-chapitre méthodes décrit le processus innovant de cette technique en exposant les étapes de la synthèse de la cranioplastie partant de l'exploitation des données radiologiques des patients jusqu'à sa mise en place chirurgicalement. L'appréciation des paramètres géométriques des crânes des patients comme le calcul des surfaces des défauts crâniens, des surfaces des crânes ainsi que l'index de symétrie seront détaillés.

Le chapitre 6 rapporte les résultats de notre travail commençant par les paramètres démographiques âge et sexe de nos patients, les paramètres des défauts crâniens d'un point de vue lésion causale et localisation. Les paramètres géométriques et radiologiques des crânes des patients seront exposés en l'occurrence les surfaces et l'index de symétrie. Les caractéristiques du moule seront développées sur la manière de conception et les paramètres d'impression 3D. Les paramètres chirurgicaux seront décrits comme le délai de

l'intervention, l'approche chirurgicale, la méthode de fixation de la prothèse et les complications survenues.

Le chapitre 7 aborde une discussion et une synthèse de nos résultats.

Et pour conclure, le chapitre conclusion et perspectives résume la thèse en proposant des perspectives futures pour l'application de l'impression 3D médicale.

CHAPITRE 1 : ANATOMIE VIRTUELLE & IMPRESSION 3D :

L'intégration de l'anatomie virtuelle et de l'impression 3D a révolutionné la manière dont les professionnels de la santé, les chercheurs et les éducateurs abordent l'étude du corps humain. Cette convergence de technologies avancées offre des opportunités uniques pour la visualisation, l'analyse et l'éducation médicale. ([Ganguli 2018], [Bisht 2019])

1-1 Technologie de l'anatomie virtuelle

L'avènement de l'informatique médicale a ouvert la voie à l'anatomie virtuelle qui consiste en la création de modèles numériques tridimensionnels du corps humain à partir de données médicales telles que les scanners CT ou les IRM. Ces modèles permettent aux professionnels de la santé de visualiser les structures anatomiques avec une grande précision et de planifier des interventions chirurgicales de manière plus précise et personnalisée. ([Aimar2019])

L'impression 3D a introduit une dimension tangible à l'anatomie virtuelle. Les modèles anatomiques 3D imprimés offrent une représentation physique précise des structures internes du corps. Cela présente des avantages majeurs dans la formation médicale, la planification chirurgicale et la communication avec les patients. ([Hoyek 2014])

Lorsqu'elles sont combinées, l'anatomie virtuelle et l'impression 3D ouvrent de nouvelles possibilités dans divers domaines de la médecine :

- **Planification chirurgicale avancée :** Les chirurgiens peuvent utiliser les modèles anatomiques virtuels pour simuler des interventions chirurgicales complexes avant de les effectuer sur des patients réels. En utilisant ces modèles comme guides, ils peuvent anticiper les défis anatomiques spécifiques à chaque

cas et développer des stratégies chirurgicales plus précises. ([Badash, 2016], [Vyas, 2022])

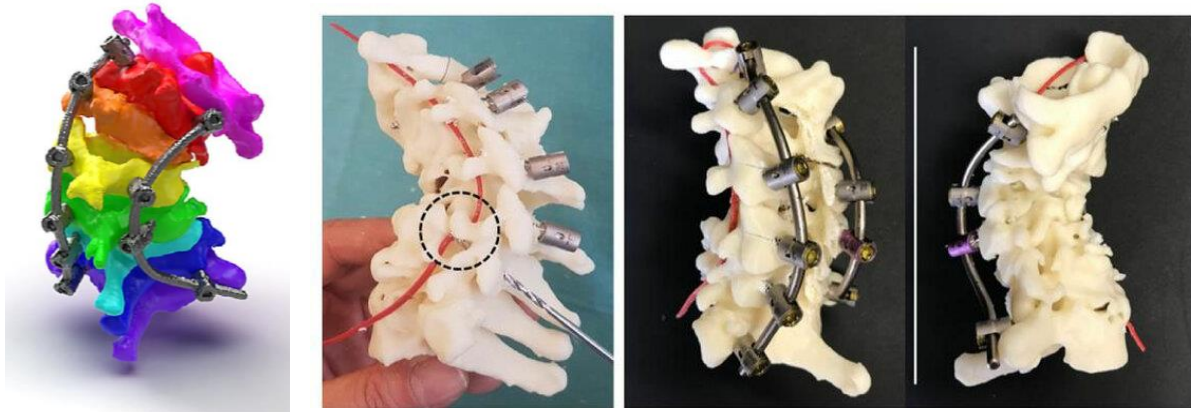


Figure 1.1 : planification pré-opératoire d'une déformation rachidienne avec modèles imprimés en 3D. ([Belvedere2022])

- **Éducation Médicale** : Les modèles anatomiques imprimés en 3D sont devenus des outils éducatifs inestimables. Les étudiants en médecine peuvent manipuler des répliques physiques pour mieux comprendre la complexité du corps humain. Des institutions éducatives adoptent ces technologies pour enrichir l'apprentissage. ([Thomas 2016], [Vandenbossche2022], [Pettersson 2023], [Chytas, 2024],)

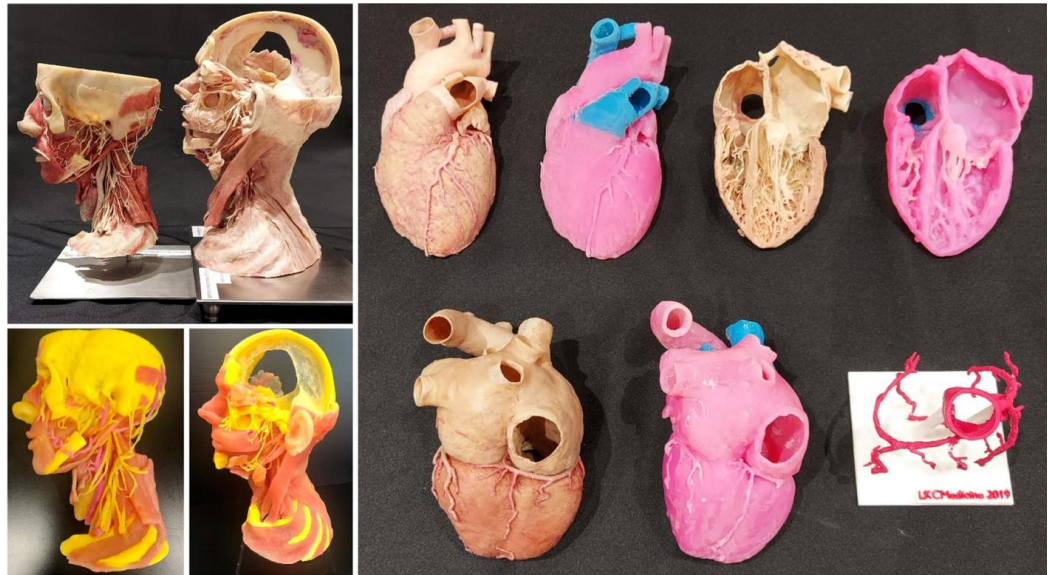


Figure 1.2 : Modèles imprimés en 3D d'anatomie humaine destinés aux étudiants de médecine. ([Radzi2022])

- **Recherche et Développement** : L'impression 3D facilite la création de prototypes de dispositifs médicaux personnalisés en fonction de l'anatomie unique de chaque patient (les prothèses). Cela ouvre la voie à des traitements plus personnalisés. ([Aimar2019], [Velásquez-García 2021])

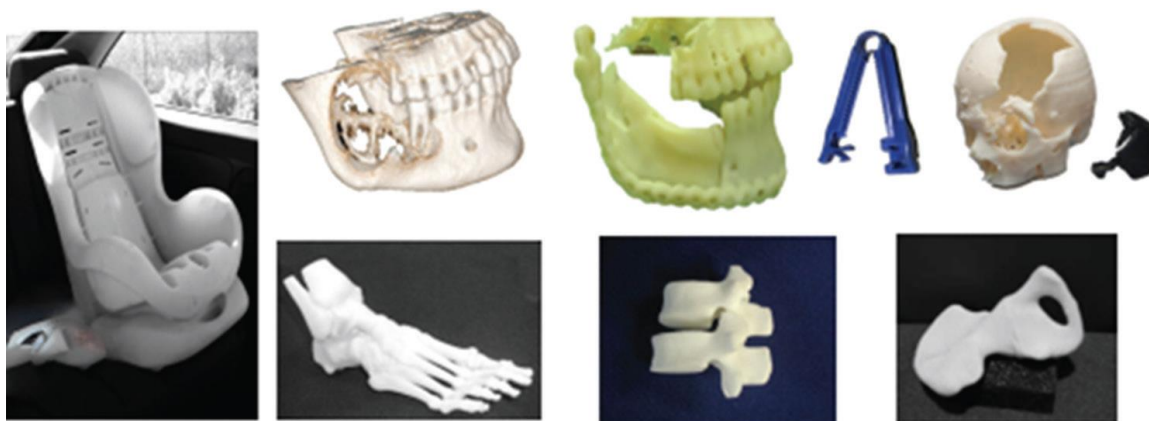


Figure 1.3 : Applications de l'impression 3D dans la recherche médicale. ([Sharma2019])

- **Simulation Médicale** : Les modèles anatomiques imprimés en 3D sont utilisés dans des simulateurs médicaux pour des scénarios d'entraînement réalistes comme la réalité virtuelle (VR) ou la réalité augmentée (AR), offrant une expérience immersive qui améliore la compréhension et l'interaction. Cela prépare les professionnels de la santé pour des situations cliniques variées. ([Chen 2018])



Figure 1.4 : La réalité virtuelle dans la formation médicale. (Laerdal)

- **Le "digital twin" (jumeau numérique)** : est une représentation virtuelle d'un patient, d'un organe ou d'un processus médical spécifique en utilisant les données cliniques, génomiques, radiologiques du malade. Ce concept permet une personnalisation du traitement, la prévention, la gestion des maladies chroniques et la recherche médicale. ([Boulos 2021], [Meijer 2023], [Laubenbacher 2024])

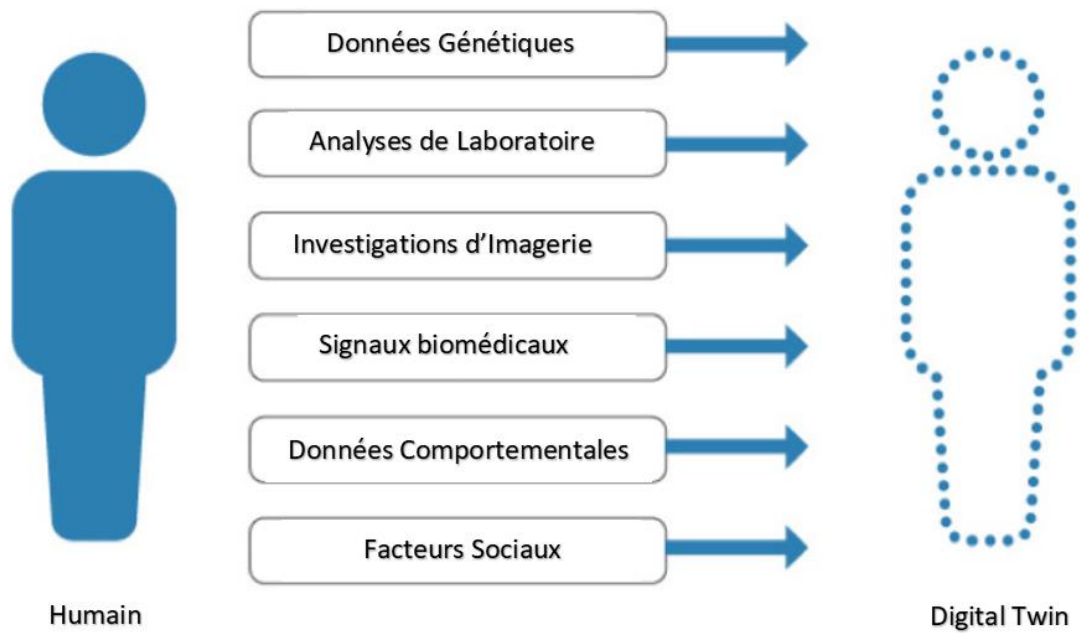


Figure 1.5 : Représentation schématique du concept du jumeau numérique « digital twin ».
(MathWorks)

L'intégration de l'anatomie virtuelle et de l'impression 3D marque une avancée significative dans la manière dont nous comprenons, enseignons et appliquons la connaissance anatomique. Cette synergie offre des perspectives prometteuses pour l'éducation médicale, la pratique clinique et la recherche.

1-2 Segmentation d'Images Radiologiques :

La segmentation d'images radiologiques repose sur la délimitation des régions d'intérêt dans les images radiologiques (TDM ou IRM) pour extraire des informations significatives. Elle vise à distinguer des zones de tissus par l'analyse de contrastes, des textures et des formes présentes dans les images.

La segmentation 2D offre une délimitation des structures par seuillage (seuils de gris) dans une seule coupe en se basant sur des pixels (unité plane). La segmentation 3D permet la reconstruction de structures en 3D à partir d'une série de coupes, l'unité fondamentale étant le voxel (unité spatiale).

Plusieurs méthodes de segmentations sont offertes par les logiciels de traitement d'images radiologiques :

- Segmentations par regroupement de pixels/voxels : se basant sur leur similarité (intensité, texture ou couleur).
- Segmentation par contours actifs : technique basée sur la déformation d'une courbe fermée pour détecter les limites d'une structure sur une image 2D ou une série d'images.
- Segmentation par réseau de neurones profonds : c'est une méthode avancée de segmentation (utilisation des techniques d'intelligence artificielle) qui utilise des algorithmes d'apprentissage (entraînement à reconnaître des schémas complexes sur les images médicales).

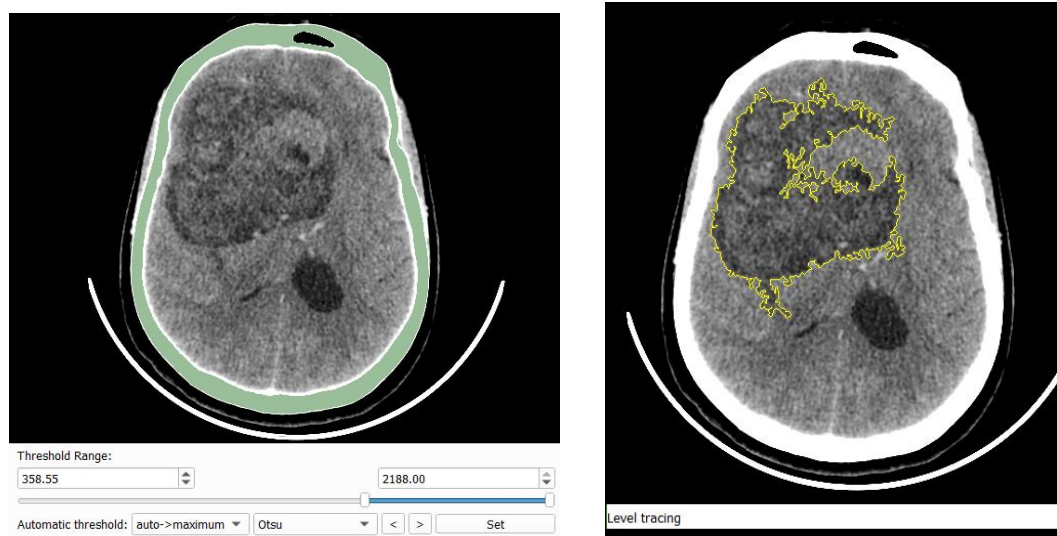


Figure 1.6 : La segmentation par regroupement de pixels vs par contour actif.

Le rendu et la visualisation 3D est la représentation spatiale des structures anatomiques à partir des données segmentées. Parmi les techniques de visualisation on a :

- La projection de volume (volume rendering)
- La méthode de rendu de surface. (surface rendering)

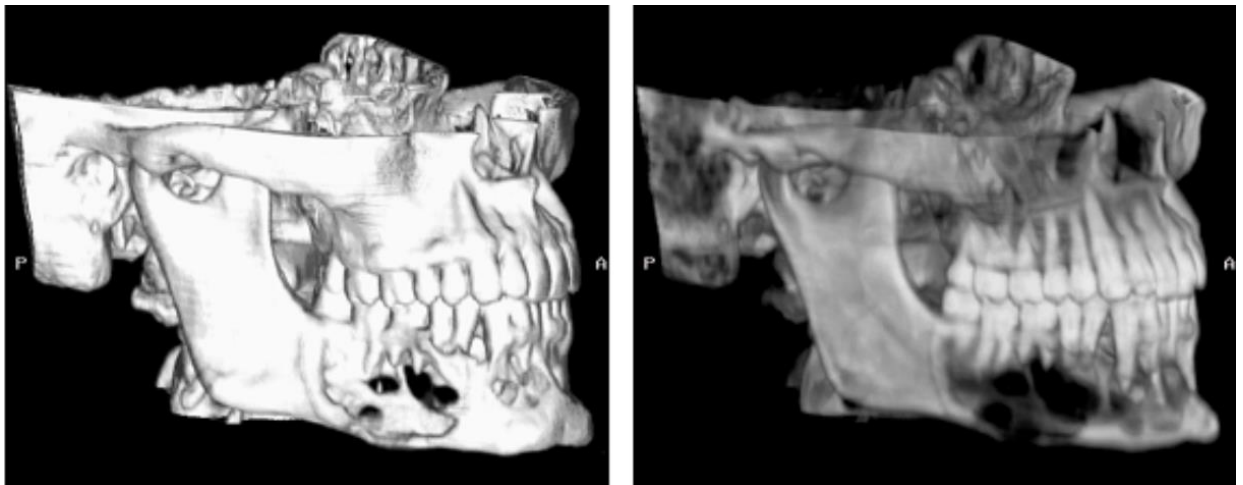


Figure 1.7 : Surface Rendering à gauche vs Volume Rendering à droite. ([Cavalcanti2002])

La confection de prothèse est fondée sur l'exploitation de modèles 3D générés par la segmentation des images radiologiques.

CHAPITRE 2 : IMPRESSION 3D

2-1 Introduction :

L'impression 3D permet la création de composants physiques à partir de modèles virtuels tridimensionnels numériques. Cette construction se réalise couche par couche jusqu'à l'obtention d'un objet complet (fabrication additive : ***additive manufacturing***). Par opposition à la fabrication soustractive (***subtractive manufacturing***) qui consiste en un façonnage d'un objet physique à partir d'un bloc par sculpture automatique (en enlevant l'excédent de matière).

L'avènement de l'impression 3D est considéré comme une révolution marquante de la technologie numérique. Son application s'étend de la simple production de jouets, aux pièces les plus complexes des machines et des engins de transport. Cette technologie n'a pas épargné le domaine médical ; elle permet la reproduction de parties anatomiques de façon personnalisée (implants et prothèses).

Le processus de l'impression 3D repose sur une triade :

- Le logiciel de conception
- L'imprimante 3D
- Le matériau d'impression (le consommable)

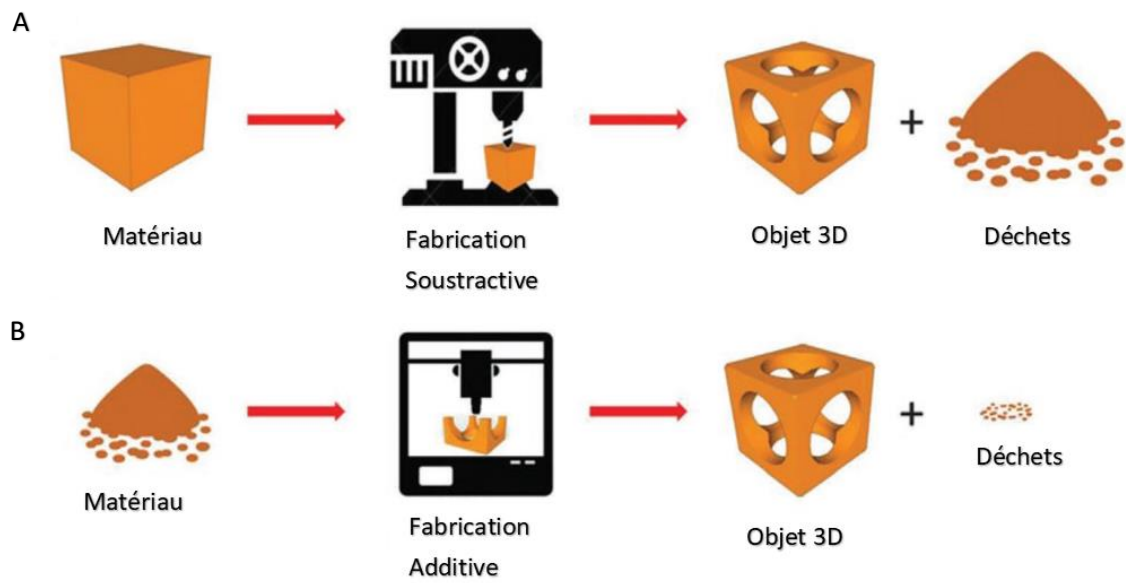


Figure 2.1 : différence entre la fabrication soustractive (A) et fabrication additive (B). ([Chen2020])

2-2 Histoire de l'impression 3D :

La technologie de l'impression 3D remonte à quelques décennies. La chirurgie et la médecine ont joué un rôle important à chaque étape de son évolution. On distingue les étapes suivantes de sa progression :

- 1970-1980 : réalisation automatique de modèles simples (notion de prototypage)
- 1980-1990 : l'introduction de la fabrication additive (***additive manufacturing***) et apparition des premières imprimantes 3D ainsi que le développement du fichier STL (stereolithography) en 1986 qui restera le type de fichier le plus utilisé en impression 3D.
- 1990-2005 : le développement de l'informatique a contribué à rendre l'impression 3D plus évoluée (traitement de données plus rapide, capacité de stockage plus importante, logiciels de conception numérique plus performant.
- 2005-2012 : les logiciels gratuits (open-source) et la prise de conscience de l'utilité de la technologie de l'impression 3D ont contribué à son adoption par les institutions académiques et de recherche. Le matériel informatique ainsi que les programmes sont devenus de plus en plus performants.
- 2012-présent : l'explosion de la production des imprimantes à des coûts abordables a permis son acquisition non seulement par les institutions industrielles, académiques mais aussi par le large public. Cette phase a connu l'avènement de l'imprimante 3D seconde génération ou le matériau d'impression ne se limite plus à des matières inertes mais le passage vers l'impression de cellules viables.

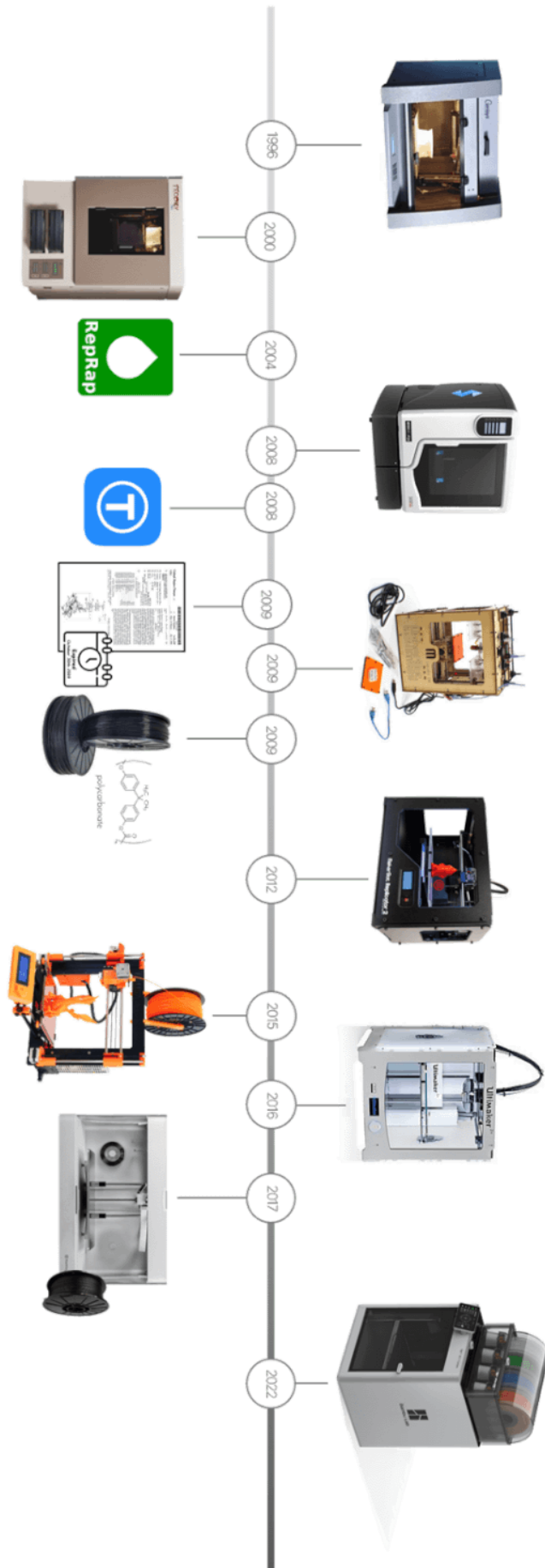


Figure 2.2 : Evolution de l'imprimante 3D. (InnovationM2)

2-3 L'impression 3D médicale :

L'impression 3D a émergé comme une technologie transformative dans le domaine médical, offrant des possibilités innovantes et personnalisées dans divers domaines, de la planification chirurgicale à la fabrication de prothèses. Cette technologie a considérablement évolué, transformant la manière dont les professionnels de la santé envisagent le traitement des patients. ([Awad2018], [Willson2022])

2-3.1 Applications Actuelles de l'Impression 3D Médicale

- **Modèles Anatomiques** : L'impression 3D est utilisée pour créer des modèles anatomiques précis à partir des images médicales telles que les scanners CT ou les IRM. Ces modèles sont utilisés à des fins éducatives, pour la formation des étudiants en médecine et la communication avec les patients.



Figure 2.3 : Modèle anatomique réalisé avec une imprimante 3D couleur. (Monash University)

- **Chirurgie Préopératoire** : L'impression 3D facilite la planification chirurgicale en permettant aux chirurgiens de créer des répliques physiques des organes spécifiques d'un patient. Cela améliore la compréhension des structures anatomiques et aide à anticiper les défis potentiels pendant l'intervention.



Figure 2.4 : Entraînement sur la chirurgie des anévrismes à l'aide d'une maquette imprimée en 3D. ([Nagassa2019])

- **Prothèses Personnalisées** : La fabrication de prothèses sur mesure est l'une des applications les plus notables. L'impression 3D permet de créer des prothèses adaptées à la morphologie unique de chaque patient, améliorant ainsi le confort et l'efficacité fonctionnelle.



Figure 2.5 : prothèse personnalisée en monocoque conçue par impression 3D. ([Nicoloso2021])

- **Implants Médicaux** : Des implants personnalisés, tels que des plaques et des vis, peuvent être fabriqués par impression 3D pour s'adapter parfaitement à la structure osseuse d'un patient. Cela réduit les risques de rejet ou d'incompatibilité.



Figure 2.6 : Des implants orthopédiques réalisés à l'aide de l'impression 3D. (All3DP)

2-3.2 Avantages de l'Impression 3D Médicale

- **Personnalisation** : L'un des avantages clés est la capacité à personnaliser les dispositifs médicaux en fonction des besoins spécifiques de chaque patient. Cela améliore l'efficacité des traitements et réduit les risques de complications.

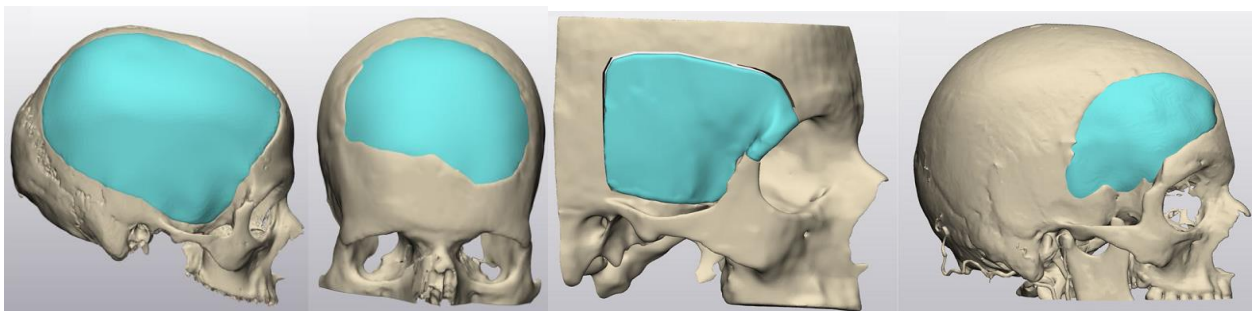


Figure 2.7 : Prothèses crâniennes personnalisées imprimées en 3D. ([Ebel2023])

- **Réduction des Coûts** : L'impression 3D peut contribuer à la réduction des coûts dans les soins de santé en permettant la fabrication d'équipements et de dispositifs médicaux sur site, éliminant ainsi certains frais de production et de logistique.



Figure 2.8 : Equipements médicaux conçus par impression 3D. ([Aydin2021])

- **Gain de Temps** : La fabrication rapide de dispositifs médicaux par impression 3D permet des délais de production significativement plus courts par rapport aux méthodes traditionnelles. Cela peut être crucial dans des situations d'urgence.

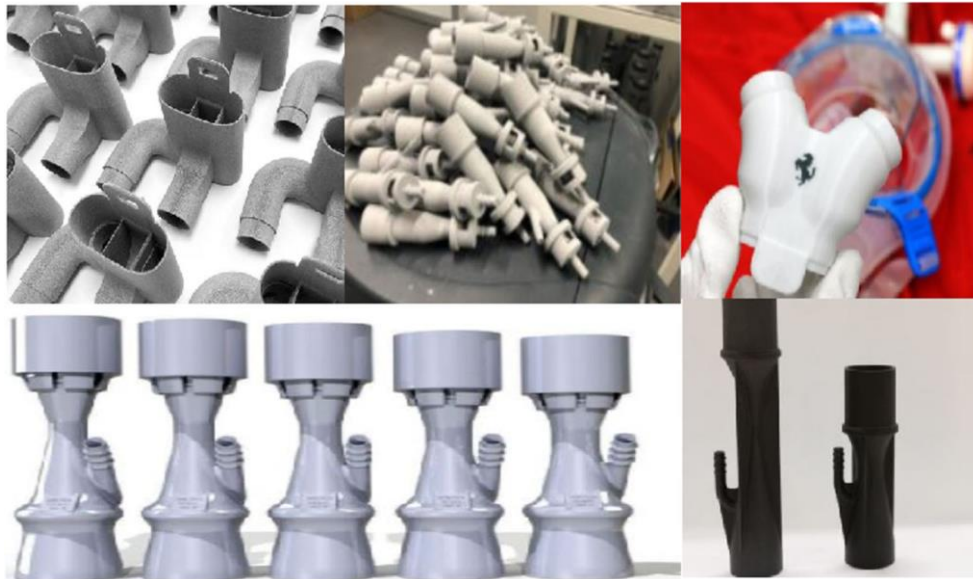


Figure 2.9 : Fabrication rapide et en quantité de dispositifs médicaux conçus par impression 3D. ([Aydin2021])

2-3.3 Perspectives Futures

- **Tissus et Organes Imprimés** : La recherche progresse dans la création d'organes et de tissus imprimés en 3D pour les transplantations. Bien que cela soit encore au stade expérimental, les avancées dans ce domaine pourraient révolutionner la transplantation d'organes. ([Dey2020], [Xin Su 2021], [Panja2022])

- **Médicaments Imprimés** : La possibilité d'imprimer des médicaments personnalisés, adaptés à la génétique et aux besoins spécifiques de chaque patient, est une perspective passionnante qui pourrait améliorer l'efficacité des traitements. ([Awad2018], [Tong2024])

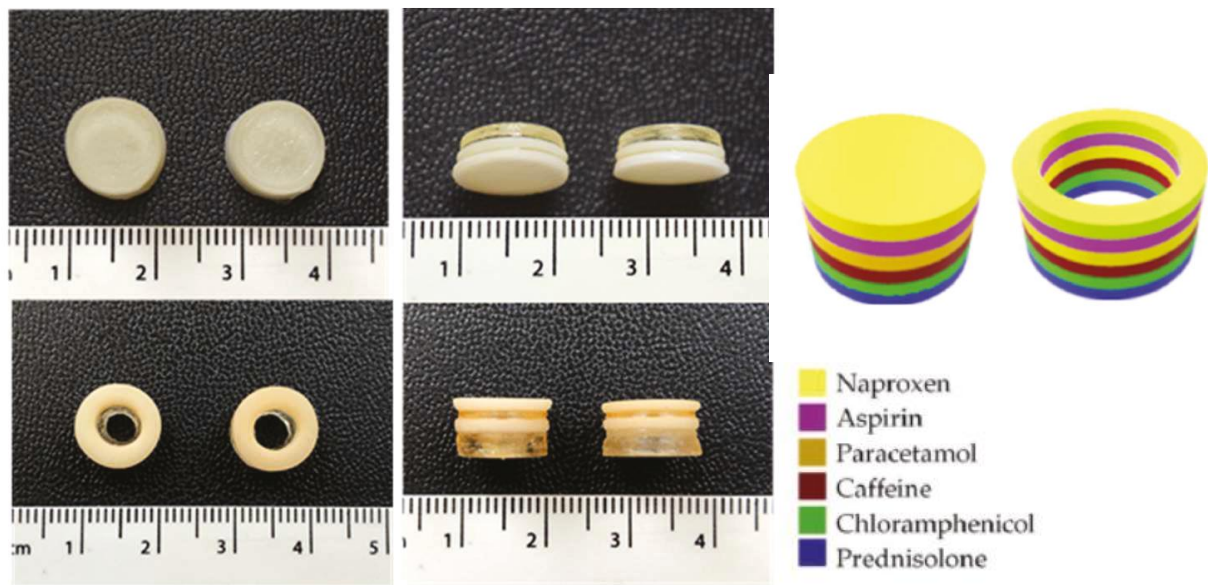


Figure 2.10 : Un comprimé comportant plusieurs médicaments imprimé en 3D. ([Robles-Martinez2019])

- **Collaboration Internationale** : L'impression 3D médicale pourrait permettre une collaboration mondiale dans la fabrication d'équipements médicaux, aidant ainsi les régions du monde ayant des ressources limitées à accéder à des solutions médicales avancées. [Nguyen2021]



Figure 2.11 : Un programme de réhabilitation par la production de prothèses pour les amputés à l'aide d'imprimantes 3D. (UNDP The Gambia, 2022)

2-4 Les types d'impression 3D :

L'impression 3D englobe divers procédés permettant de créer des objets tridimensionnels en ajoutant des matériaux couche par couche. Ces procédés varient en fonction des technologies, des matériaux utilisés et des applications visées. Certains des principaux types d'impression 3D sont exposés dans ce travail en mettant l'accent sur leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs applications spécifiques :

2-4.1 Fusion et Solidification par Laser (SLM/SLS) :

- **Principe de Fonctionnement** : Ces techniques utilisent un laser pour fusionner ou solidifier des poudres métalliques ou plastiques, couche par couche, formant ainsi l'objet final.
- **Avantages** : Elles offrent une grande précision et sont particulièrement adaptées à la fabrication de pièces complexes, métalliques ou en plastique.
- **Applications** : Utilisées dans l'industrie aéronautique pour la fabrication de composants légers et résistants, ainsi que dans la production de prototypes de haute précision.

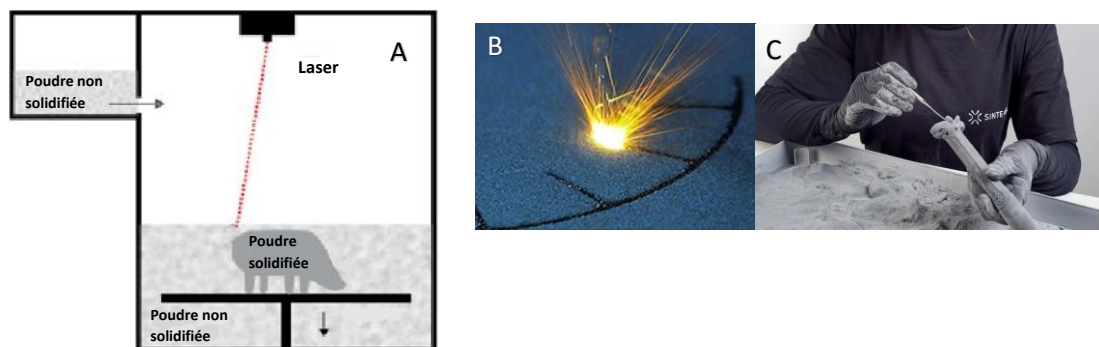


Figure 2.12 : impression 3D par Fusion et solidification.

A : Principe de fonctionnement ([Carew2020])

B : processus de fusion avec Laser (GE Additive)

C : dépoudrage et nettoyage de l'objet final (Sinterit)

2-4.2 Modélisation par Dépôt de Fil Fondu (FDM/FFF) :

- **Principe de Fonctionnement** : Un filament plastique est chauffé et extrudé à travers une buse, créant des couches successives pour construire l'objet.
- **Avantages** : C'est une méthode abordable et largement utilisée, adaptée à une variété d'applications. Les imprimantes 3D FDM sont largement disponibles sur le marché grand public.
- **Applications** : De la fabrication de prototypes rapides à la création de pièces fonctionnelles, en passant par la réalisation de maquettes.



Figure 2.13 : impression 3D par Dépôt de fil fondu. A : Principe de fonctionnement ([Carew2020]). B : des modèles (UltiMaker)

2-4.3 Stéréolithographie (SLA) :

- **Principe de Fonctionnement** : Utilise une résine photosensible liquide qui est durcie couche par couche à l'aide d'un laser UV.
- **Avantages** : Offre une excellente résolution et convient à la fabrication de pièces détaillées et complexes.
- **Applications** : Principalement utilisée dans la création de prototypes de haute précision, de modèles dentaires et d'articles de joaillerie.

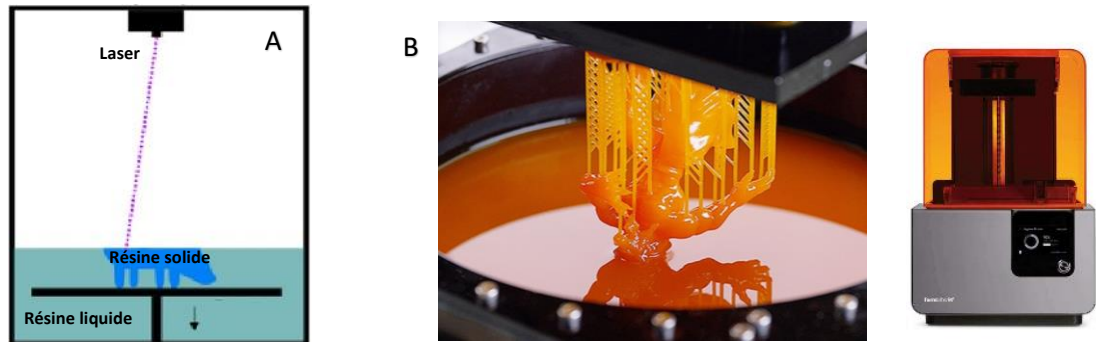


Figure 2.14 : impression 3D par Stéréolithographie. A : Principe de fonctionnement ([Carew2020]). B : Exemple (3Dnatives)

2-4.4 Dépôt de Matériau par Liage et Extrusion (MELD)

- **Principe de Fonctionnement** : Fusionne des couches de poudre métallique à l'aide d'un marteau ultrasonique.
- **Avantages** : Adapté à la fabrication d'objets en métal de grande taille, avec des avantages tels que l'absence de fissures et la possibilité de réparer les défauts pendant l'impression.
- **Applications** : Utilisé dans l'industrie pour créer des pièces métalliques massives, des pièces de rechange et des composants structurels.

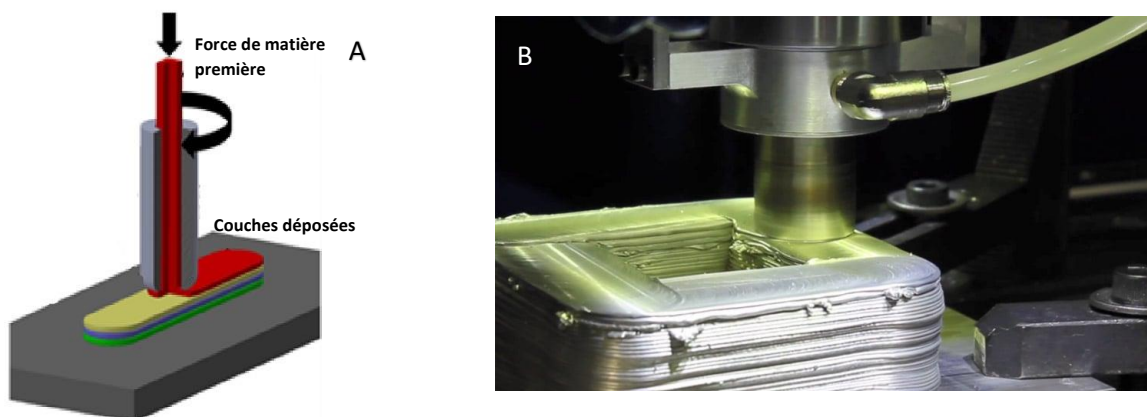


Figure 2.15 : impression 3D par Dépôt de Matériau par Liage et Extrusion.
A : Principe de fonctionnement (MELD Manufacturing)
B : Exemple (3Dnatives)

2-4.5 Jet d'Encre (PolyJet et MultiJet) :

- **Principe de Fonctionnement** : Utilise une tête d'impression similaire à celle d'une imprimante jet d'encre, projetant des gouttelettes de matériau photosensible qui sont ensuite durcies.
- **Avantages** : Permet la création de modèles multimatériaux et multicolores avec une grande précision.
- **Applications** : Couramment utilisé pour la fabrication de prototypes dans l'industrie de la conception et de l'ingénierie.

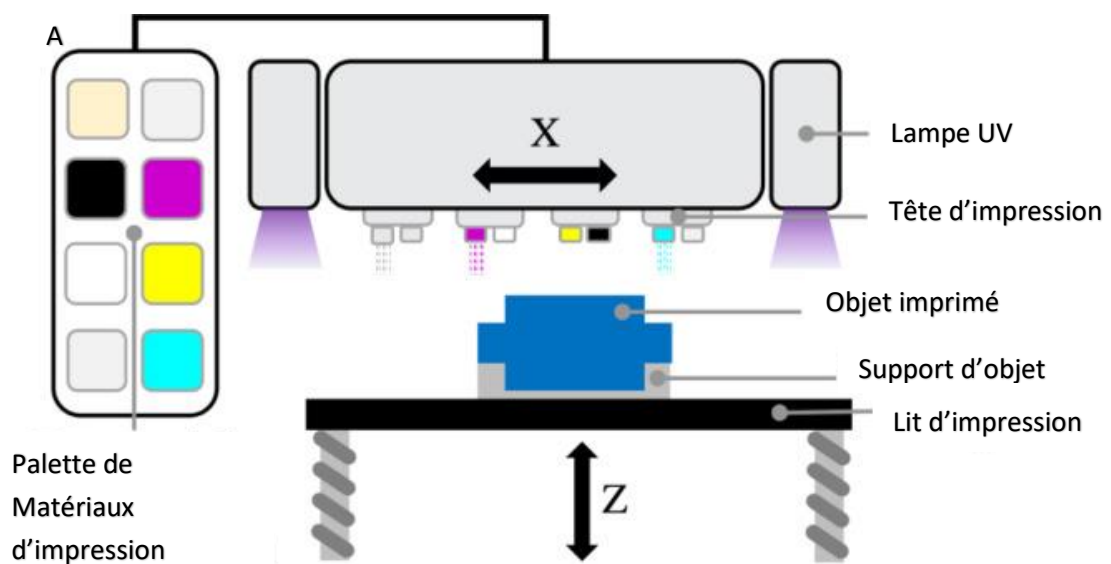


Figure 2.16 : impression 3D par Jet d'Encre.
A : Principe de fonctionnement ([Wei2022])
B : Exemples (All3DP)

2-5 Impression 3D durant le COVID :

L'utilisation de l'impression 3D a joué un rôle significatif pendant la pandémie de COVID-19, offrant des solutions rapides et flexibles pour répondre aux défis rencontrés dans le domaine de la santé ([Ishack 2021], [Abbas2021], [Kumar 2021]). Voici quelques-unes des façons dont l'impression 3D a été utilisée pendant la pandémie :

2-5.1 Fabrication de Matériel Médical Critique :

- **Masques et Équipements de Protection :** Certains projets ont utilisé l'impression 3D pour produire des visières, des supports de masques faciaux et d'autres équipements de protection individuelle (EPI) lorsque les approvisionnements traditionnels étaient limités.

- **Composants de Respirateurs :** Certains composants de respirateurs, tels que des valves, ont été imprimés en 3D pour répondre à la demande accrue d'appareils respiratoires.

2-5.2 Prototypage Rapide de Dispositifs Médicaux :

Les imprimantes 3D ont permis le prototypage rapide de dispositifs médicaux, tels que des supports pour tester de nouvelles solutions ou des adaptateurs pour mieux traiter les patients atteints de COVID-19.

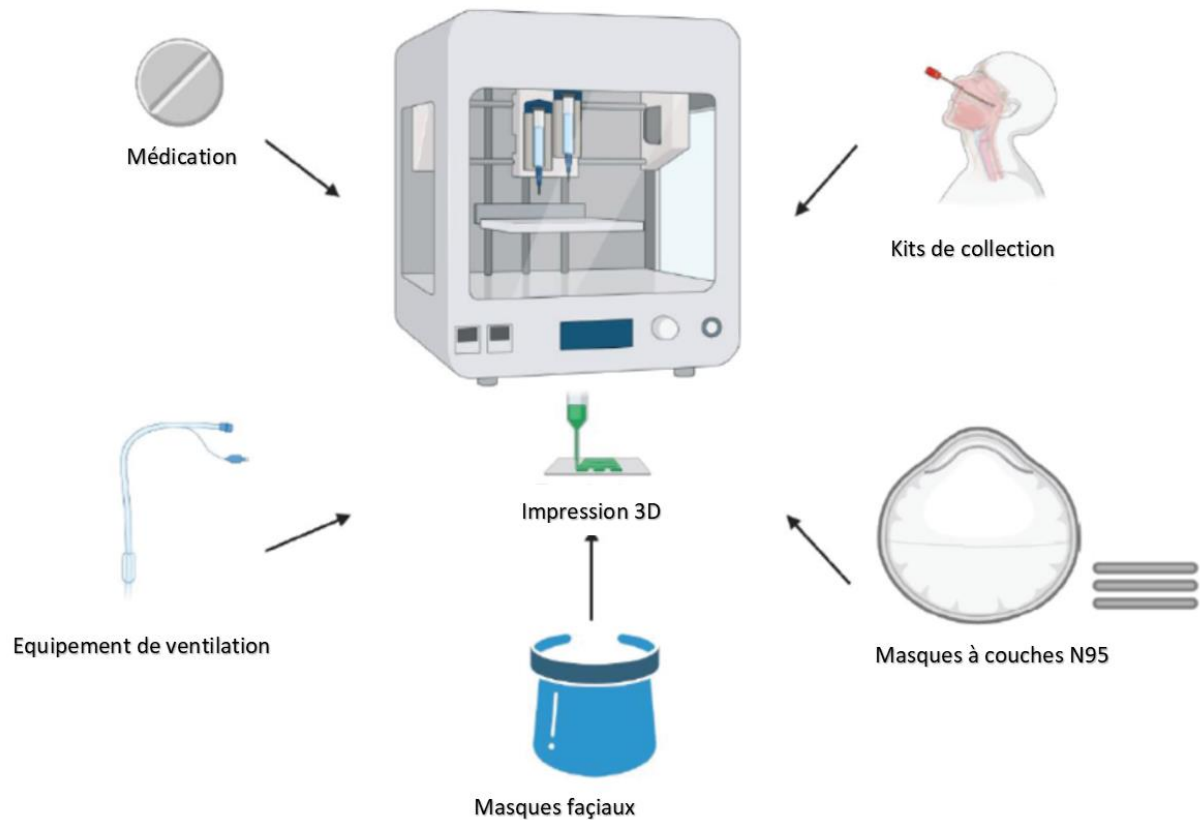


Figure 2.17 : Rôle de l'impression 3D durant la pandémie Covid19 ([Ishack 2021]).

2-6 Conclusion :

L'impression 3D, une technologie récente, s'est imposée dans de nombreux secteurs comme un outil de fabrication innovant et révolutionnaire. Ce système additive modifie rapidement la manière dont les objets sont conçus et produits ; en utilisant un modèle informatique en 3D, il est possible de créer des objets personnalisés en les fabriquant couche par couche de manière automatisée. Ainsi, cette technologie permet de faire le lien entre le monde de l'imagination et la réalité. Bien que plusieurs technologies d'impression 3D soient disponibles commercialement, la modélisation par dépôt de fil fondu (FDM) est actuellement la technique la plus répandue et utilisée ([Awad2018]).

Dans le domaine médical et en raison de la simplicité et la diversité de cette technologie, l'impression 3D a marqué positivement le domaine de l'enseignement et la simulation médicale et l'industrie pharmaceutique et prothétique. Elle a avancé la santé d'un grand pas vers la médecine personnalisée. L'impression 3D a joué un rôle crucial dans la gestion de la pandémie Covid19 par la fabrication et le prototypage de matériel de protection et de dépistage de quantité industriel à moindre coût. ([Tack2016],[Manero 2020])

Cette technologie ouvre la voie vers des domaines plus complexes de la médecine comme la reproduction d'organes par la bio-impression et la médication personnalisée.([Dey2020], [Panja2022], [Tong2024])

CHAPITRE 3 : LE CRANE & LES DEFAUTS OSSEUX CRANIENS

3-1 Le Crâne :

Le crâne situé au niveau du sommet du squelette axial, se divise en deux parties : le neurocrâne qui loge l'encéphale et le viscérocrâne occupé par les viscères de la face. Il assure plusieurs rôles :

- Un casque protecteur pour le cerveau, les vaisseaux, les nerfs et les viscères de la tête (les organes des sens)
- Responsable de la forme du visage donc de l'identité de la personne (archéologie, anthropologie, criminalistique, ...)
- Résonance par les cavités creusées au niveau de ses os (les sinus aériens)
- Un site d'attache aux muscles et aux structures tendineuses de la tête et du cou.

La protection cérébrale ne se limite pas seulement aux traumatismes crâniens mais aussi aux forces exercées par la pression atmosphérique. Cette dernière est estimée à 760 mmHg au niveau de la mer. Sans ce casque protecteur, le flux sanguin cérébral, l'hémodynamique de LCR (liquide cérébro-rachidien) et le métabolisme du cerveau seront considérablement affectés.

3-2 La symétrie Crânienne :

La nature tend à dupliquer des motifs corporels pour former l'anatomie d'un organisme. Cette répétition de l'élément de motif se fait par réflexion (symétrie axiale : effet miroir ex : moitié droite et gauche) ou rotation (symétrie radiaire : les structures rayonnent autour d'un point central ex : oursin, étoile de mer, pétales d'une fleur,...).

Le squelette de la tête humaine répond à la symétrie axiale. Les os impairs occupent la ligne médiane avec des formes symétriques. Les os pairs sont latéraux (Les os de la partie droite sont en image miroir par rapport à ceux de gauche).

Le degré de symétrie de la tête reflète non seulement un aspect normal de l'anatomie crânienne mais il est associé aussi à des attributs comme bonne santé, intelligence (QI), immunocompétence, attractivité et maturité. ([Enquist1994], [Zaidel2005], [Hönn2007])

L'asymétrie crânienne est souvent associée à la susceptibilité à la maladie, à l'agressivité et au comportement anti-social.

3-3 Les points anthropométriques crâniens :

Ce sont des repères anatomiques situés sur le crâne. Ils sont utilisés en anthropométrie pour mesurer et évaluer les caractéristiques du visage et du crâne. Ils sont utilisés dans divers domaines, y compris la chirurgie plastique, l'anthropologie, et la médecine légale, pour évaluer les asymétries et les caractéristiques spécifiques. ([Cotton2005], [Dias2015])

Les mesures entre ces points aident à quantifier la morphologie et à guider les interventions chirurgicales ou les analyses anthropologiques.

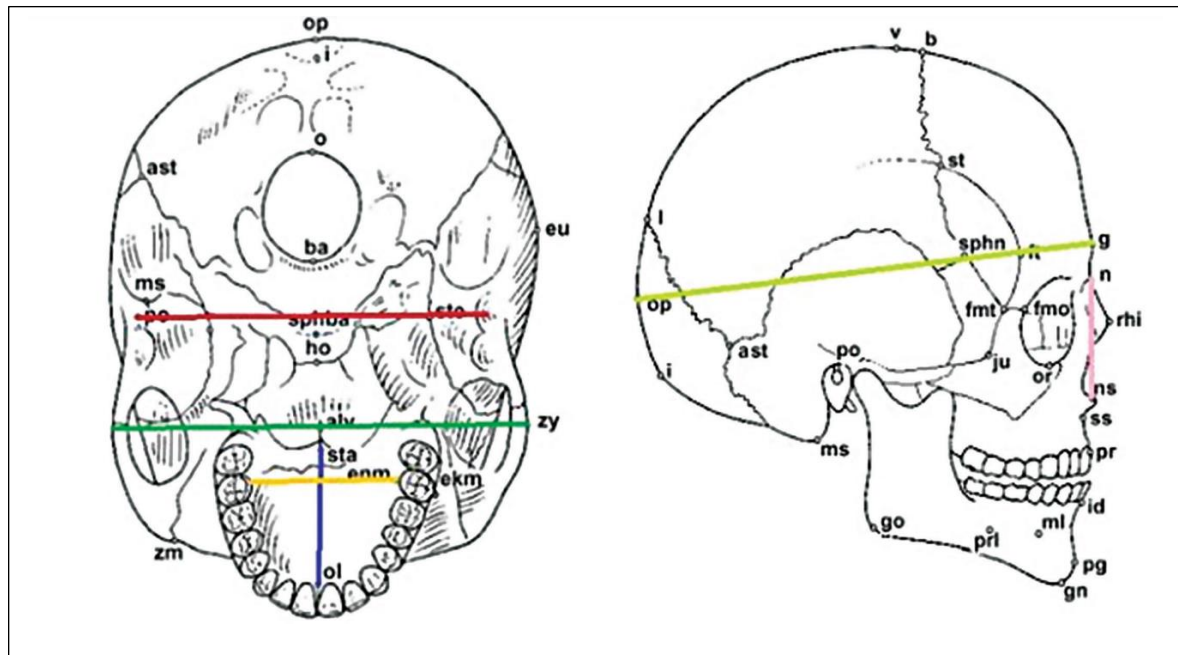


Figure 3.1 : Schéma représentant les différents points crâniens. ([Cordeiro2015])

Tableau 3.1 : les points crâniens latéraux. ([Cordeiro2015])

Astérion (ast)	Point de rencontre des os pariétal, temporal et occipital	Zygomaxillaire (zm)	Point le plus antérieur de la suture zygomaxillaire
Mastoïdale (ms)	Point le plus bas de la mastoïde	Mentale (ml)	Correspond au foramen mentonnier
Eurion (eu)	Le point latéral le plus saillant de la calvaria	Gonion (go)	Le point de l'angle de la mandibule
Porion (po)	Le point le plus haut du méat acoustique externe	Sphenion (sphn)=ptérior	Point de rencontre des os frontal, pariétal temporal et sphénoïdal
Stenion (ste)	Le point le plus bas du processus styloïde	Frontomalaire temporale (fmt)	Intersection de la suture fronto-zygomatique avec la ligne temporale
Endomolaire (enm)	Le point médial à la 2 ^{ème} molaire supérieure	Jugale (ju)	Angle formé par les processus frontal et temporal du zygomatique
Ectomolaire (ekm)	Le point latéral à la 2 ^{ème} molaire supérieure	Orbitale (or)	Le point le plus déclive du bord inférieur de l'orbite
Zygion (zy)	Le point le plus latéral de l'arcade zygomatique	Frontomalaire orbitale (fmo)	Intersection de la suture fronto-zygomatique avec le rebord orbitaire
Stephanion (st)	Intersection ligne temporale supérieure avec la suture coronale		

Tableau 3.2 : les points crâniens médiaux. ([Cordeiro2015])

Opistocranion (op)	Le point le plus postérieur de la calvaria	Pogonion (pg)	Le point le plus proéminent du menton
Opisthion (o)	Le point le plus postérieur du foramen magnum	Infradentale (id)	Le point le plus antéro-supérieur du processus mandibulaire
Basion (ba)	Le point le plus antérieur du foramen magnum	Prosthion (pr)	Le point le plus antérieur du processus alvéolaire du maxillaire
Sphenobasion (sphba)	Le point médian de la suture basilaire	Subspinale (ss)	Le point le plus profond de la concavité subspinale
Hormion (ho)	Le point le plus postérieur du vomer	Rhinion (rhi)	Le point le plus haut de l'ouverture piriforme
Staphylion (sta)	Le point le plus postérieur du palais dur	Nasion (n)	Le point de rencontre des 2 os nasaux avec le frontal
Alveolon (alv)	Intersection de la ligne sagittale avec la ligne qui unit les crêtes alvéolaires	Glabella (g)	Le point le plus antérieur de l'os frontal au-dessus de la suture naso-frontale
Orale (ol)	Le point le plus antérieur du palais dur	Vertex (v)	Le point le plus haut de la calvaria
Gnathion (gn)	Le point le plus déclive de la symphyse mandibulaire	Begma (b)	Le point de rencontre de l'os frontal avec les 2 pariétaux
Lambda (l)	Point de rencontre des 2 os pariétaux avec l'occipital		

3-4 Evaluation de la symétrie crânienne (Indice de Symétrie) :

Les paramètres de mesure de l'asymétrie crânienne chez l'adulte peuvent varier en fonction de la méthode d'évaluation utilisée. Cependant, voici quelques paramètres couramment utilisés dans les études analytiques sur l'asymétrie crânienne :

- **Indice de Symétrie** : Cet indice évalue la symétrie globale en comparant les dimensions et les proportions des structures crâniennes du côté droit et du côté gauche. Un indice de symétrie de **1.0** indiquerait une symétrie parfaite. ([Zonenshayn2004], [Kung2013])
- **Mesures Linéaires** : Des mesures spécifiques des distances entre des points anatomiques précis du côté droit et gauche du crâne sont souvent utilisées. Par

exemple, la distance entre les coins externes des yeux ou entre les points les plus saillants du front.

- **Analyse Tridimensionnelle** : L'utilisation de scanners 3D permet d'obtenir des mesures plus complexes, telles que la superposition tridimensionnelle de modèles crâniens pour évaluer les déviations dans l'espace.
- **Indicateurs Angulaires** : Certains chercheurs utilisent des indicateurs angulaires pour évaluer l'asymétrie, mesurant les angles formés par des lignes spécifiques entre des points anatomiques.
- **Analyse de la Surface** : L'évaluation de la symétrie peut également impliquer une analyse détaillée de la surface du crâne, en examinant les déviations locales ou globales par le biais de cartes de chaleur ou d'autres représentations graphiques.
- **Volume et Épaisseur** : Certains paramètres incluent la comparaison des volumes ou de l'épaisseur des structures crâniennes du côté droit et gauche pour détecter des variations asymétriques.
- **Paramètres Morphométriques** : Des paramètres morphométriques, qui combinent des mesures linéaires, angulaires et de surface, sont parfois utilisés pour une évaluation plus complète de la morphologie crânienne.

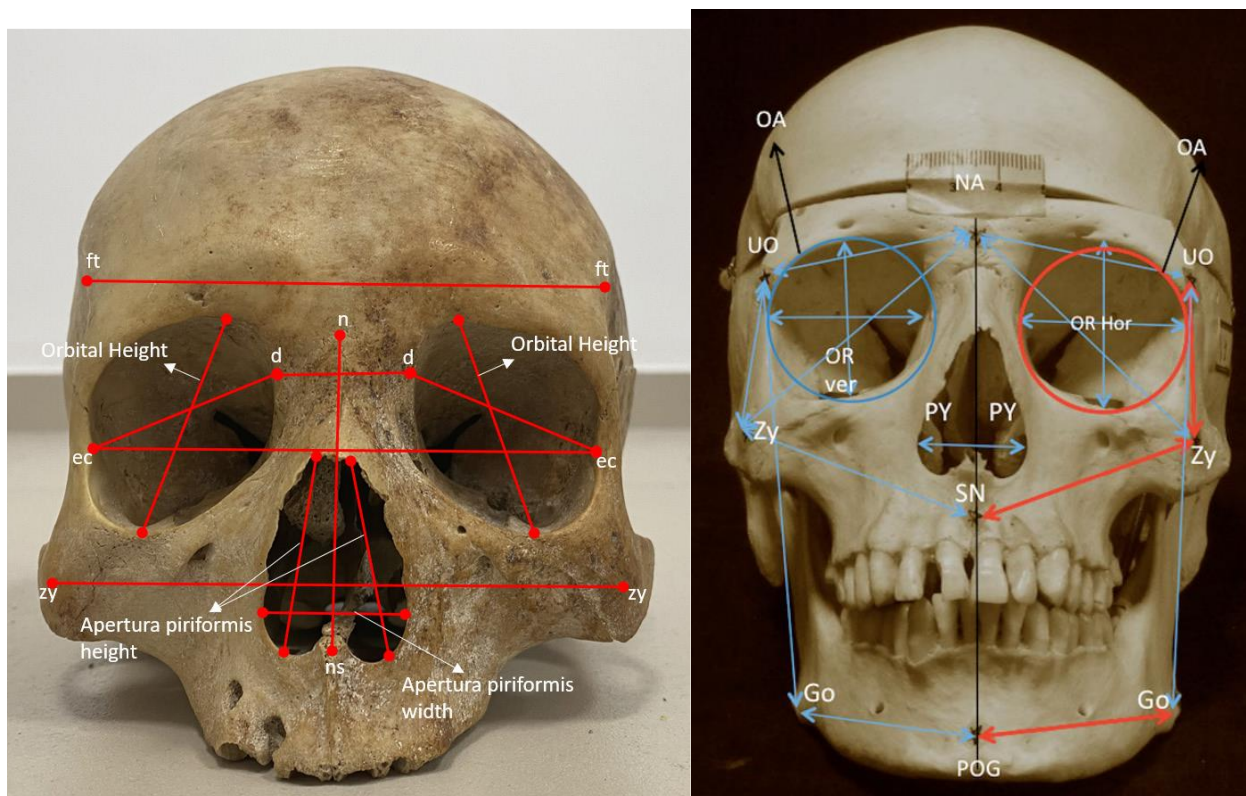


Figure 3.2 : Evaluation de la symétrie crânienne. ([Ashtiani2019], [Ulcay2021])

3-5 L'Asymétrie crânienne :

L'asymétrie crânienne chez l'adulte peut être le résultat d'une combinaison complexe de facteurs anatomiques, environnementaux et génétiques. Cette condition peut avoir des implications esthétiques, fonctionnelles et parfois médicales.

Anatomie et croissance crânienne : L'asymétrie crânienne peut résulter de différences dans la croissance des os du crâne.

Traumatismes crâniens : Les traumatismes crâniens peuvent être un facteur significatif contribuant à l'asymétrie crânienne chez l'adulte. Des impacts, chutes ou accidents peuvent entraîner des déformations du crâne et des structures faciales, conduisant à une asymétrie.

Habitudes de vie et posture : Les habitudes de vie, y compris la posture au travail et pendant le sommeil, peuvent jouer un rôle dans le développement de l'asymétrie crânienne.

Troubles musculo-squelettiques et ATM : Les troubles de l'articulation temporo-mandibulaire (ATM), associés à des asymétries musculaires et occlusales, peuvent influencer la symétrie crânienne.

Facteurs génétiques : Certains individus peuvent être prédisposés génétiquement à des variations dans la morphologie crânienne. Des études sur des populations présentant des conditions génétiques particulières, telles que des fentes palatines, ont révélé des associations entre des anomalies craniofaciales et des facteurs génétiques spécifiques.

3-6 La Régénération Osseuse :

La régénération osseuse crânienne est un processus biologique complexe essentiel à la restauration de la structure osseuse du crâne après des traumatismes, des interventions chirurgicales ou des pathologies. Les bases biologiques de la régénération osseuse impliquent les phénomènes suivants :

Ostéogenèse et Différenciation Cellulaire :

La régénération osseuse commence par l'ostéogenèse, le processus par lequel de nouvelles cellules osseuses, appelées ostéoblastes, sont formées. Les cellules souches mésenchymateuses, présentes dans la moelle osseuse et d'autres tissus, se différencient en ostéoblastes sous l'influence de divers facteurs de croissance et de signalisation.

Les Facteurs de Croissance :

Les facteurs de croissance, tels que le BMP (Bone Morphogenetic Protein), le TGF- β (Transforming Growth Factor-beta), et l'IGF (Insulin-like Growth Factor), jouent un rôle crucial dans la régulation de la différenciation cellulaire et de la synthèse de la matrice osseuse. Ils stimulent la prolifération des ostéoblastes et favorisent la minéralisation de la matrice.

La régénération osseuse chez l'adulte et l'enfant partage des similitudes fondamentales, telles que l'implication des cellules souches mésenchymateuses, des facteurs de croissance, et la synthèse de la matrice osseuse. Cependant, la dynamique de ces processus peut varier considérablement en fonction de l'âge :

La réponse inflammatoire :

Chez l'enfant, la réponse inflammatoire est souvent plus modérée et le processus de régénération peut être plus rapide en raison d'une meilleure capacité de régulation immunitaire. Chez l'adulte, la réponse inflammatoire peut être plus prolongée, ce qui peut influencer la vitesse et l'efficacité de la régénération.

Potentiel Régénératif des Cellules Souches :

Le potentiel régénératif des cellules souches mésenchymateuses diminue généralement avec l'âge. Les enfants ont souvent une population de cellules souches plus active et plus adaptable, favorisant une régénération osseuse plus robuste.

Les contraintes Mécaniques générées par la croissance cérébrale :

Cette contrainte agit sur la dûre-mère favorisant une réossification réussie. L'expansion du volume intra-crânien semble induire un phénotype de dûre-mère plus ostéogénique.

Donc la réossification calvariale réussie est une caractéristique généralement limitée aux êtres immatures (nourrissons et enfants). Étant donné que cette capacité ostéogénique diminue rapidement avec l'âge, les défauts crâniens chez les adultes ne se cicatrissent presque jamais. ([Fong2003], [Gosain2003]).

3-7 Les Causes des Défaits Osseux Crâniens :

Les défauts crâniens, qu'ils soient congénitaux, acquis ou résultant d'interventions médicales, représentent un domaine clinique complexe nécessitant une compréhension approfondie. Nous abordons les différentes catégories de défauts crâniens, leurs causes sous-jacentes et les approches de traitement actuelles :

- **Défauts Congénitaux :** Les malformations crâniennes congénitales peuvent inclure des conditions telles que les craniosténoses (fermeture précoce des sutures crâniennes), l'encéphalocèle, syndrome d'Adams Oliver, forams pariétaux larges.
- **Défauts Acquis :** Les traumatismes crâniens (fractures évolutives, plaies cranio-céphaliques), les infections (ostéites), une origine iatrogène (les craniectomie décompressives), les tumeurs ou d'autres pathologies peuvent provoquer des défauts acquis, entraînant des perturbations dans la structure osseuse.

3-8 Conséquences physiopathologiques du Déficit Crânien :

La transmission directe de la pression atmosphérique au contenu de la boîte crânienne à travers un défaut osseux via le cuir chevelu engendre les conséquences suivantes :

- Compression mécanique cérébrale
- Obstacle au retour veineux : la pression négative périphérique procurée par le crâne sera remplacée par une pression positive atmosphérique directe sur le parenchyme.
- Diminution de la perfusion cérébrale causée par la compression cérébrale
- Altération de l'hémodynamique de LCR secondaire au trouble du retour veineux

- Perturbation de la régulation thermique cérébrale due aux variations de température.
- Changement du microenvironnement cérébral affectant la concentration des ions et des neurotransmetteurs au niveau des zones exposées.

Ces phénomènes engendrent un dysfonctionnement cortical par altération du métabolisme du parenchyme nerveux en regard du défaut crânien.

La compliance du cuir chevelu, de la dure-mère, du parenchyme cérébral, de LCR et des vaisseaux résistent aux forces transmises par la pression atmosphérique. Cette résistance empêche le collapsus artériel ou capillaire complet.

Le degré de l'effet négatif de la pression atmosphérique est directement proportionnel à l'étendue de la perte osseuse.

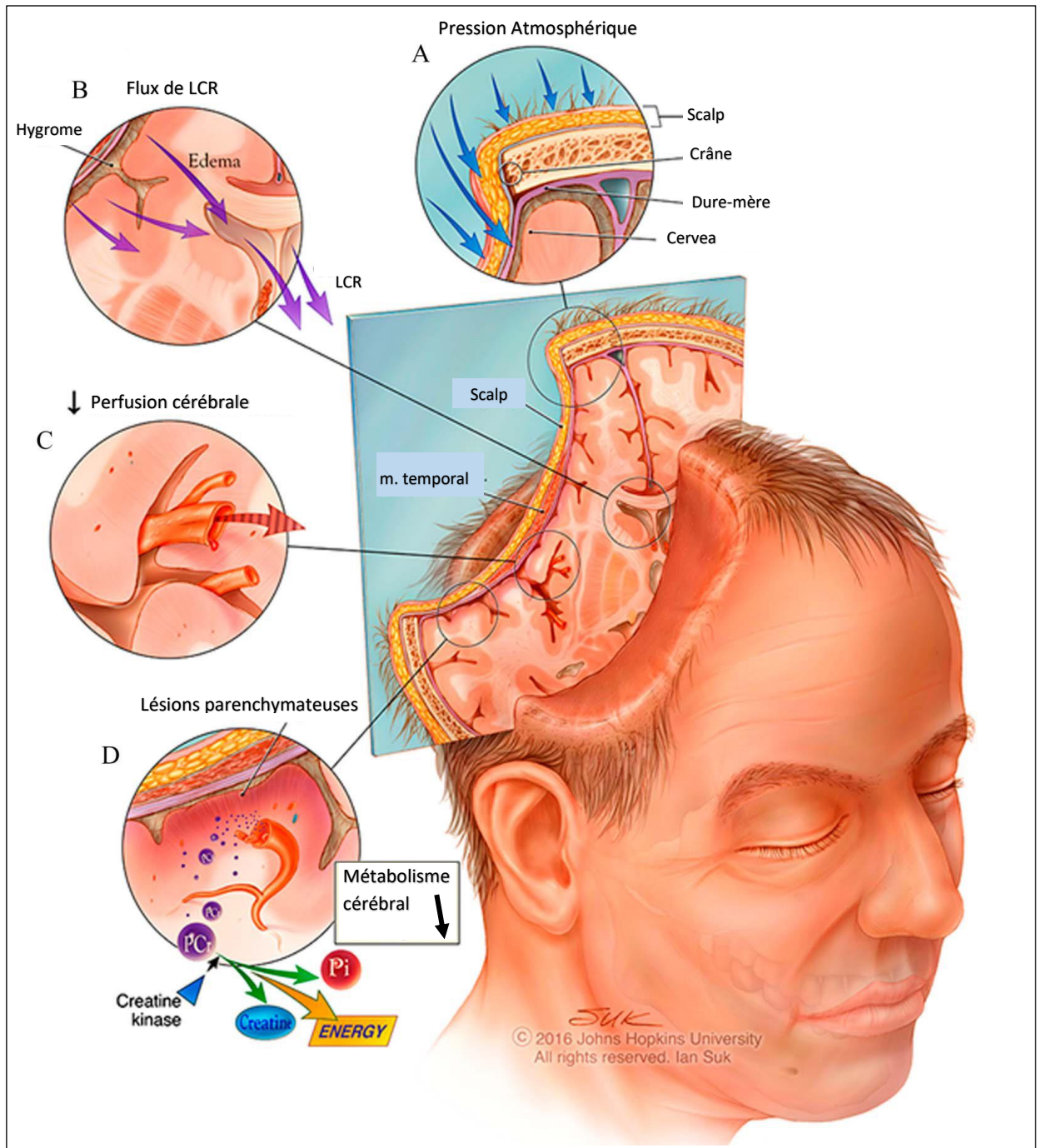


Figure 3.3 : Schéma montrant les conséquences physiopathologiques du défaut crânien. ([Ashayeri2016])

3-9 Trephined Syndrome :

Ce syndrome a été défini pour la 1^{ère} fois en 1939 par Grant and Norcross. Il comprenait les symptômes suivants : vertige, fatigabilité excessive, inconfort au niveau du site du défaut crânien, sentiment d'insécurité, dépression mentale et intolérance aux vibrations. Ces symptômes se résoudraient après rétablissement de l'architecture crânienne. ([Ashayeri2016], [Sveikata2022]).

Actuellement, l'effet négatif de la pression atmosphérique sur un cerveau sans couverture crânienne a été affirmé. Le métabolisme cérébral et son fonctionnement seront affectés. Des troubles neurologiques apparaîtront après un intervalle de la craniectomie (allant de quelques semaines à quelques mois, un délai en moyenne de 5mois). ([Annan2015], [Ashayeri2016], [Lilja-Cyron2019]).

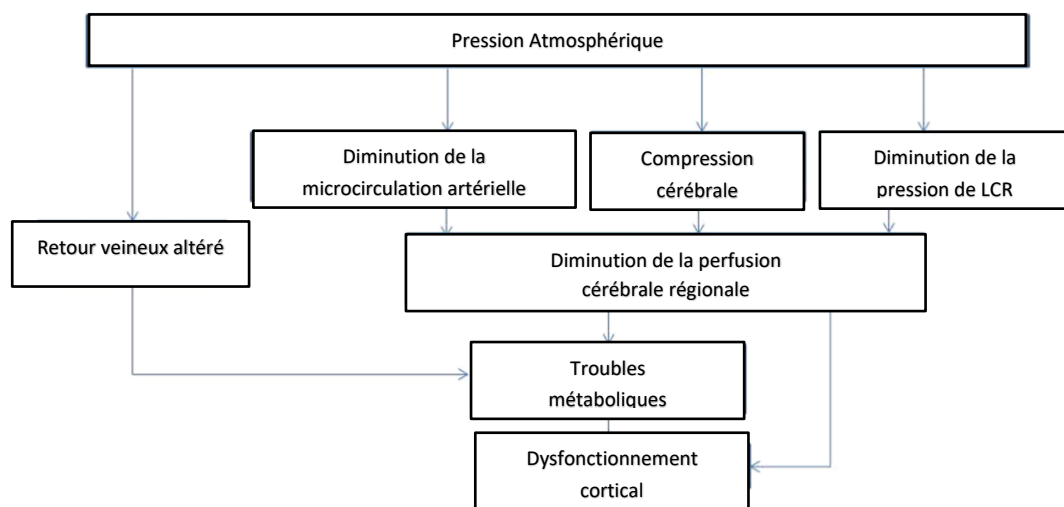


Figure 3.4 : Diagramme résumant les altérations survenues au-cours du Trephined syndrome. ([Annan2015])

Les principaux symptômes sont : sensorimoteurs (hémiparésie, syndrome pyramidal, troubles de la marche), cognitifs (altération de la vigilance) et céphalées (positionnelles). D'autres symptômes sont : visuels, crises épileptiques et troubles urinaires.

L'étendue de surface du défaut osseux susceptible de causer ce syndrome est estimée à 90 cm².

Radiologiquement, ce syndrome se manifeste par une concavité du cuir chevelu avec un effet de masse (effacement des sillons cérébraux, déviation de la ligne médiane dans la direction opposée au défaut crânien) : « Une hernie cérébrale paradoxale ». ([Cassagne2022])

Tableau 3.3 : les signes cliniques au-cours du trephined syndrome

Signes cliniques du trephined syndrome par ordre décroissant de fréquence.
Atteinte motrice
Atteinte cognitive (attention, mémoire)
Troubles du langage
Trouble de la conscience
Céphalées
Troubles psychosomatiques
Crises épileptiques
Trouble des nerfs crâniens



Figure 3.5 : Photo d'un patient présentant le trephined syndrome. ([Romero2013])

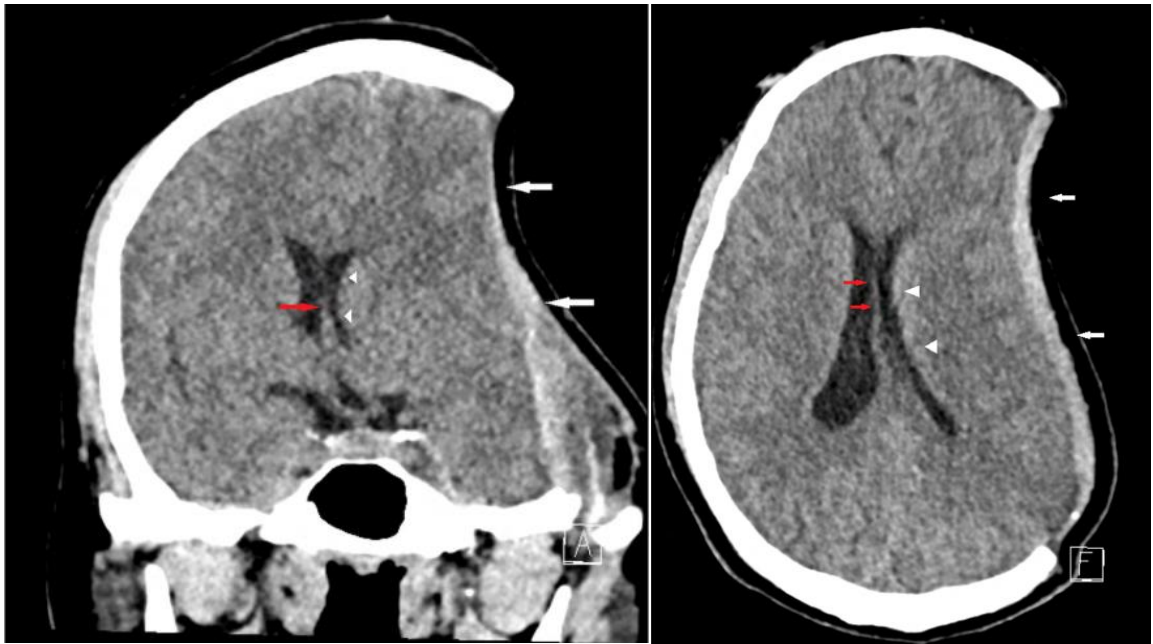


Figure 3.6 : Aspects radiologiques du Trephined syndrome. ([Cassagne2022])

La cranioplastie semble restaurer une bonne hémodynamique cérébrale et améliore le pronostic fonctionnel. Le délai de résolution de la symptomatologie du trephined syndrome est estimé à 4 jours. L'amélioration clinique prendrait approximativement un délai de 3 mois.

3-10 Impact Psycho-social du Défaut Crânien :

Le défaut osseux crânien inflige au patient une apparence défigurée. La tête asymétrique et déformée affecte l'interaction sociale et familiale du malade. Son apparence est socialement vue comme étant un trouble neurologique et mental. Elle le pousse à l'isolement et le rend honteux de son apparence. ([Barden1988], [Pruzinsky1992], [vandenElzen2017])

Les défauts crâniofaciaux apparents et non recouverts par les cheveux sont visuellement inconfortables. Ils entraînent des troubles psychologiques, une atteinte de l'image narcissique et diminution de l'estime de soi ainsi qu'un embarras social. Cette gêne retentit sur l'activité professionnelle du malade qui le pousse à retarder son retour au travail. ([Pruzinsky1992])

Une tête déformée inflige au malade les conditions suivantes :

- Etre moins attractif, incapacité de gagner le partenaire de son choix (pour le mariage)
- La stigmatisation et la discrimination sociale
- Est le handicap le moins souhaitable et le moins acceptable de tous les handicaps
- L'interaction avec les individus et le respect social sont affectés
- Le sentiment d'impuissance, de honte, d'humiliation et de colère
- La solitude et l'isolement social
- Les agressions visuelle et verbale d'autrui (réaction de surprise, regards furtifs, manifestation de pitié ou de moquerie)
- Survenue de troubles psychiatriques (à cause du stress et le rejet social) et risque de dépression et suicide.

- Perception négative des capacités intellectuelles et cognitives des personnes porteuses de déformation crânienne.

Cette condition impactera le niveau socio-économique du malade et affectera sa confiance en soi et le sens de l'inclusion sociale.

3-11 Conclusion :

Le crâne offre au cerveau une protection physique et barométrique. La tête humaine répond à la symétrie axiale. Cette dernière est évaluée par plusieurs méthodes impliquant des mesures linéaires, angulaires. L'index de symétrie, une manière d'apprécier la normalité de la tête en comparant les distances droites et gauches par rapport à des points repères qu'on nomme les points crâniens. Cet index est utilisé dans notre travail pour asseoir le degré de symétrie des calvarias des patients, un élément essentiel dans la conception de la prothèse crânienne.

Le défaut crânien inflige au patient des troubles cliniques qu'on regroupe sous le terme de *Trephined syndrome*. Cette situation est due en une grande partie à l'effet négatif de la pression atmosphérique sur l'hémodynamique et le métabolisme cérébral.

En plus de l'altération physiologique, le défaut crânien présente un impact psychologique difficilement acceptable par le malade. Une tête déformée est cotée comme le handicap le moins toléré de toutes les invalidités.

CHAPITRE 4 : LES CRANIOPLASTIES

4-1 Histoire des cranioplasties

Les premières prothèses crâniennes remontent à l'Antiquité. Elles étaient souvent fabriquées à partir de matériaux tels que le bois, la pierre ou même le métal, et étaient utilisées pour remplacer les parties manquantes du crâne après une blessure ou une maladie.

Les anciens Égyptiens sont connus pour avoir réalisé des trépanations et utilisé du lin pour stabiliser les plaies. De même, les anciens Incas pratiquaient également la trépanation et utilisaient des plaques d'argent pour recouvrir les parties opérées.

Des penseurs et des médecins arabes tels qu'Al-Zahrawi, Avicenne et le père de la chirurgie moderne Abulcasis ont contribué à faire avancer le domaine des prothèses crâniennes. De nouveaux matériaux tels que l'ivoire, le plomb et même le verre ont été utilisés pour la reconstruction du crâne. De plus, des techniques avancées de modelage et de fixation des implants ont été développées. Les chirurgiens arabes ont également perfectionné les méthodes de réduction de l'infection post-opératoire, en utilisant des techniques avancées de stérilisation et des remèdes à base de plantes pour prévenir les complications.

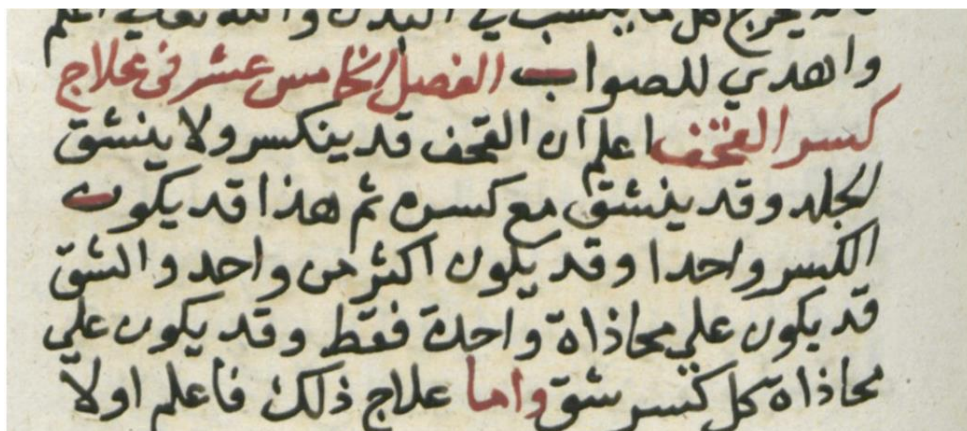


Figure 4.1 : Un manuscrit arabe décrivant une fracture crânienne et sa gestion.
([Aciduman2021])

À l'époque moderne, les prothèses crâniennes ont connu des progrès significatifs grâce aux avancées de la médecine et de la technologie. Au 19^e siècle, l'utilisation de matériaux comme l'or, l'argent et le cuivre a permis de concevoir des prothèses plus durables et esthétiques. La révolution industrielle a également favorisé la production de prothèses en série, améliorant ainsi l'accessibilité pour les patients. Dans les temps modernes, l'avènement des techniques de modélisation 3D et de l'impression 3D ont révolutionné la fabrication des cranioplasties. De plus, les progrès dans les matériaux biocompatibles et les techniques de greffe osseuse ont considérablement amélioré l'intégration des prothèses dans le crâne.

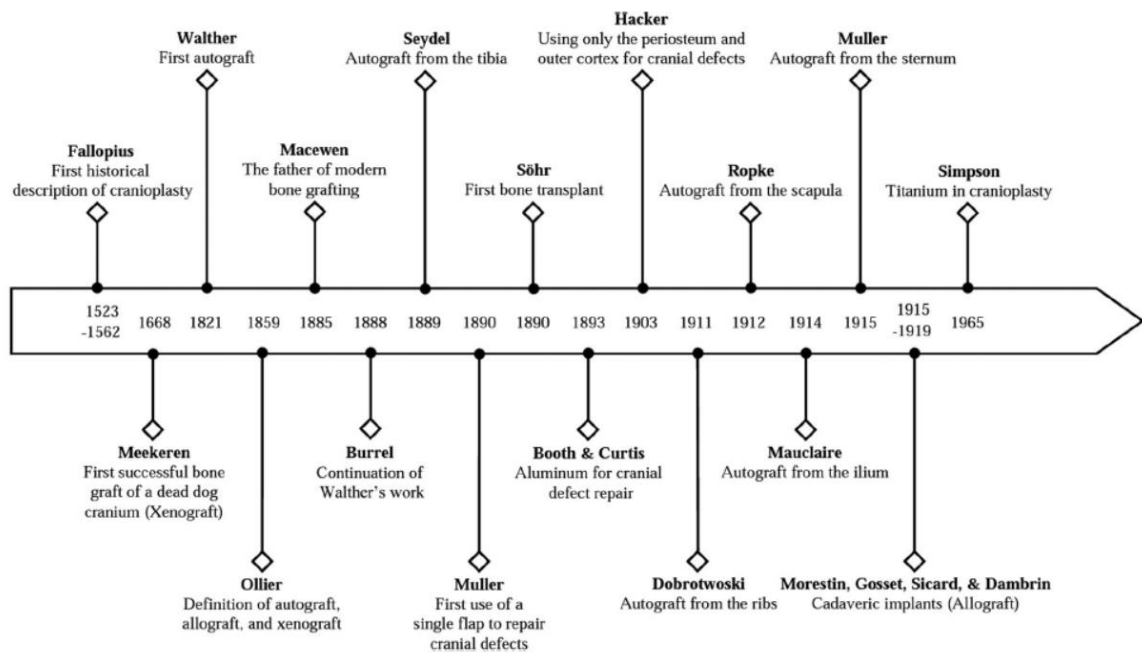


Figure 4.2 : Histoire de l'évolution des cranioplasties dans les temps modernes.
([Alkhaibary2020])

4-2 Limites des cranioplasties avant l'impression 3D :

Les limites de la cranioplastie avant l'ère de l'impression 3D étaient principalement liées à des contraintes techniques, à des résultats imprécis et à des risques accrus de complications pour les patients. L'introduction de l'impression 3D dans ce domaine a permis de surmonter bon nombre de ces défis :

- **Imprécision anatomique :** Les techniques traditionnelles de cranioplastie reposaient souvent sur des matériaux synthétiques préfabriqués, des greffes osseuses ou implants produits manuellement en per opératoire (ciment osseux). Cela pouvait entraîner des résultats anatomiques imparfaits, avec des ajustements inadaptés à la forme exacte du crâne du patient.
- **Temps de chirurgie prolongé :** La fabrication et l'ajustement des prothèses par les méthodes traditionnelles nécessitaient souvent des procédures chirurgicales prolongées, ce qui augmentait les risques pour le patient, notamment en termes d'infection, de saignement et de complications post-opératoires.
- **Difficultés dans la reproduction des formes complexes :** La reconstruction de formes complexes du crâne, notamment en cas de déformations ou de défauts étendus, pouvait être particulièrement difficile avec les techniques traditionnelles.
- **Manque de personnalisation :** Les solutions de cranioplastie précédentes n'étaient pas toujours adaptées aux besoins individuels de chaque patient, ce qui pouvait entraîner des résultats esthétiques et fonctionnels sub-optimaux.
- **Coût élevé :** La fabrication d'implants sur mesure ou l'utilisation de greffes osseuses dans les cranioplasties traditionnelles pouvaient être coûteuses, ce qui limitait parfois l'accessibilité à ces traitements.

L'utilisation de l'impression 3D a permis d'offrir une approche plus précise, plus personnalisée, sûre et plus abordable.

4-3 Types de cranioplasties

- **Cranioplastie Autologue** : Utilisation de l'os du patient provenant d'une autre partie du corps, généralement de la crête iliaque ou du crâne lui-même (si disponible).
- **Cranioplastie Allogénique** : Utilisation d'un greffon osseux provenant d'un donneur.
- **Cranioplastie Synthétique** : Utilisation de matériaux synthétiques tels que le polyméthylméthacrylate (PMMA), le titane, ou des implants en plastique renforcé de céramique.
- **Cranioplastie Hybride** : Combinaison de matériaux synthétiques et d'os autologue pour une reconstruction plus personnalisée.

4-4 Types de matériaux utilisés dans les prothèses crâniennes

Chaque type de matériau a ses propres caractéristiques, et le choix dépend souvent de facteurs tels que la taille de la déficience crânienne, les préférences du chirurgien, la disponibilité des matériaux, et les besoins spécifiques du patient ([Zanotti2016], [Czyżewski2022])

- **Autogreffes osseuses** : Des morceaux d'os du patient lui-même peuvent être utilisés pour la cranioplastie. Ces autogreffes présentent l'avantage d'une compatibilité maximale, mais leur disponibilité peut être limitée, en particulier dans le cas de craniectomies étendues.

Coût estimatif : Les autogreffes peuvent être moins coûteuses que d'autres options, car elles n'impliquent pas l'utilisation de matériaux supplémentaires. Cependant, les coûts peuvent varier en fonction de la complexité de la procédure.

- **Allogreffes osseuses** : Les allogreffes consistent à utiliser des morceaux d'os provenant d'un donneur humain. Bien que moins invasives que les autogreffes, elles présentent un risque potentiel de rejet.

Coût estimatif : Les allogreffes peuvent être moins onéreuses que certaines options, mais les coûts peuvent inclure des frais de collecte et de préparation du greffon.

- **Métaux (Titanium)** : Les implants en titane sont couramment utilisés en raison de leur résistance mécanique élevée. Ils offrent une solution durable et stable, mais ils peuvent être associés à des risques d'infection.

Coût estimatif : Les implants en titane peuvent être plus coûteux en raison du matériau lui-même et des processus de fabrication. Les coûts peuvent également varier en fonction de la conception personnalisée.

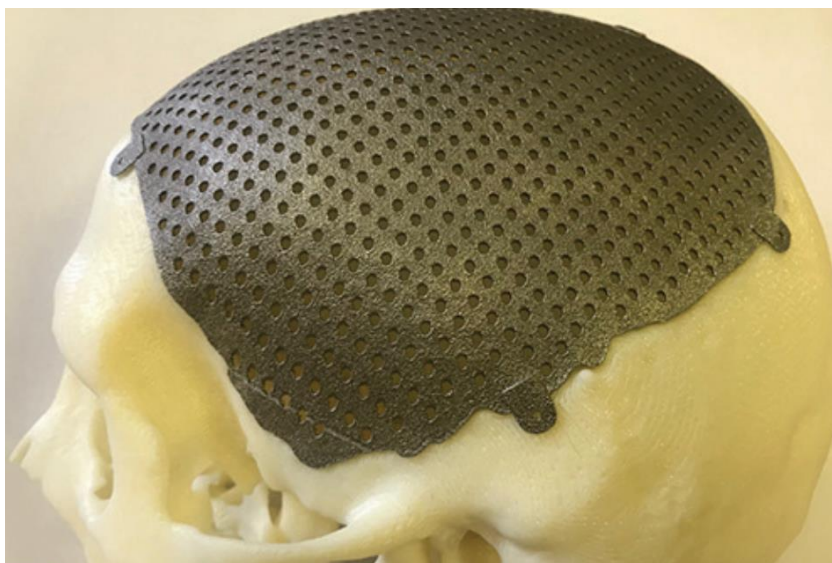


Figure 4.3 : Cranioplastie en titane. ([Policicchio2020])

- **Polyméthacrylate de méthyle (ciment osseux) :** Le polyméthacrylate de méthyle est un ciment osseux utilisé dans les cranioplasties. Il offre une adaptabilité à la forme crânienne et peut favoriser la régénération osseuse, mais il a une résistance mécanique inférieure aux métaux.

Coût estimatif : Le polyméthacrylate de méthyle peut être une option plus abordable, mais les coûts peuvent varier en fonction de la quantité de matériau nécessaire et des frais chirurgicaux associés.

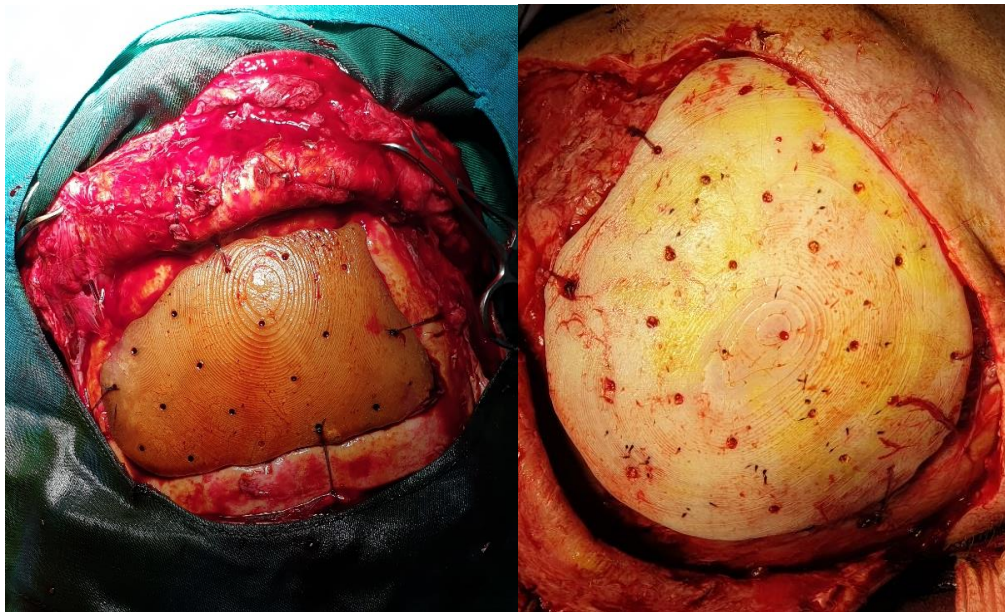


Figure 4.4 : Cranioplastie Polyméthacrylate de méthyle (ciment osseux).

- **Polyéthylène :** Des plaques ou treillis de polyéthylène poreux peuvent être utilisés. Le polyéthylène est léger et biocompatible, mais il peut présenter des risques d'infection.

Coût estimatif : Les plaques ou treillis de polyéthylène peuvent offrir une solution relativement abordable, mais les coûts peuvent varier en fonction de la taille de l'implant et des coûts de fabrication.

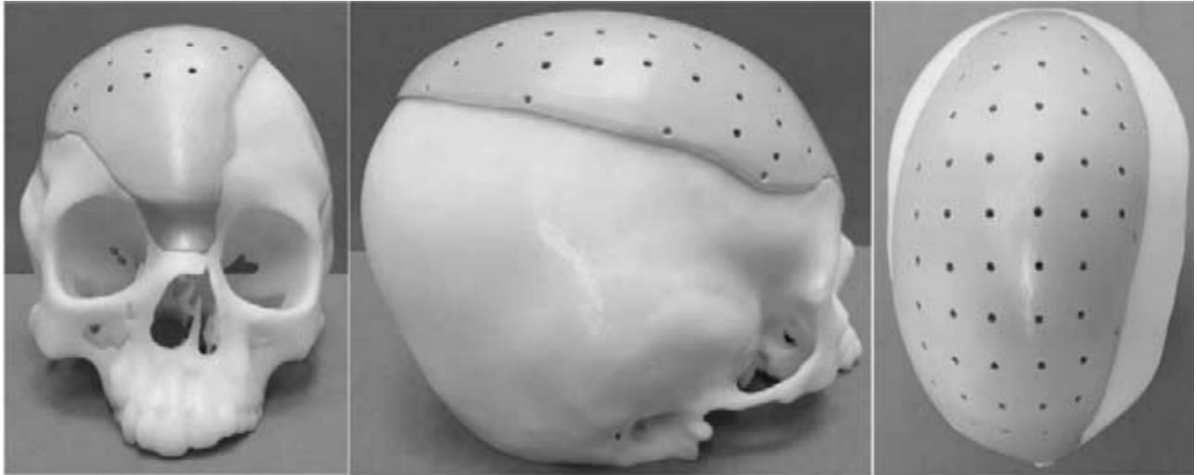


Figure 4.5 : Cranioplastie en polyéthylène poreux. ([Wolfswinkel2017])

- **Implants imprimés en 3D** : Les technologies d'impression 3D permettent la fabrication d'implants sur mesure, offrant une flexibilité de conception. Cependant, cela peut être associé à des coûts et à des délais de production plus élevés.

Coût estimatif : Les implants imprimés en 3D peuvent être plus coûteux en raison de la technologie avancée utilisée. Les coûts comprennent la conception assistée par ordinateur (CAO), l'impression, et la personnalisation.

4-5 Le ciment osseux vs le Titane

- **Le ciment osseux** : Le ciment osseux est généralement composé de polyméthacrylate de méthyle et de polyméthacrylate de méthyle avec des granules d'hydroxyapatite ou de phosphate de calcium. Fabriqué en 1930 comme un matériau industriel, son introduction dans la réparation chirurgicale crânienne a été initiée par Zander en 1940 puis popularisé par les travaux de Gurdjian et coll ([Feroze2015]). Il présente une certaine flexibilité et une capacité à se mouler à la forme du crâne. Voici quelques-uns des avantages courants associés à l'utilisation du PMMA comme ciment osseux :

- **Biocompatibilité** : élevée et favorisant la régénération osseuse.
- **Fixation Rapide** : Le PMMA polymérise rapidement après son application, permettant une fixation immédiate des implants et une stabilisation des structures osseuses.
- **Support Mécanique** : Le PMMA offre un support mécanique et une résistance à la compression, ce qui peut contribuer à la stabilité et à la solidité de la reconstruction osseuse.
- **Adaptabilité et Facilité d'Utilisation** : Le PMMA est facile à manipuler et à appliquer chirurgicalement. Il peut être adapté à la forme anatomique spécifique de la zone traitée, offrant ainsi une solution personnalisée.
- **Réduction des Contraintes sur l'Os** : En raison de ses propriétés de support mécanique, le PMMA peut réduire les contraintes sur l'os adjacent, ce qui peut être bénéfique dans le cas de fractures ou de défauts osseux.
- **Évite la Nécessité d'une Greffe Osseuse** : Dans certains cas, l'utilisation de PMMA peut éliminer le besoin d'une greffe osseuse, simplifiant ainsi la procédure chirurgicale et réduisant le temps opératoire.
- **Traitement des Tumeurs Osseuses** : Le PMMA est souvent utilisé pour remplir les cavités créées après l'ablation de tumeurs osseuses, offrant une reconstruction immédiate et un soutien structurel.
- **Stériorité** : Le PMMA est fabriqué sous des conditions stériles, réduisant ainsi le risque d'infections liées à son utilisation. C'est un matériau exothermique lors de son façonnage, cette propriété renforce la stérilité lors de sa manipulation.
- **Compatibilité avec l'Imagerie Médicale** : Le PMMA est généralement visible en imagerie médicale telle que la radiographie et la tomodensitométrie, facilitant le suivi post-opératoire.

- **Le Titane :** Le titane est un matériau métallique biocompatible avec une résistance mécanique élevée. Les implants en titane sont souvent fabriqués sur mesure pour s'adapter précisément à la zone du crâne manquante. Ses avantages sont :

- Résistance mécanique supérieure.
- Stabilité à long terme.
- Possibilité de fabrication sur mesure.

Ses inconvénients sont : - Coût potentiellement plus élevé.

- Risques liés à la chirurgie de fixation.
- Radio-opaque et possibilité d'artéfacts radiologiques.
- Conducteur de chaleur et de froid.

Tableau 4.1 : Comparaison entre le ciment osseux et le titane

	Le ciment osseux	Le titane
Propriétés physiques	Non conducteur Radio-transparent Excellente résistance mécanique	Conducteur au froid & chaleur Radio-opaque Excellente résistance mécanique
Biocompatibilité	Très bonne	Excellente
Ajustement per-opératoire	Possible	non
Risque infectieux	modéré	minime
Fixation	Fils ou mini-plaques	Mini-plaques et vis
Coût	abordable	Très élevé

4-6 Techniques de Fixation des cranioplasties :

Il existe plusieurs manières de fixer et de stabiliser la prothèse crânienne. La méthode choisie doit garantir les points suivants :

- Absence de risque sur les structures nerveuses
- Abordable
- Absence d'interférence avec l'imagerie radiologique
- Esthétiquement acceptable

Les techniques de fixation possibles sont :

- Simple sutures : méthode rapide cependant il existe un risque de déplacement de la prothèse
- Fil métallique : nécessitant la confection de trous pour y faire passer un fil métallique souvent en acier inoxydable, cette méthode garantit une fixation plus stable.

Cependant les artéfacts générés par l'imagerie et le risque d'irritation du cuir chevelu rendant cette méthode moins attractive.

- Les mini-plaques : assurent une bonne stabilité de la cranioplastie. Leur inconvénient est le coût cher et le risque d'irritation et d'apparence à travers les peaux fines.

4-7 Complications Possibles des cranioplasties

Lors du placement de la prothèse crânienne, le chirurgien est confronté à 2 types de complications ([Sahoo2018], [Alkhaibary2020]) :

- **Complications Per-opératoires :**

Ces complications surviennent lors de l'exposition du défaut crânien à savoir :

- Saignement
- Déchirure du volet cutané (cuir chevelu)
- Brèche durale et fistule de LCR
- Lésion veineuse (sinus veineux)

- **Complications Post-opératoires :**

Complications immédiates post-opératoires : Après une cranioplastie, certaines complications immédiates peuvent survenir, notamment :

- un hématome intracrânien, une collection de LCR
- une infection du site opératoire,
- une réaction anaphylactique au matériau de la prothèse
- une occlusion vasculaire et nécrose cutanée
- une déhiscence de la plaie opératoire

Complications tardives post-opératoires : Les complications tardives post-opératoires des cranioplasties peuvent survenir plusieurs mois après la chirurgie. Ces complications incluent

- L'infection de la prothèse,
- Un déplacement de la prothèse
- Les troubles neurologiques.
- Résorption pour les greffes osseuses (population pédiatrique)
- Elévation de la pression intracrânienne et perturbation du flux de LCR
- Réaction cutanée (décoloration, alopecie, perforation et exposition de la cranioplastie)

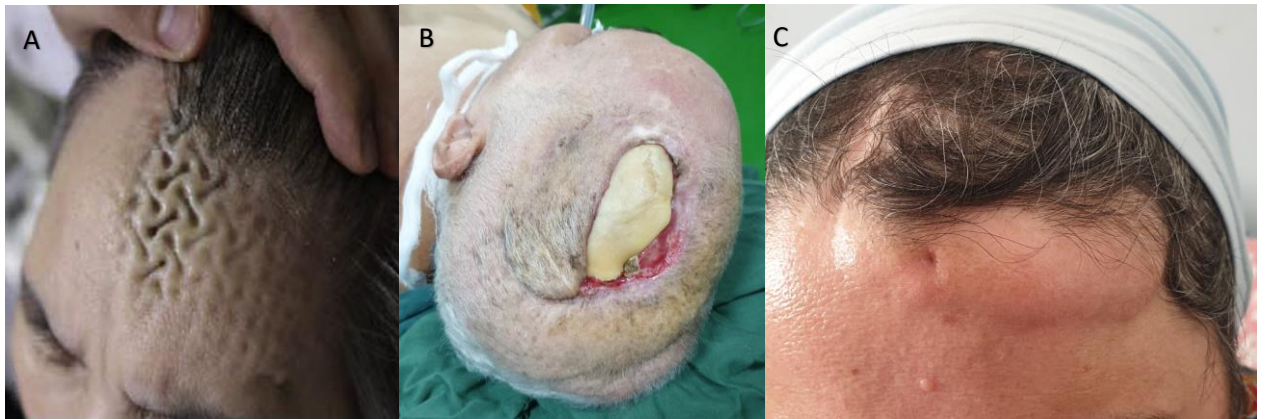


Figure 4.6 : les complications de la chirurgie des prothèses crâniennes. (A) exposition de la cranioplastie en titane ([Roh2019]). (B) déhiscence cutanée. (C) déplacement de la prothèse.

4-8 Conclusion :

La conception et la mise en place de cranioplasties est de pratique courante en neurochirurgie et de chirurgie maxillo-faciale. Cette pratique a connu des développements au fil des temps influencés par le progrès de la technologie et l'utilisation de matériaux innovants. Traditionnellement, réalisées avec des matériaux et des techniques moins performants, les cranioplasties modernes intègrent des composites avancés et des polymères biocompatibles qui offrent une meilleure intégration anatomique.

Deux matériaux se distinguent par la fréquence de leur utilisation le ciment osseux et le titane. Le premier est connu pour sa maniabilité, sa biocompatibilité et son coût abordable. Le second présente des résistances mécaniques élevées, une durabilité avec un risque infectieux minime avec un inconvénient majeur le coût très onéreux.

La mise en place des prothèses crâniennes comportent des risques de complications de degrés variables de gravités dominées essentiellement par l'infection et les défections.

CHAPITRE 5 : MATERIELS & METHODES

Dans ce chapitre, nous présentons la procédure de conception de cranioplastie personnalisée ainsi que son application sur des patients (25 cas) présentant des défauts crâniens de différentes causes. Le travail conduit est une étude de cas prospective réalisée au niveau du service de neurochirurgie, Centre hospitalo-universitaire IBN Rochd d'Annaba, Algérie.

Le principe du travail repose sur la conception d'un moule numérique, imprimé ensuite par une impression 3D. Ce moule physique après stérilisation, servira comme support pour la fabrication de la prothèse crânienne

5-1 Matériels :

25 patients présentant des défauts crâniens de causes multiples ont subi la mise en place de prothèses crâniennes réalisées à partir de la conception d'un moule numérique puis physique imprimé en 3D. La période de recrutement s'étend du mois de décembre 2016 au mois de septembre 2024. Le lieu de conception et de mise en place des prothèses crâniennes est le service de neurochirurgie, CHU IBN ROCHD Annaba Algérie.

- **Critères d'inclusion** : Tout patient présentant une perte osseuse crânio-faciale quelle que soit sa cause (post-traumatique, cancéreuse ou malformative)

Le matériel et outils utilisés pour la fabrication du moule qui servira comme support à la conception de la prothèse crânienne sont les suivants :

- **Matériel d'impression** :

- Imprimante 3D de Bureau et

- Son consommable filament PLA 1,75 mm de diamètre,
- **Matériel de calcul et traitement d'image :**
 - Un ordinateur muni d'un processeur i7, 16 Go de RAM et une carte graphique 4Go.
 - Un logiciel de traitement d'images radiologiques (Slicer 3D actualisé régulièrement tout au long du déroulement de l'étude).
 - Un logiciel de modélisation 3D (Autodesk Meshmixer 3.0).
- **Données :**
 - Des coupes TDM du crâne au format DICOM.
- **Matériau de la prothèse :**
 - Le ciment osseux (méthyl acrylate).
- **Paramètres d'étude :**
 - Age et sexe des patients
 - Causes du défaut
 - Surface du défaut, rapport de la surface du défaut/ surface du crâne)
 - Localisation du défaut
 - Temps écoulé entre craniectomie et cranioplastie.
 - Paramètres radiologiques du scanner (nombre de coupes, épaisseur de coupe),
 - Degré de symétrie du crâne (index de symétrie crânienne)
 - Caractéristiques du moule : conception par symétrie ou de la ligne médiane, durée d'impression, longueur de filament consommée, la stérilisation
 - Geste chirurgical entrepris : approches, ajustement per-opératoire de la prothèse, moyens de fixation

- Complications : infection, intolérance, défection, à distance
- Satisfaction sur une échelle de 5

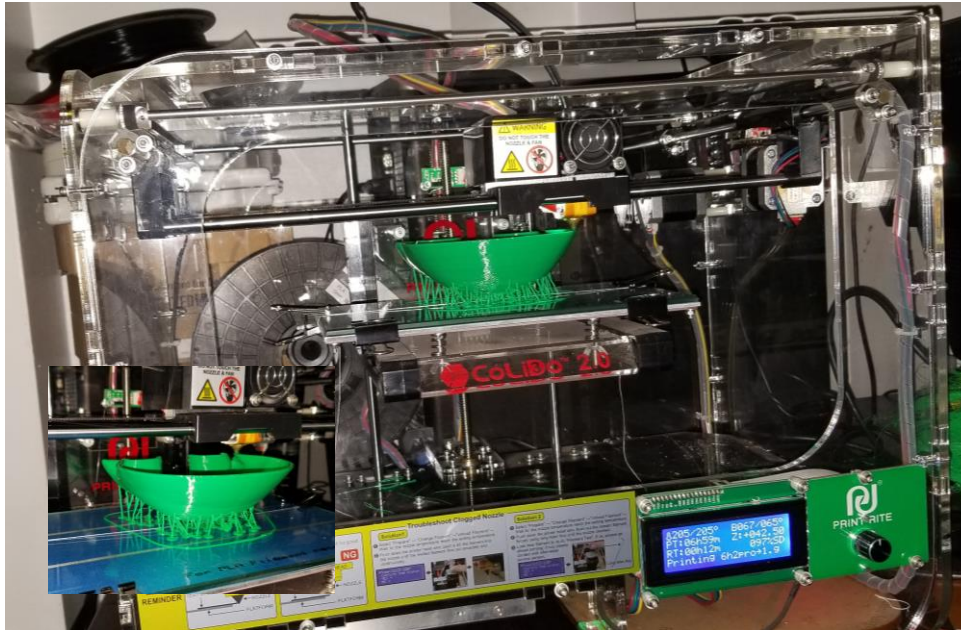


Figure 5.1 : Imprimante 3D utilisée dans la conception du moule qui servira de guide pour la cranioplastie.

5-2 Méthodes :

5-2-1 Segmentation :

La réalisation du moule qui servira comme support pour la cranioplastie commence par la transformation des coupes fines du scanner format DICOM en un modèle 3D exploitable numériquement. Cette étape se nomme segmentation, elle se déroule grâce au logiciel **slicer 3D**. Ce dernier permet de séparer l'os du reste des tissus mous moyennant une procédure de seuillage (le seuil optimal est déterminé par manipulation de ce logiciel). Les étapes sont les suivantes :

1- Importer les données DICOM du patient

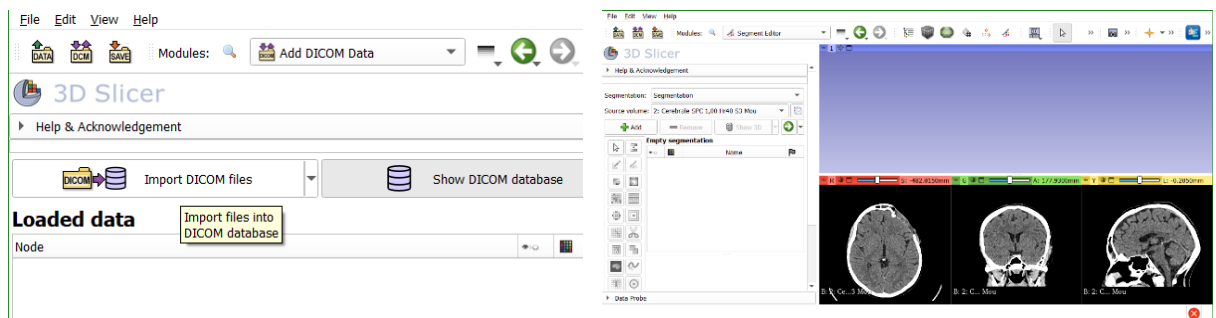


Figure 5.2 : Interface du logiciel Slicer3D montrant l'import des données scannographiques DICOM.

2- Grâce au module **Segment Editor**, on procède à la segmentation en choisissant l'onglet **Threshold** et fixant le seuillage jusqu'à l'isolement de l'os, un clic sur **Apply**.

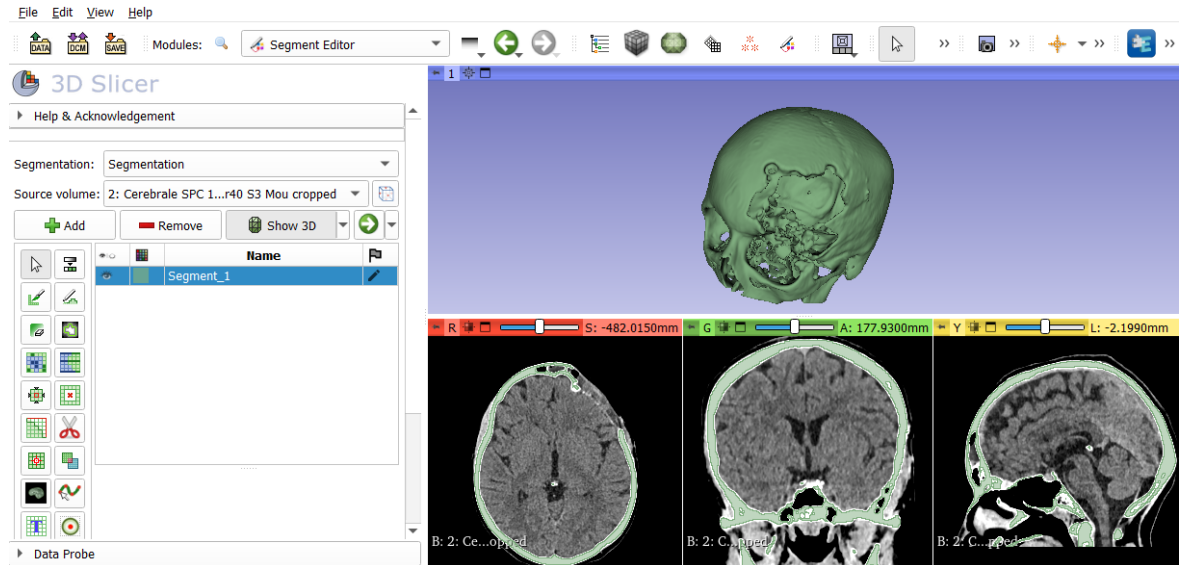


Figure 5.3 : Interface du logiciel Slicer3D expliquant la segmentation et l'isolement du crâne.

3- Exporter ensuite le segment formé en un fichier type .obj ou .stl

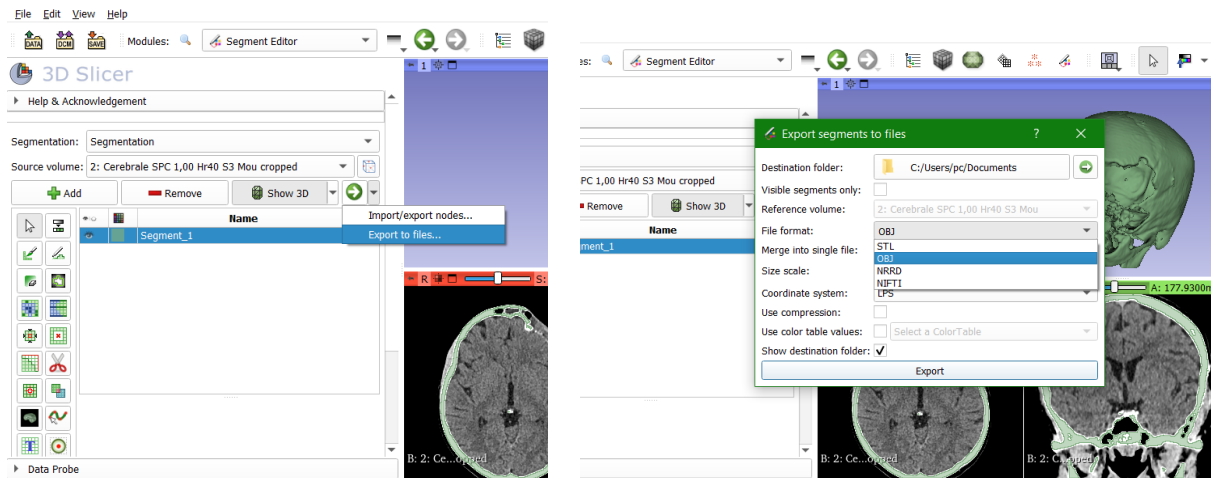


Figure 5.4 : Interface du logiciel Slicer3D montrant l'étape d'export du crâne isolé en format exploitable par les logiciels de modélisation 3D.

5-2-2 Conception du moule numérique :

Une fois l'os est isolé et le rendu en 3D du volume souhaité est lancé. Le résultat obtenu est exporté vers le deuxième logiciel **Autodesk MeshMixer**. Le volume une fois raffiné, est remodelé afin de concevoir numériquement le moule. Ce procédé est réalisé par des opérations de base de traitement d'images 3D : addition, soustraction, symétrie, négatif des surfaces (normales inversées). Les étapes suivantes résument la conception :

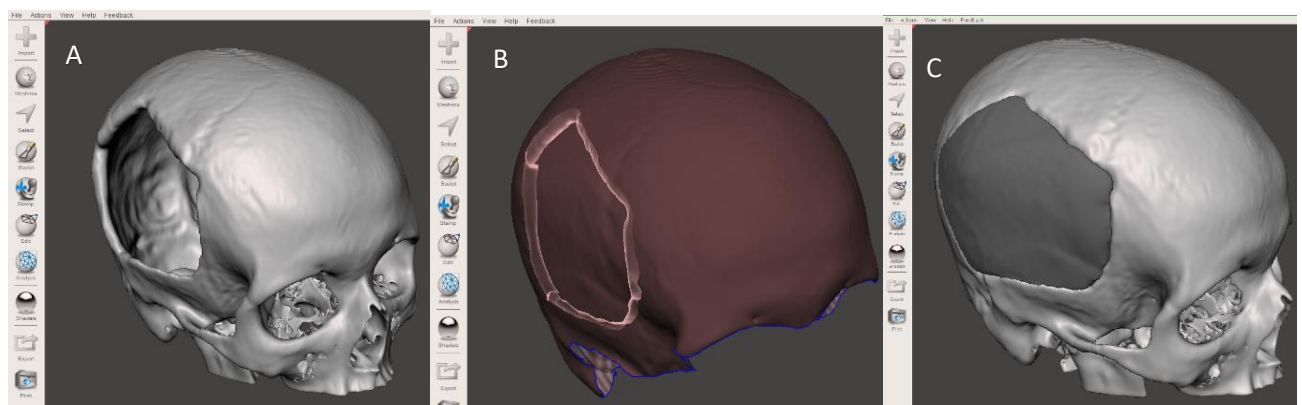


Figure 5.5 : Interface du logiciel Slicer3D montrant les étapes de conception du moule numérique. (A) import de l'objet. (B) la symétrie du modèle. (C) la conception du surface du moule

Les dimensions des modèles sont respectées tout au long du processus de conception du moule numérique. Donc le risque d'un moule inadapté au défaut crânien est écarté ([Galvez2019])

5-2-3 Impression 3D du moule :

Une fois le moule numérique est conçu sur le logiciel **MeshMixer**. Il est transféré vers l'imprimante 3D qui est munie d'un programme qui permet de fixer les paramètres d'impression (les supports de l'objet à imprimer, simulation de l'impression, optimisation

de la position du modèle, spécification du type du consommable utilisé (PLA pour notre travail) et la précision de l'impression).

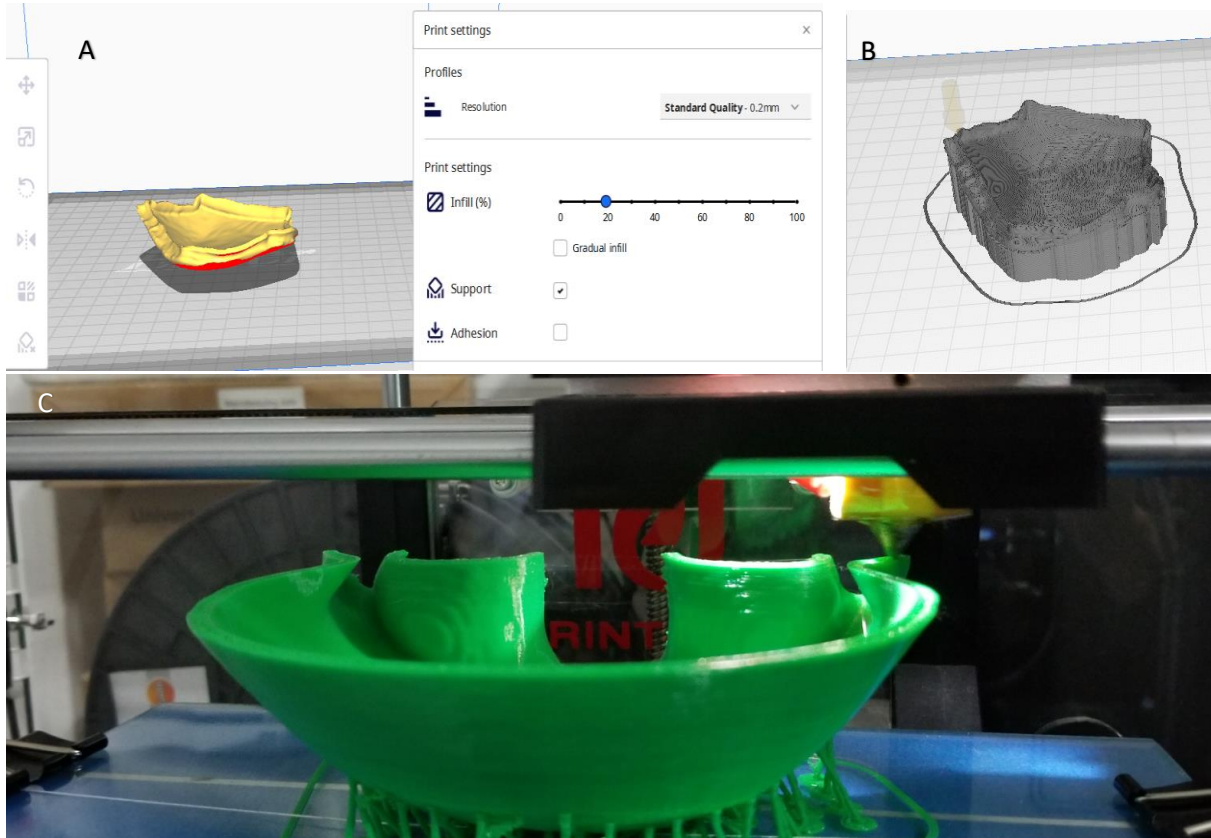


Figure 5.6 : Impression du moule physique. (A) ajustement des paramètres de l'impression. (B) simulation de l'impression 3D. (C) Impression 3D du moule physique

5-2-4 Conception de la prothèse en Per-opératoire :

Le moule étant imprimé et stérilisé (par une incubation dans le formol ou stéranoïse) ; la prothèse personnalisée se réalise à l'aide du ciment acrylique osseux. Ce dernier se présente dans un emballage stérile, sa manipulation ne se fait qu'au bloc opératoire lors de la conception de la cranioplastie et de sa mise en place sur le malade. Les étapes ainsi que leurs délais indiqués par le fabricant pour manipuler le ciment sont respectées rigoureusement (recours au chronomètre) afin de réaliser une prothèse convenable s'adaptant au défaut crânien.

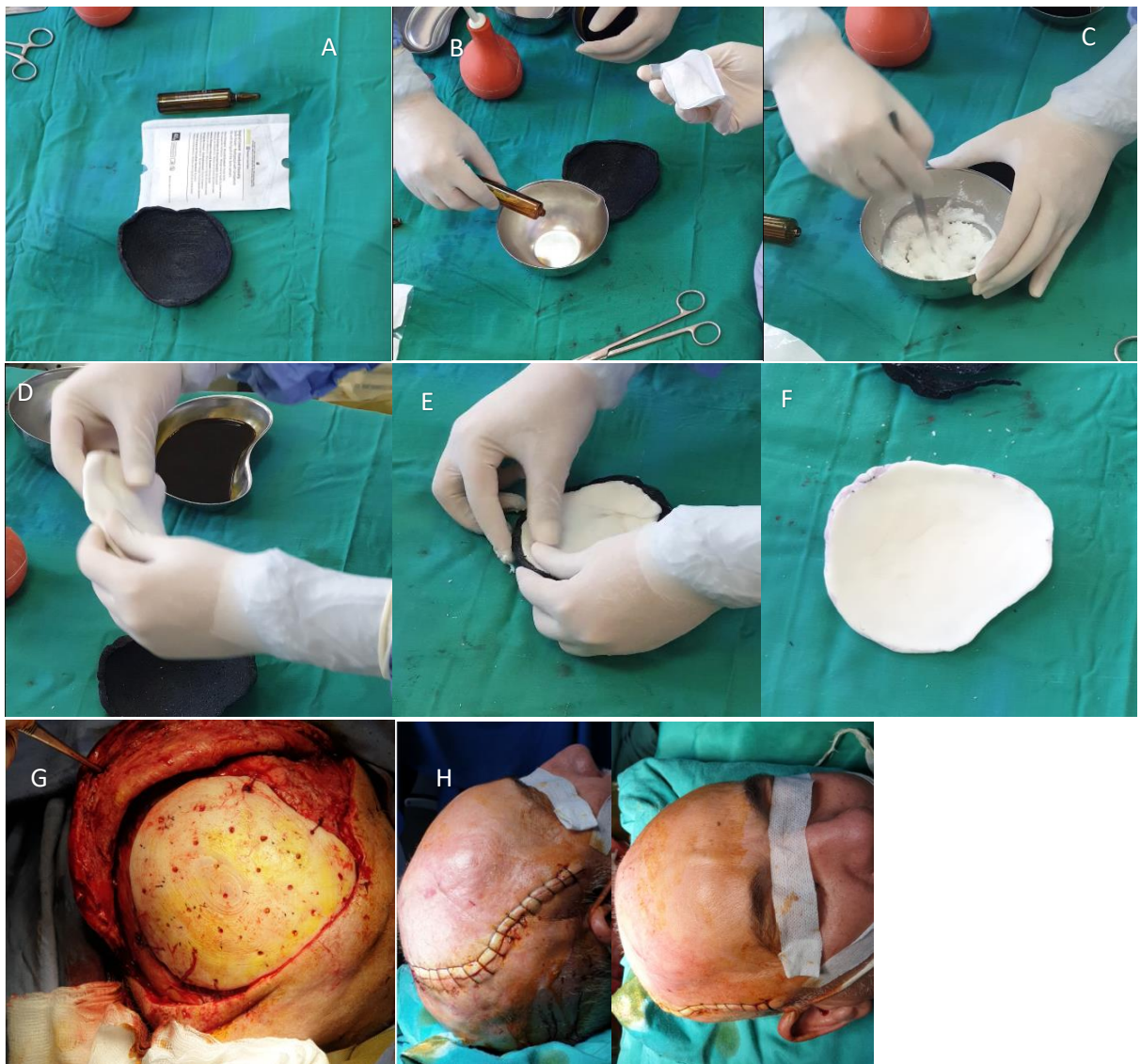


Figure 5.7 : l'étape per-opératoire de la conception de la cranioplastie. (A) le moule physique et le ciment osseux. (B-D) façonner le ciment osseux qui se transforme en une pâte malléable. (E) application du ciment sur le moule. (F) démoulage après durcissement du ciment osseux. (G) mise en place de la prothèse après avoir confectionné des pores. (H) recouvrement cutané.

5-2-5 Evaluation de la surface du Défaut crânien et de la surface du crâne :

L'appréciation du pourcentage de la surface du défaut crânien par rapport à la surface du crâne se fait par le calcul des deux surfaces du défaut et de la calvaria. Tout d'abord un isolement des faces exocrâniennes des deux objets sur le logiciel **Meshmixer**, puis leur exportation vers le logiciel **Slicer3D** pour le calcul qui se fait comme suit :

1- Import du modèle (préalablement traité sur Meshmixer*) sur 3d slicer.

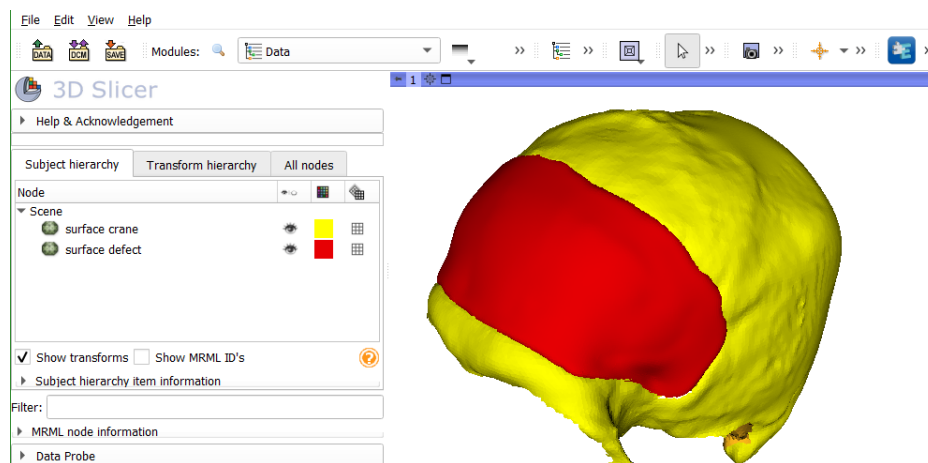


Figure 5.8 : Interface Slicer3D montrant l'importation de la surface du défaut et du crâne

2- Convertir le modèle en nœud de segmentation. (un clic droit sur l'objet puis choisir *convert model to segmentation node*)

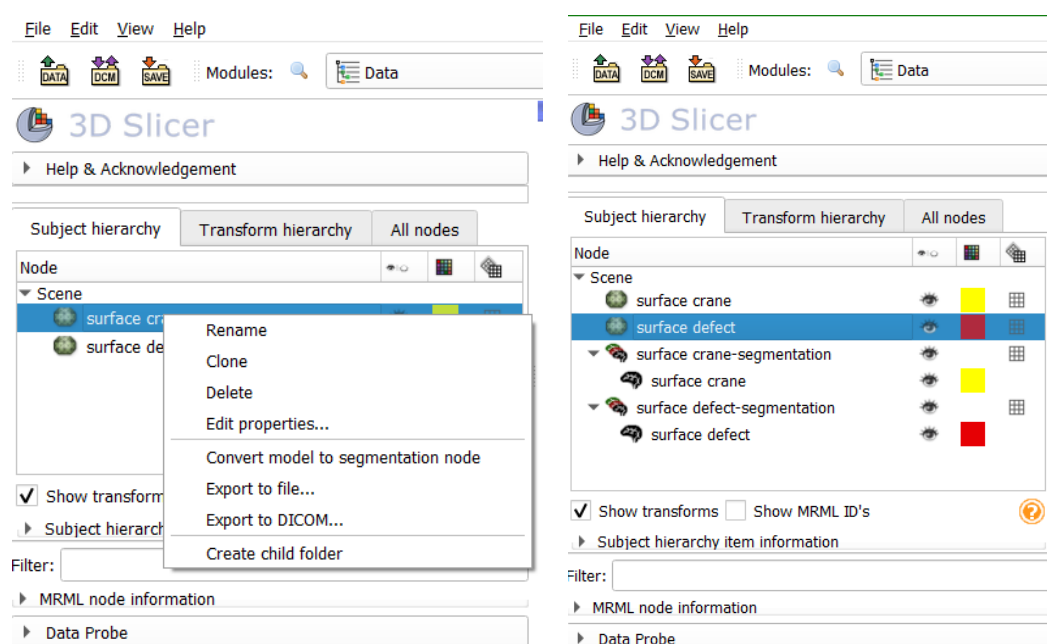


Figure 5.9 : Conversion du modèle en format exploitable pour les mesures de grandeurs.

3- Appliquer sur le segment choisi le module **Segment Statistics**.

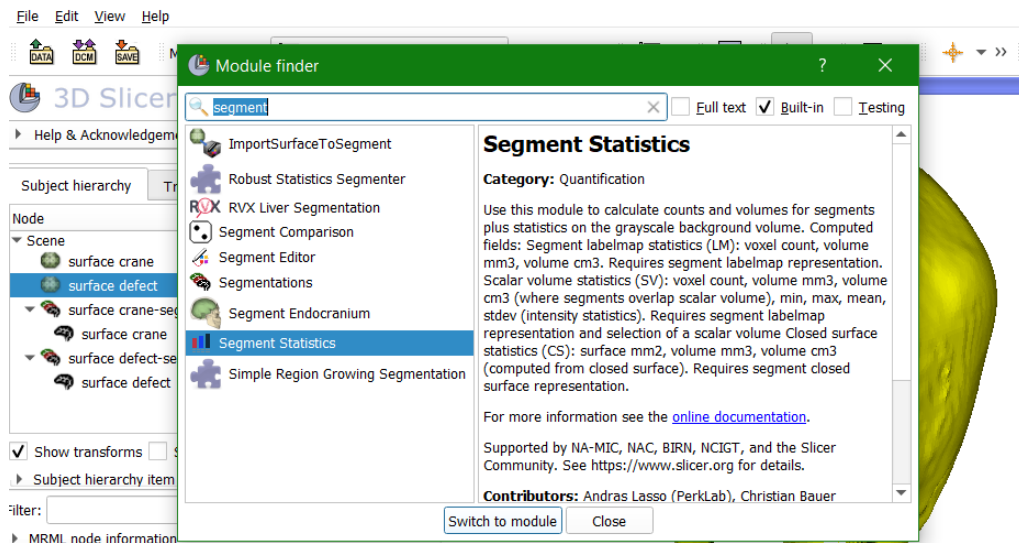


Figure 5.10 : le module **Segment Statistics** du logiciel Slicer3D pour la mesure de surface

4- Pour **Inputs** choisir le segment sur le panneau déroulant.

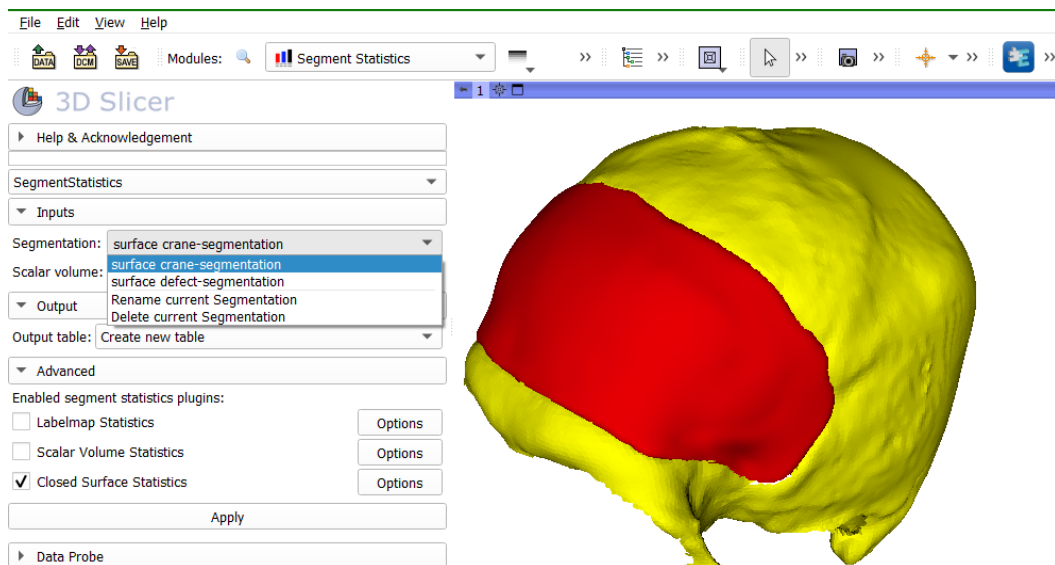


Figure 5.11 : Détermination des surfaces à calculer sur le module **Segment Statistics** du logiciel Slicer3D.

5- Sous **Advanced** cocher seulement **closed surface statistics**.

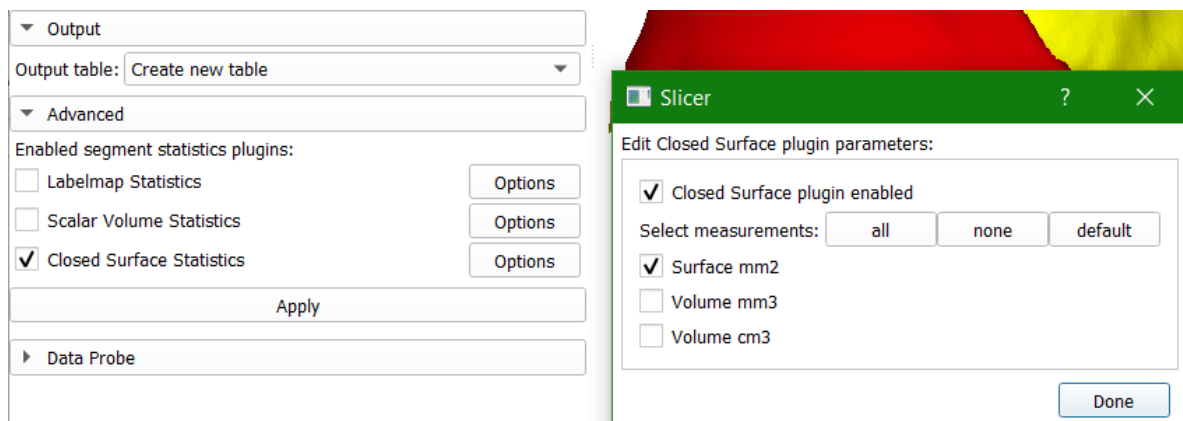


Figure 5.12 : Ajustement des paramètres de calcul des surfaces sur le module **Segment Statistics** du logiciel Slicer3D.

6- Sous **options** activer seulement **Surface area in mm²** pour l'étude de la surface puis cocher sur **Apply**

Remarque : Le calcul de la surface pour ce module fournit la somme des deux surfaces périphérique et profonde du segment. Pour délimiter la valeur à la surface de la face externe du modèle, on divise le résultat sur deux.

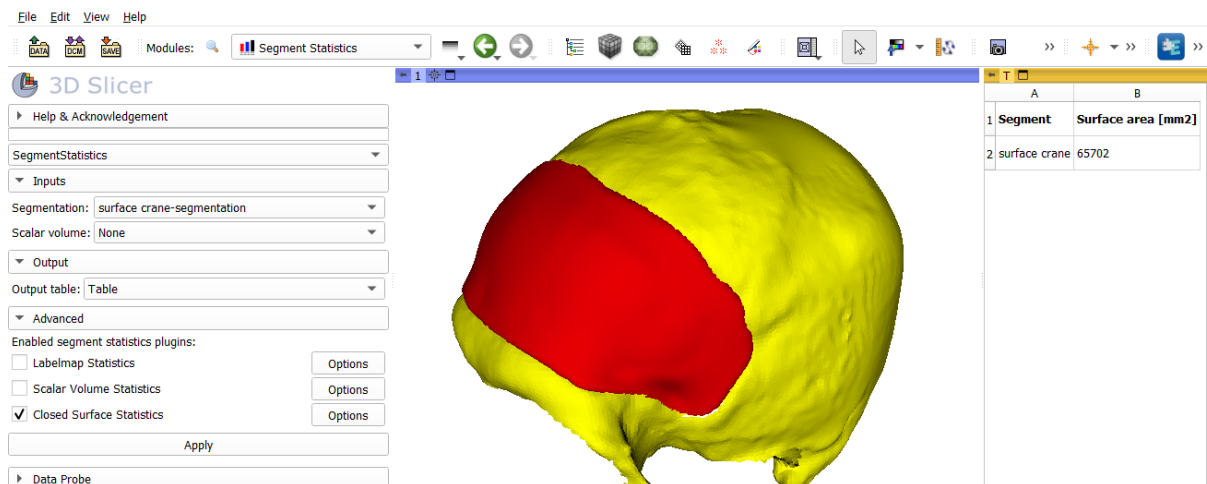


Figure 5.13 : Calcul des surfaces sur le module **Segment Statistics** du logiciel Slicer3D.

5-2-6 L'estimation de l'index de symétrie crânienne :

Pour calculer la symétrie crânienne des patients, des mesures linéaires (distances) sont calculées du côté droit et leurs correspondantes du côté gauche de chaque crâne ([Zonenshayn2004], [Kung2013]). Les points crâniens latéraux (ptérion et asthérion) et médiaux (nasion, bregma, lambda et opisthion) sont déterminés et serviront comme repères pour l'obtention des distances de chaque côté. Le repérage des points crâniens se fait sur le logiciel **Slicer3D** selon les étapes suivantes :

- 1- Importer les données DICOM du patient
- 2- Choisir le module **volume rendering** et rendre visible le volume
- 3- Ajuster le seuil **shift** jusqu'à isoler l'os

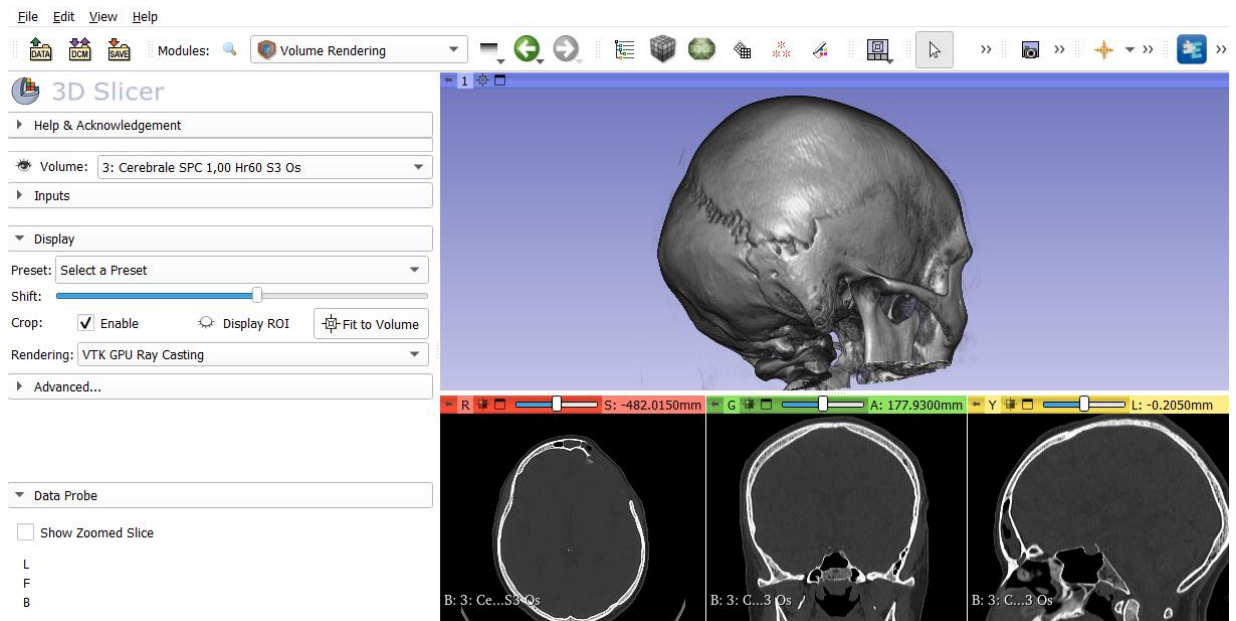


Figure 5.14 : Visualisation du crâne à l'aide du module **Volume Rendering** sur le logiciel Slicer3D.

- 4- Choisir le module **Markups** et l'onglet **Point List** permet la création d'un groupe de points en l'occurrence les points crâniens qu'on place directement sur l'intersection des sutures crâniennes sur la fenêtre 3D. l'ajustement précis de leur emplacement se fait grâce aux fenêtres de coupes (axiale, frontale et sagittale).

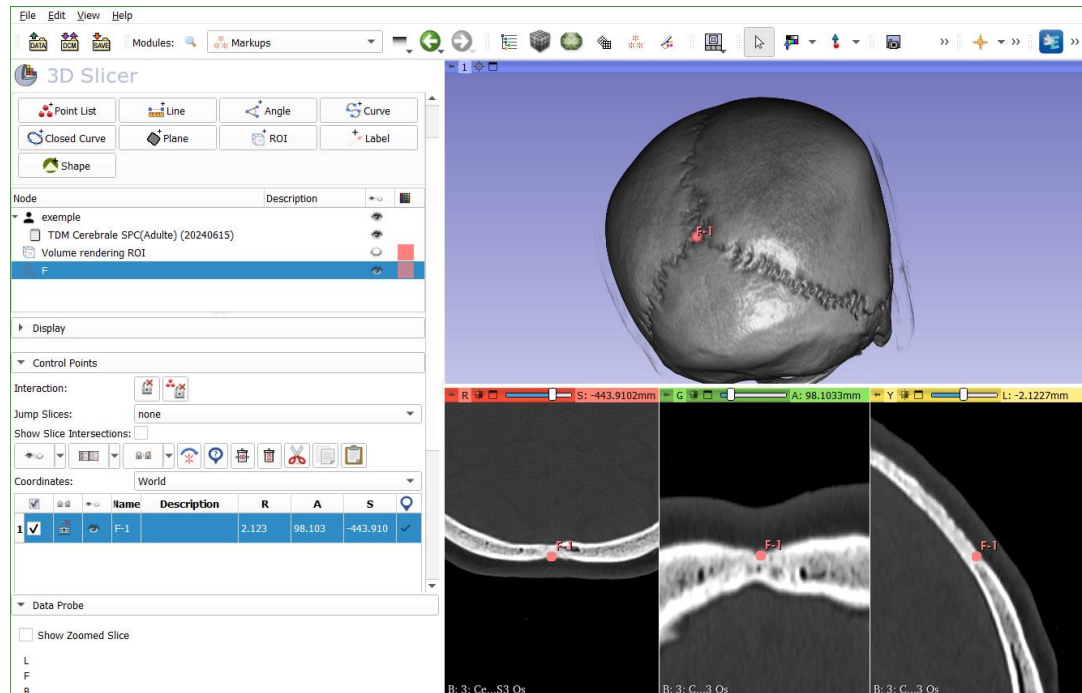


Figure 5.15 : Détermination des points crâniens à l'aide du module **Markups** sur le logiciel Slicer3D.

5- Une fois les points crâniens sont placés à leur endroit précis, les distances entre les points latéraux et médiaux sont déterminées par l'onglet **Line** qui comporte 2 points pour chaque segment de ligne.

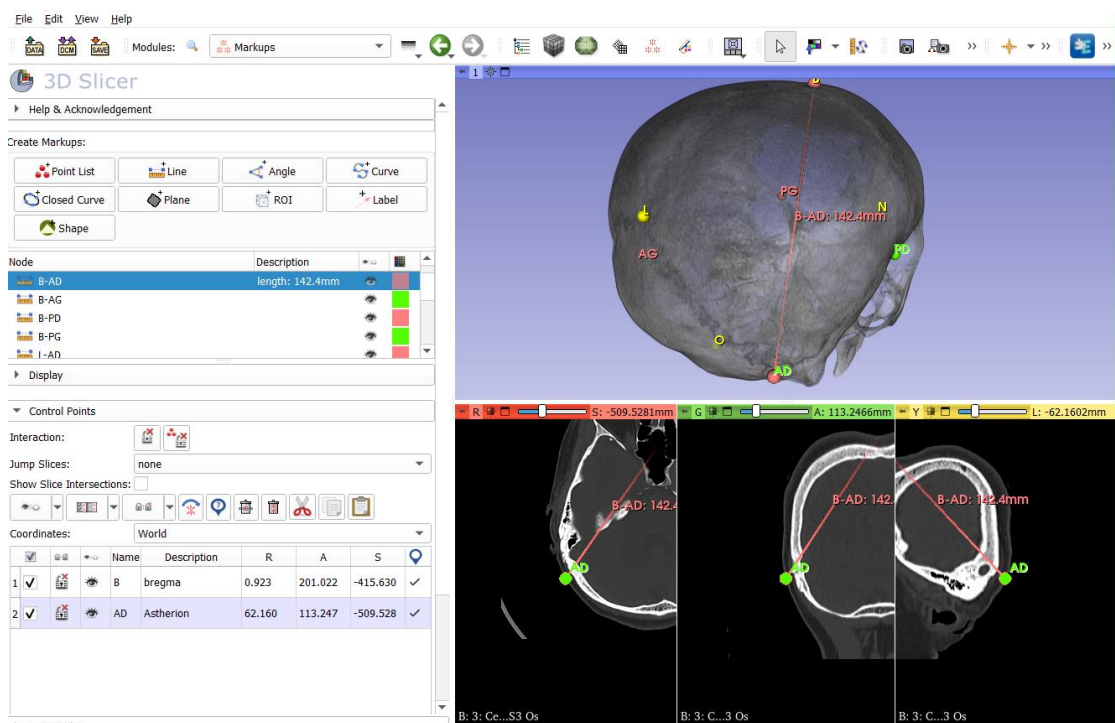


Figure 5.16 : Détermination des distances entre les points crâniens sur le logiciel Slicer3D.

6- Une fois toutes les lignes sont déterminées, les longueurs seront exportées vers un tableur type Excel en cliquant sur **CTRL+SHIFT+M**

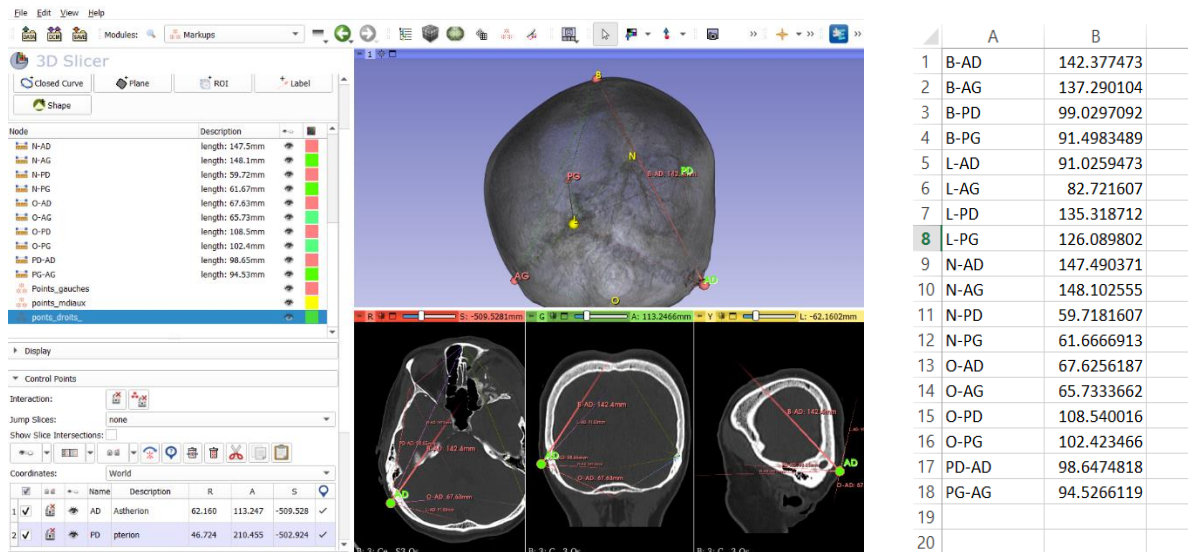


Figure 5.17 : les longueurs des distances entre les points crâniens sur le logiciel Slicer3D et leur export vers un tableur.

Au total, on aura 18 distances réparties entre les deux côtés droit et gauche. Le tableau suivant résume l'ensemble des longueurs calculées :

Tableau 5.1 : les distances entre les points crâniens utilisées pour le calcul de l'index de symétrie.

B-AD	Distance bregma-asthérion droit	N-AG	Distance nasion- asthérion gauche
B-AG	Distance bregma-asthérion gauche	N-PD	Distance nasion- ptérion droit
B-PD	Distance bregma-ptérion droit	N-PG	Distance nasion- ptérion gauche
B-PG	Distance bregma-ptérion gauche	O-AD	Distance opisthon- asthérion droit
L-AD	Distance lambda- asthérion droit	O-AG	Distance opisthon- asthérion gauche
L-AG	Distance lambda- asthérion gauche	O-PD	Distance opisthon- ptérion droit
L-PD	Distance lambda- ptérion droit	O-PG	Distance opisthon- ptérion gauche
L-PG	Distance lambda- ptérion gauche	PD-AD	Distance ptérion droit- asthérion droit
N-AD	Distance nasion-asthérion droit	PG-AG	Distance ptérion gauche- asthérion gauche

L'index de symétrie est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left| 1 - \frac{Di}{Gi} \right|}{n}$$

Di/Gi : rapport entre une distance droite et sa correspondante gauche.

n : le nombre des rapports entre une distance droite et sa correspondante gauche.

5-3 Conclusion :

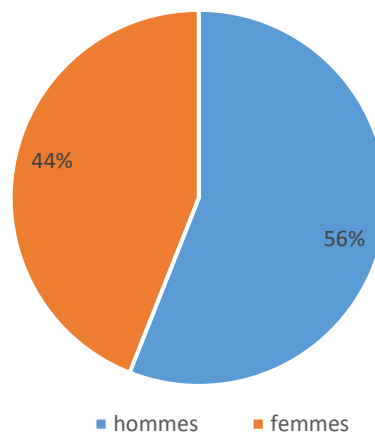
Cette étude démontre l'efficacité et la pertinence de l'utilisation de la modélisation numérique et de l'impression 3D dans la fabrication de prothèses crâniennes personnalisées. En combinant précision technologique et besoins spécifiques des patients, cette approche offre une solution fiable pour la reconstruction des défauts crâniens, avec des résultats optimisés tant sur le plan esthétique que fonctionnel. Ainsi, la cranioplastie personnalisée représente une avancée majeure dans la prise en charge des patients, avec un potentiel d'amélioration continue grâce aux évolutions technologiques.

CHAPITRE 6 : RESULTATS

6-1 Données Démographiques

25 patients ont bénéficié de la mise en place d'une cranioplastie conçue par la technique de l'impression 3D. Ils sont répartis en 14 hommes (56%) et 11 femmes (44%). L'âge moyen est de 42,7 ans avec une médiane de 44 ans. Le patient le plus jeune avait 8 ans contre 85 ans pour le plus âgé.

A



B

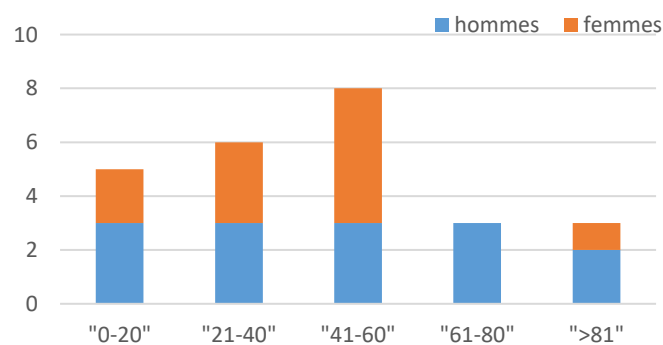


Figure 6.1 : Paramètres démographiques des patients. (A) répartition par sexe. (B) répartition par âge.

6-2 Paramètres du Défaut Crânien

La cause du défaut crânien la plus prédominante était néoplasique (64% des cas) contre la cause traumatique (28% des cas) et l'origine infectieuse (8% des cas). Les pathologies tumorales retrouvées sont représentées par le tableau 6.1.

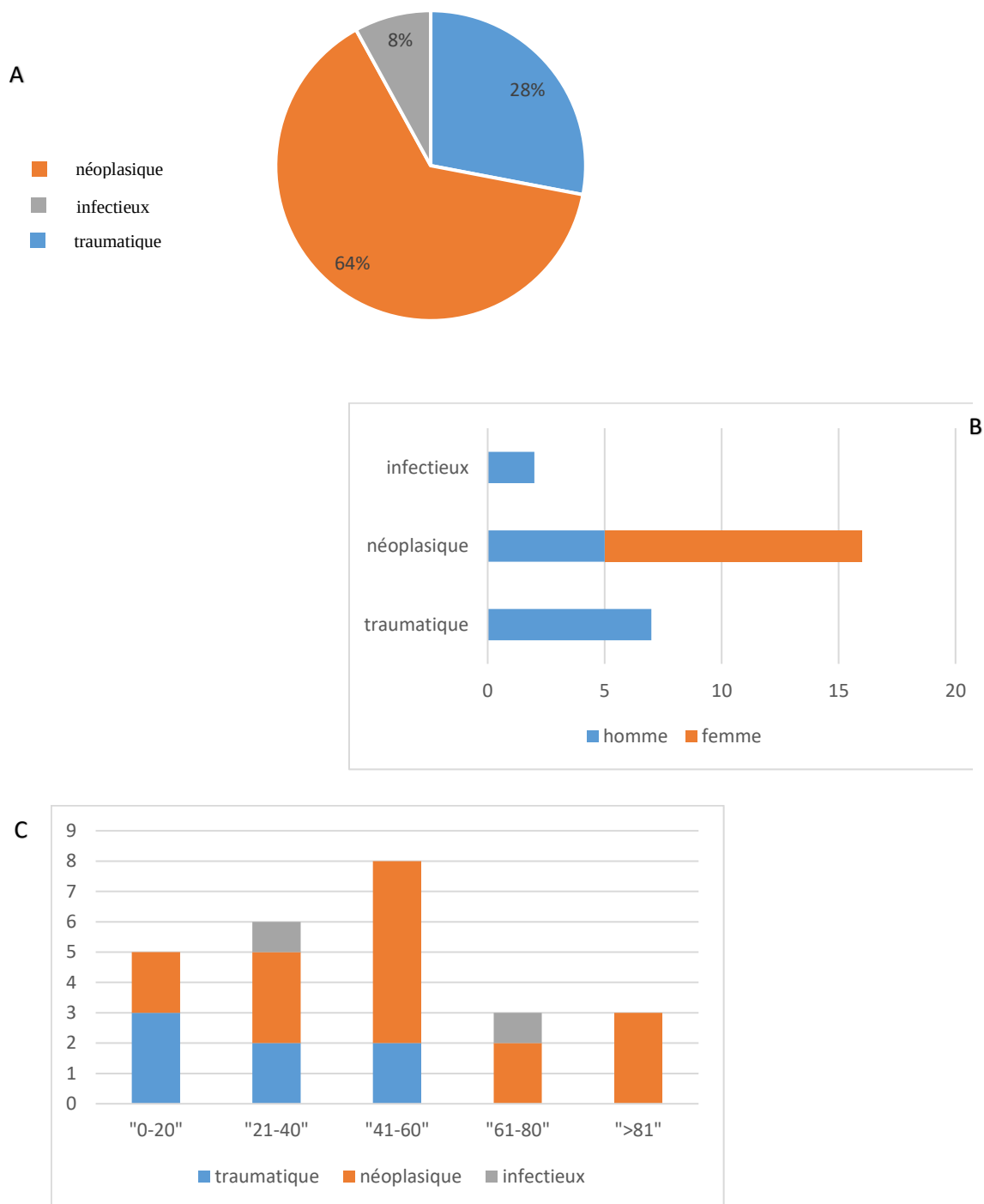
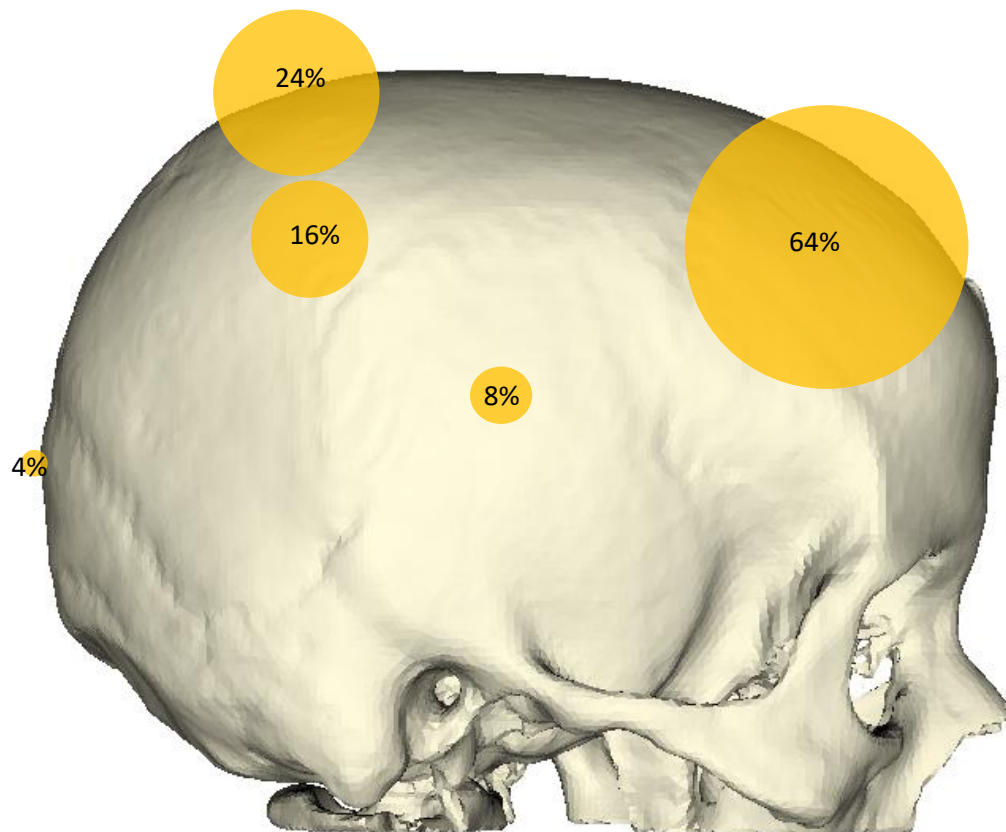


Figure 6.2 : les causes des défauts crâniens des patients. (A) répartition en fonction de l'origine. (B) répartition en fonction du sexe. (C) répartition en fonction de l'âge.

Tableau 6.1 : Les causes tumorales des défauts crâniens.

Pathologie tumorale	Nombre de cas	Pourcentage
Méningiome invasif	8	50%
Mélanome invasif du cuir chevelu	3	19%
Tumeur osseuse	2	13%
Dysplasie fibreuse	1	6%
Glioblastome	1	6%
métastase sein	1	6%

Les localisations du défaut crânien par ordre décroissant étaient : frontale dans (64%), vertex (24%), pariétale (16%), temporale (8%) et occipitale (4%).

**Figure 6.3** : Répartition des défauts crâniens selon leur localisation.

6-3 Paramètres Géométriques et Radiologiques des Crânes des Patients

Concernant la surface du défaut crânien, la moyenne était de $29,46 \text{ cm}^2$ avec une valeur maximale atteignant $62,62 \text{ cm}^2$ et un écart-type de $14,59 \text{ cm}^2$. Cette valeur maximale représentait 15,40 % de la surface crânienne du malade.

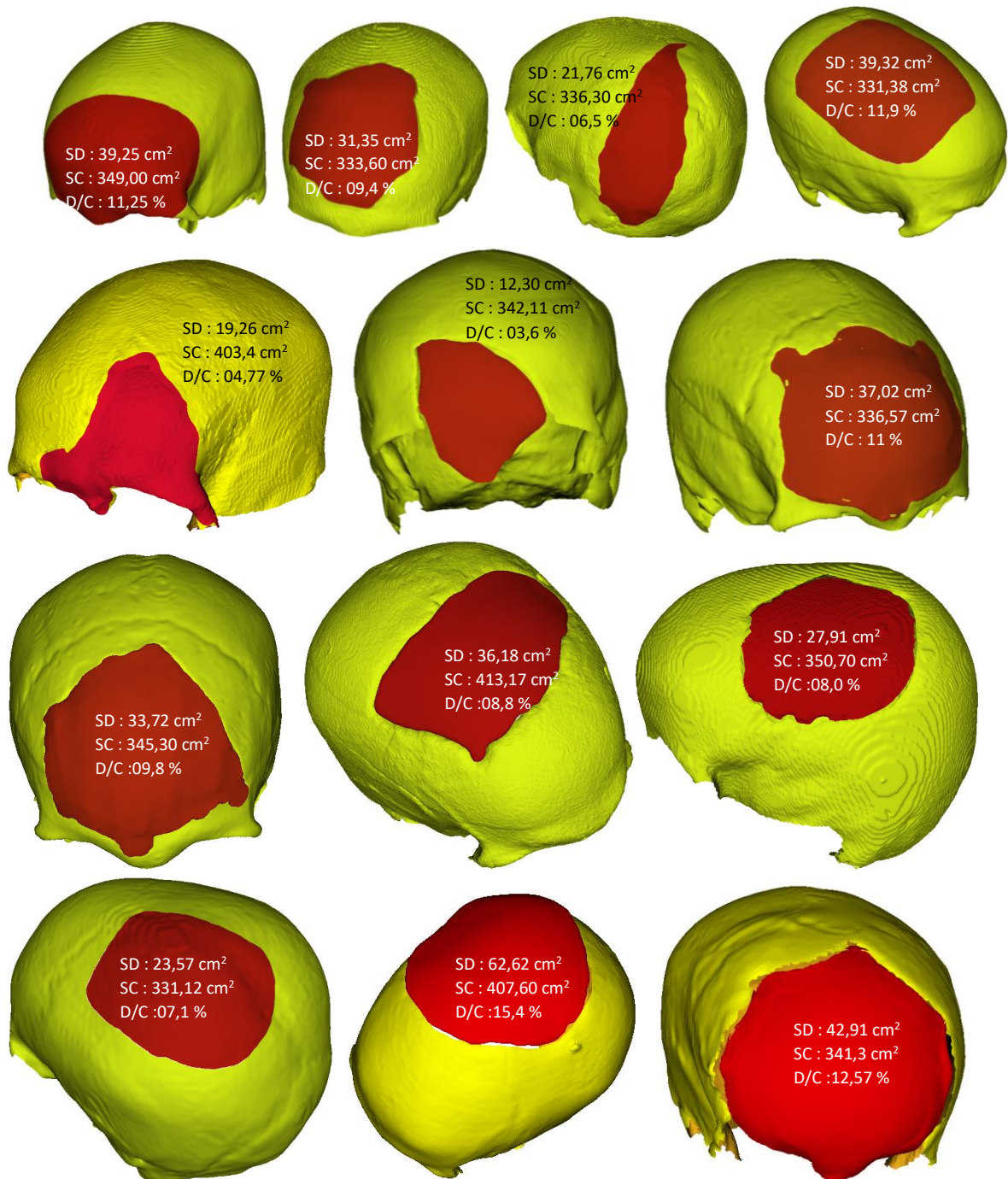


Figure 6.4 : Schéma représentant la localisation, la forme et les paramètres géométrique des défauts crâniens. SD (surface d défaut). SC (surface du crâne). D/C (pourcentage de la surface du défaut par rapport au crâne)

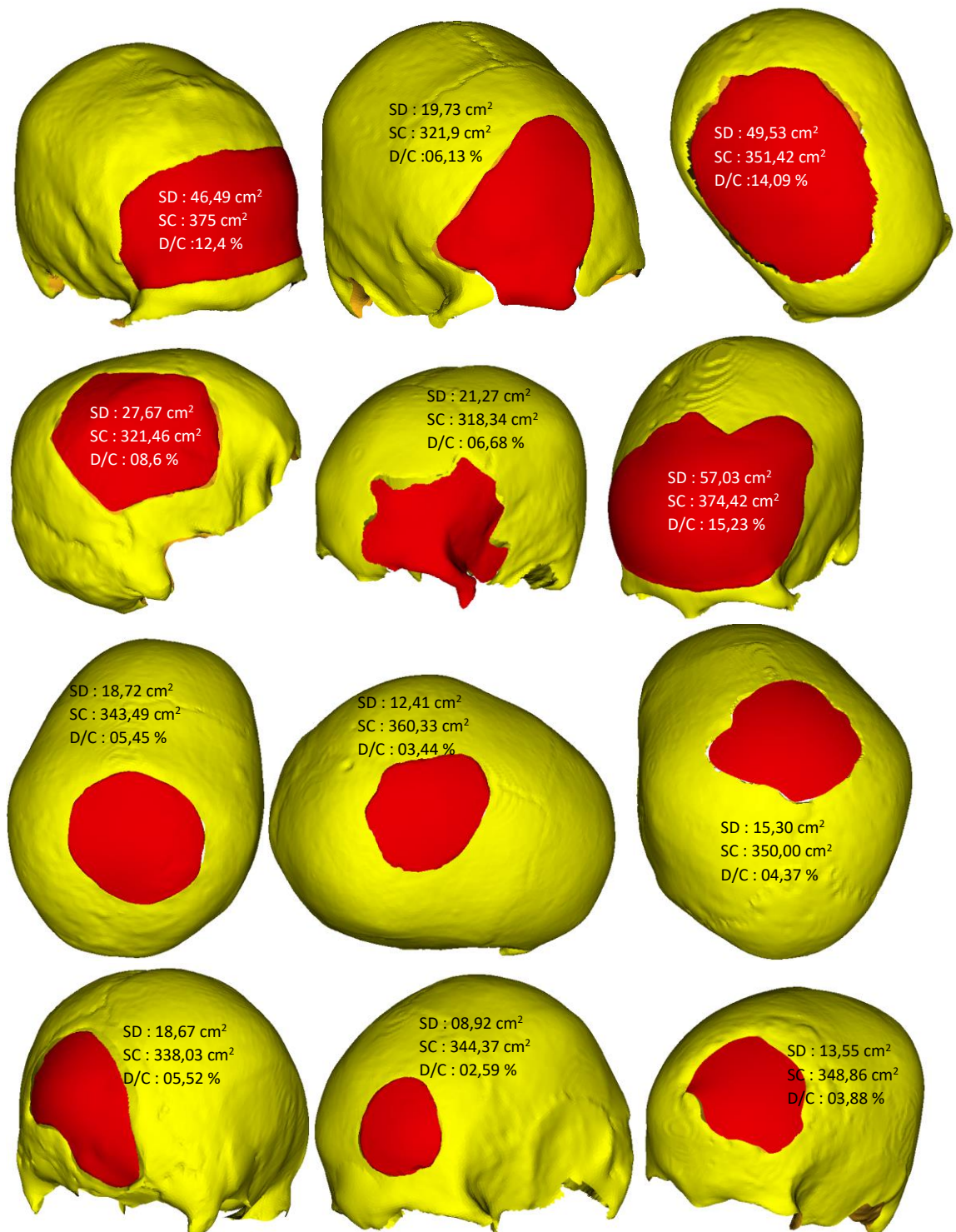


Figure 6.4 : Schéma représentant la localisation, la forme et les paramètres géométrique des défauts crâniens. SD (surface d défaut). SC (surface du crâne). D/C (pourcentage de a surface du défaut par rapport au crâne) (suite)

Les données radiologiques des patients sont représentées par des coupes scannographiques format DICOM. L'épaisseur des coupes variait de 0,5 mm à 1,3 mm. Le nombre de coupe était de 133 pour la valeur minimale à 376 pour la valeur maximale.

Concernant la forme de la calvaria, l'index de symétrie des patients de notre travail variait de 95,8% pour le crâne le moins symétrique à 99,3% pour le crâne le plus symétrique. Donc on n'a pas noté de déformation importante affectant la symétrie crânienne.

Tableau 6.2 : les distances en millimètres entre les points crâniens latéraux (droits et gauches) et médiaux et l'index de symétrie des patients.

	B-AD	B-AG	B-PD	B-PG	L-AD	L-AG	L-PD	L-PG	N-AD	N-AG	N-PD	N-PG	O-AD	O-AG	O-PD	O-PG	PD-AD	PG-AG	LS (%)
cas1	143.5	140.4	95.81	98.95	93.27	87.32	137	139.2	153.1	154.2	76.19	69.65	65.8	67.22	114.4	111.6	94.85	97.27	96.5
cas2	141.5	146.3	98.38	101.3	89.93	87.69	145	141.7	145.5	150.3	65.88	63.63	66.32	64.05	120.4	113.3	97.24	99.05	96.7
cas3	142.5	146.7	105.6	104.9	88.08	94.75	141.1	141.2	137.4	138	59.24	63.39	63.35	59.26	110.6	109.7	92.64	91.71	97.1
cas4	139.9	142.6	99.14	101.9	85.65	80.2	143.6	144.1	147.4	153.5	67.46	66.35	66.27	63.57	117.8	114.8	91.42	97.83	96.6
cas5	146.8	146.6	104	109.3	93.7	84.5	151.3	151.3					74.98	72.91	118.5	117.1	99.12	101.3	96.8
cas6	137.8	136	105.3	100.2	96.95	92.94	147.7	145					68.81	69.28	113.9	119.7	97.97	98.52	97.3
cas7	135.9	135.9	96.82	99.13	100.3	95.48	136	138.8	136.6	140.9	67.31	61.83	69.96	68.82	103.7	101.8	79.19	86.71	96.3
cas8	141.2	140.6	102.6	102.7	97.32	94.38	150.3	147.9	149.4	148	67.57	66.57	64.87	64.76	116.7	115.6	97.65	95.96	98.8
Cas9					94.28	91.82	165.4	159	164.7	164.9	67.2	70.72	67	70.59	123.2	117	114.3	106.7	95.8
cas10	141.6	141	102.7	103.2	85.36	83.81	142.8	143.6	156.9	157.7	73.49	73.61	64.75	64.07	117.6	117.8	98.18	99.43	99.3
cas11	136.5	141.4	96.82	96.39	79.94	87.28	136.6	135	140.3	145.1	70.31	74.76	65.96	66.7	118.2	113.9	93.47	91.78	96.7
cas12					99.84	96.79	157.2	157.3	161.3	162	68.74	69.84	69.22	68.95	129.9	136.3	108.5	113.7	97.9
cas13	142.7	139.4	96.59	99.9	87.07	85.48	141.5	143.8	150.8	146.5	72.68	65.78	63.27	63.19	112.6	111.6	96.17	94.74	97.2
cas14	146.9	146.2	111.8	112.1	84.45	84.67	160	152	165.5	165	65.03	72.62	67.08	69.62	117.3	110	115.1	104.1	95.8
cas15	138.7	137.4	92.99	95.85	91.82	86.02	140.8	135.8					64.85	65.84	125.9	117.7	99.29	94.51	96.0
cas16					88.36	90.68	152.6	151.2	148.9	149	70.65	66.21	65.91	62.14	115	108.5	94.82	93.96	96.7
cas17	130.7	131	96.81	91.55	86.61	77.04	139.2	131.5	139.3	142.4	63.66	63.82	69.69	67.55	113.7	110.9	91.04	92.69	96.2
Cas18	140.1	137	98.24	96.01	88.52	81.14	135.3	133.4	145.5	148.2	60.97	64.07	64.87	65.17	111.2	111.7	96.62	98.42	97.3
Cas19	142.1	142.3	108.2	108.7	89.11	89.15	156.3	154.2	155.8	155.4	61.79	62.34	64.07	62.75	115	111.6	107.6	104.8	98.8
cas20	138.7	137.2	102.7	99.72	79.27	84.88	152.8	149.7	155.8	150.2	67.09	68.67	59.92	63.98	109.6	111.1	102.5	94.13	96.1
cas21	145.8	141.4	104.1	99.56	87.06	90.6	138.6	142.3	148.5	142.2	70.29	72.49	68.77	68.18	112.6	120.9	92.92	91.8	96.6
cas22	139.5	139.9	104.7	103	95.49	93.29	151.3	146.6	144.4	143.5	63.72	64.03	59.47	61.65	112.6	111.9	97.56	94.84	98.3
cas23	137.7	135.6	99.2	98.65	86.87	83.6	141.9	136.5	148.8	147.4	69.02	71.74	59.75	59.96	117.3	113.3	99.52	93.25	97.2
cas24	146.2	144	102.5	96.63	78.94	77.99	135.2	131.2	159.4	159.8	70.35	76.62	73.63	72.28	122.6	122.2	104.4	101.1	97.1
Cas25	141.4	140.4	103.2	106.4	94.39	95.06	150.2	151.5	142.7	142.2	57.13	55.59	63.59	65.02	113.5	116.5	98.9	100.1	98.4

(B-AD :bregma-asthérien droit, B-AG : bregma-asthérien gauche, B-PD bregma-ptérien droit, B-PG bregma-ptérien gauche, L-AD :lambda-asthérien droit, L-AG : lambda -asthérien gauche, L-PD lambda -ptérien droit, L-PG lambda -ptérien gauche, N-AD :Nasion-asthérien droit, N-AG : Nasion -asthérien gauche, N-PD Nasion -ptérien droit, N-PG Nasion-ptérien gauche, O-AD :opisthion-asthérien droit, O-AG : opisthion -asthérien gauche, O-PD opisthion -ptérien droit, O-PG opisthion -ptérien gauche, PD-AD : ptérien droit- asthérien droit, PG-AG : ptérien gauche- asthérien gauche)

LS index de symétrie.

Les cellules grises représentent des données manquantes (missed data) à cause de la localisation du point crânien en plein défaut crânien.

Commentaire du tableau 6.2 : Ce tableau regroupe les différentes distances mesurées entre les points crâniens latéraux et les points crâniens médians. Les colonnes vertes représentent les distances droites tandis que les colonnes oranges pour les distances gauches.

Exemple : le patient (cas 10) $N-PD = 73,49$ mm et $N-PG = 73,61$ mm signifie que la distance entre le nasion et le ptérion droit est de 73,49 mm contre 73,61 mm pour la distance entre le nasion et le ptérion gauche.

Les cellules grises sont des données manquantes (missed data) à cause de la localisation du point crânien en plein défaut crânien.

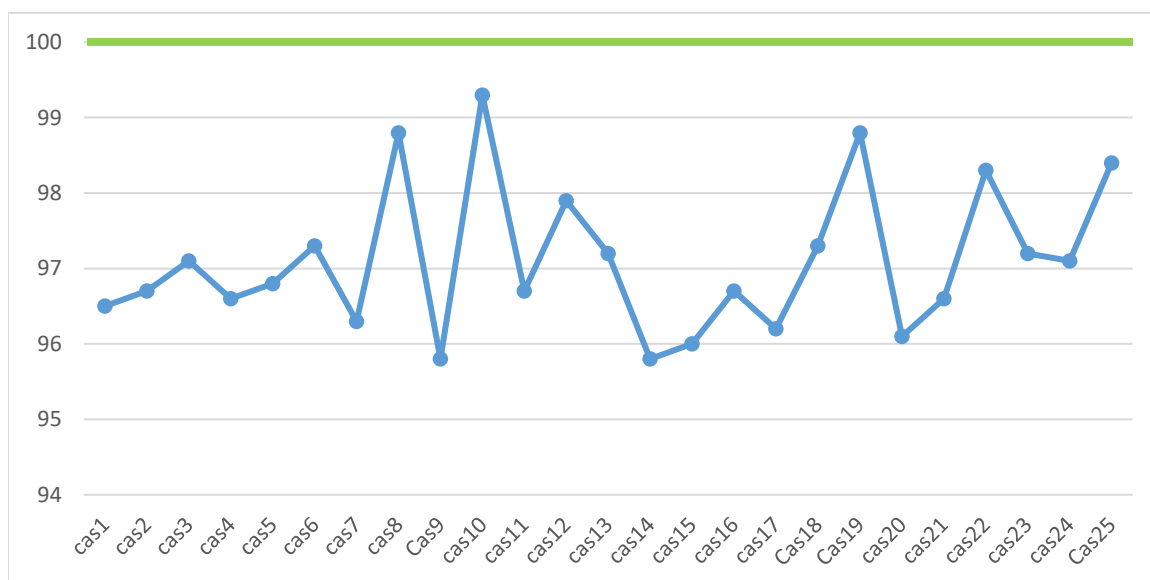


Figure 6.5 : Index de symétrie de la calvaria des patients présentant des défauts

Commentaire de la figure 6.5 : ce graphique montre les index de symétrie crânienne calculés à partir des paires de distances droites et gauches mesurées entre les points crâniens latéraux et médians. La barre verte correspondant à la symétrie parfaite (100%) : le rapport de n'importe quelle distance droite sur la distance gauche correspondante équivaut à 1. On remarque que le patient (cas 10) se rapproche de la symétrie parfaite avec un index de 99,3%.

6-4 Caractéristiques du Moule :

La conception du moule numérique reposait sur la localisation du défaut crânien. Pour les atteintes latérales la conception est réalisée par symétrie de la partie saine du crâne contrairement aux défauts médiaux qui nécessitaient un traitement plus poussé. Pour nos patients, 64% avait des lésions de la ligne médiane contre 36% des défauts latéraux. (Figure 6.6)

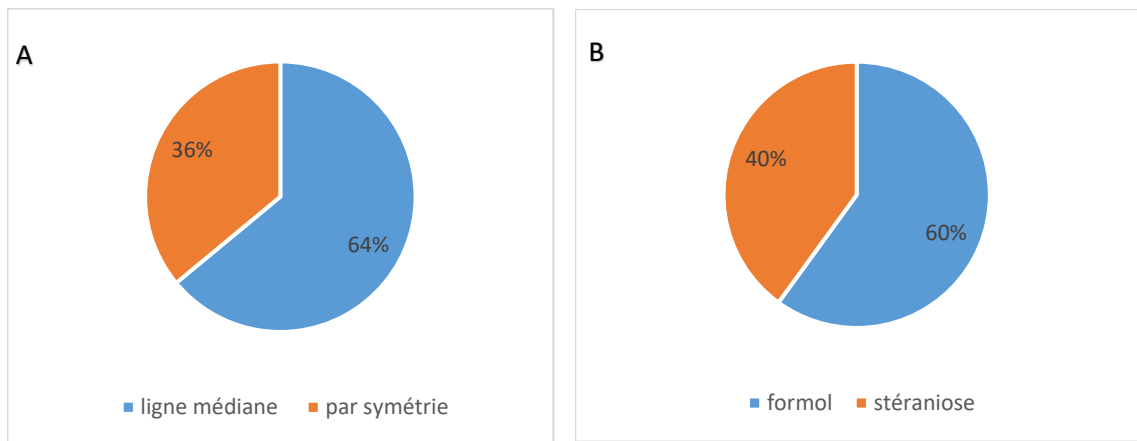


Figure 6.6 : Paramètres du moule servant comme guide pour la cranioplastie. (A) répartition selon la conception par symétrie ou de la ligne médiane. (B) méthode de stérilisation.

Le matériau utilisé pour l'impression du moule est le PLA de 1,75 mm de diamètre. Les paramètres de durée d'impression et de longueur de filament consommé sont représentés par le tableau 6.3.

La stérilisation du moule physique est faite par l'incubation au formol dans 60% des cas contre une solution désinfectante type stéraniros dans 40% des cas.

Tableau 6.3 : Répartition des malades en fonction des paramètres de leur Moule : méthode de conception par symétrie ou de la ligne médiane, temps d'impression, longueur de filament PLA consommé et la méthode de stérilisation.

Patient	Conception	Temps d'impression	Longueur filament	Méthode de stérilisation
Cas 1	Ligne médiane	6h 16m	14994 mm	formol
Cas 2	Ligne médiane	5h 27m	13398 mm	formol
Cas 3	Par symétrie	6h 6m	15822 mm	formol
Cas 4	Par symétrie	11h 10m	27161 mm	formol
Cas 5	Par symétrie	3h 16m	8607 mm	steraniose
Cas 6	Ligne médiane	1h 45m	4481 mm	steraniose
Cas 7	Ligne médiane	4h 34m	11341 mm	steraniose
Cas 8	Ligne médiane	5h 1m	12975 mm	formol
Cas 9	Ligne médiane	6h 18m	15865 mm	formol
Cas 10	Ligne médiane	16h 2m	46263 mm	steraniose
Cas 11	Par symétrie	3h 9m	7886 mm	formol
Cas 12	Ligne médiane	4h 46m	13194 mm	formol
Cas 13	Ligne médiane	7h 27m	17995 mm	formol
Cas 14	Ligne médiane	5h 11m	14112 mm	steraniose
Cas 15	Ligne médiane	2h 52m	7563 mm	formol
Cas 16	Par symétrie	5h 7m	15535 mm	formol
Cas 17	Par symétrie	3h 36m	8822 mm	steraniose
Cas 18	Par symétrie	2h 55m	7155 mm	steraniose
Cas 19	Ligne médiane	7h 37m	19003 mm	formol
Cas 20	Ligne médiane	2h 18m	5739 mm	steraniose
Cas 21	Ligne médiane	1h 26m	3528 mm	formol
Cas 22	Ligne médiane	2h 7m	5208 mm	steraniose
Cas 23	Ligne médiane	2h 33m	6150 mm	formol
Cas 24	Par symétrie	1h 17m	3141 mm	formol
Cas 25	Par symétrie	1h 55m	4585 mm	steraniose

Commentaire du tableau 6.3 : Ce tableau représente des paramètres concernant la conception du moule. Pour les patients présentant une perte de substance latérale, la conception numérique de leur moule reposait sur la symétrie du côté sain du crâne. Pour les défauts crâniens médians, la conception nécessitait plus de traitement.

La durée de l'impression et la longueur du filament consommé sont le reflet des dimensions du moule : Plus un moule est volumineux, plus il consomme de matière et plus son temps d'impression est long.

La stérilisation est réalisée par incubation du moule physique dans du formol pendant 72 heures ou par l'application d'une solution bactéricide, fongicide et virucide de type Stéraniose.



Figure 6.7 : Photos per-opératoires des moules imprimés en 3D servant comme guide pour la conception de la cranioplastie avec la prothèse en ciment osseux démoulée

6-5 Paramètres Chirurgicaux des Cranioplasties

Pour la chirurgie de mise en place de prothèse crânienne, le délai moyen entre le premier geste de craniectomie et le deuxième geste de placement de la cranioplastie est de 31 mois, avec des délais extrêmes de 0 mois (dans le même temps opératoire) et 400 mois pour le délai maximal.

L'approche chirurgicale était tributaire de la localisation du défaut crânien (voir tableau 6.4).

Un ajustement per opératoire de la cranioplastie - qui est faite en méthyl acrylate - était nécessaire pour garantir son encastrement dans le défaut crânien chez 5 cas (20%).

Pour la méthode de fixation de la prothèse, le fil est utilisé dans la quasi-totalité des cas. Un seul cas a bénéficié d'une fixation aux mini-plaques.

Les complications liées à la mise en place de la prothèse sont comme suit :

- Surélévation de la cranioplastie chez 3 patients (deux entre eux étaient des enfants due à l'ossification à distance, la surélévation n'était pas disgracieuse et cachée par la chevelure, le troisième un jeune adulte le déplacement était à cause du lâchage de fils de fixation nécessitant une ré-opération)
- Une érosion cutanée à distance à cause d'une cranioplastie frontale recouverte par une peau fine tendue nécessitant une réparation cutanée.
- Un seul cas d'infection survenue 3mois après le geste chirurgical. Le patient était diabétique, avait subi une réparation osseuse plus une plastie cutanée. cette complication nous a obligé l'ablation de la prothèse.

Tableau 6.4 : Les paramètres chirurgicaux des cranioplasties : l'approche chirurgicale, le délai entre la craniectomie et la mise en place de la cranioplastie (en mois), l'ajustement per-opératoire de la prothèse, la méthode de fixation et les complications.

Patient	Approche	Délai (mois)	Ajustement	Fixation	Complication
Cas 1	Incision bi-coronale	0	oui	Fils non résorbable	
Cas 2	Incision bi-coronale	13	non	Fils non résorbable	
Cas 3	Linéaire rétro auriculaire	110	non	Fils non résorbable	surélévation
Cas 4	Arciforme pariétale	0	oui	Fils non résorbable	
Cas 5	Incision bi-coronale	1	non	Plaques + vis	
Cas 6	Incision bi-coronale	4	non	Fils non résorbable	
Cas 7	Incision bi-coronale	5	non	Fils non résorbable	Erosion cutanée
Cas 8	Incision bi-coronale	3	non	Fils non résorbable	
Cas 9	Arciforme pariétale	21	non	Fils non résorbable	
Cas 10	Arciforme pariétale	0	oui	Fils non résorbable	
Cas 11	Arciforme temporale	6	non	Fils non résorbable	surélévation
Cas 12	Arciforme pariétale	400	non	Fils non résorbable	
Cas 13	Incision bi-coronale	10	non	Fils non résorbable	
Cas 14	Incision bi-coronale	3	non	Fils non résorbable	
Cas 15	Incision bi-coronale	7	oui	Fils non résorbable	Ré-opération (prothèse surélevée)
Cas 16	Arciforme pariétale	6	non	Fils non résorbable	
Cas 17	Arciforme pariéto-temporale	9	non	Fils non résorbable	
Cas 18	Incision bi-coronale	1	oui	Fils non résorbable	
Cas 19	Incision bi-coronale	14	non	Fils non résorbable	
Cas 20	Perte de substance nécessitant une plastie cutanée	0	non	Fils non résorbable	Infection à distance
Cas 21	Perte de substance nécessitant une plastie cutanée	0	non	Fils non résorbable	
Cas 22	Perte de substance nécessitant une plastie cutanée	0	non	Fils non résorbable	
Cas 23	incision occipitale médiane	10	non	Fils non résorbable	
Cas 24	Incision bi-coronale	8	non	Fils non résorbable	
Cas 25	incision arciforme frontale	144	non	Fils non résorbable	



Figure 6.8 : Photos per-opératoires de patients qui ont bénéficié d'une cranioplastie conçue en utilisant l'impression 3D.

6-6 Satisfaction :

Pour la satisfaction, les malades ont apprécié le résultat de la réparation crânienne par la cranioplastie conçue par impression 3D. Les scores de satisfactions étaient de 4/5 à 5/5.

On a noté un changement dans l'attitude vestimentaire (suppression de la casquette) et régression de l'isolement et la dépression.

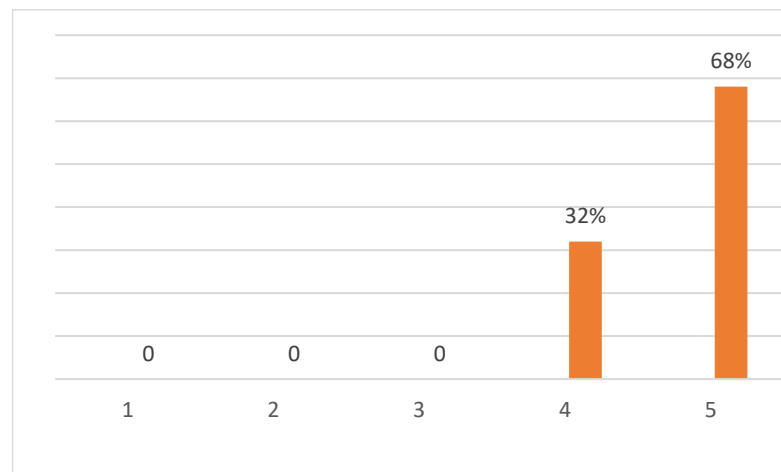
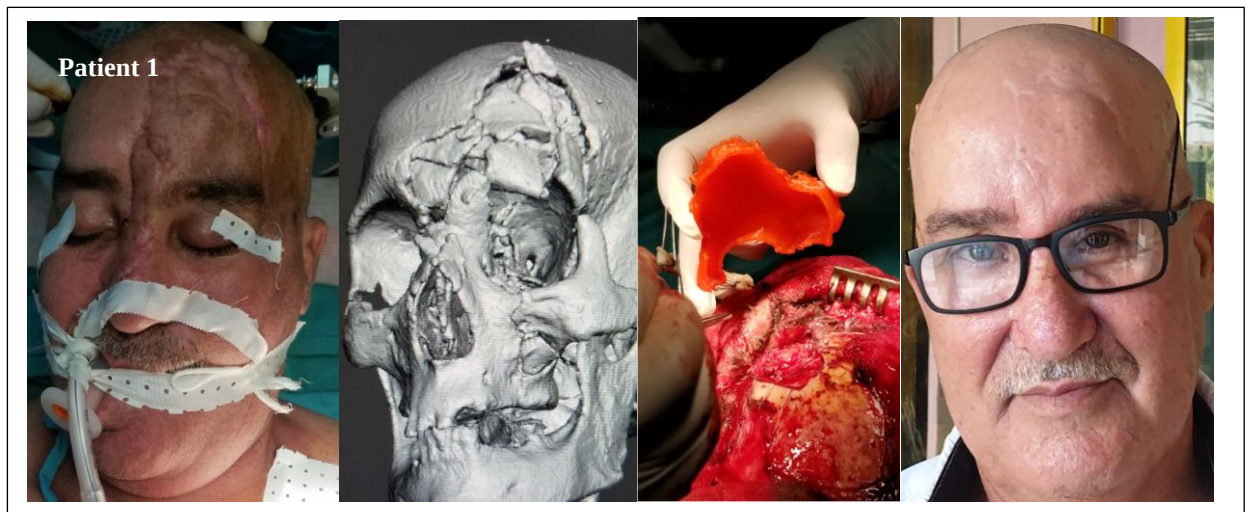


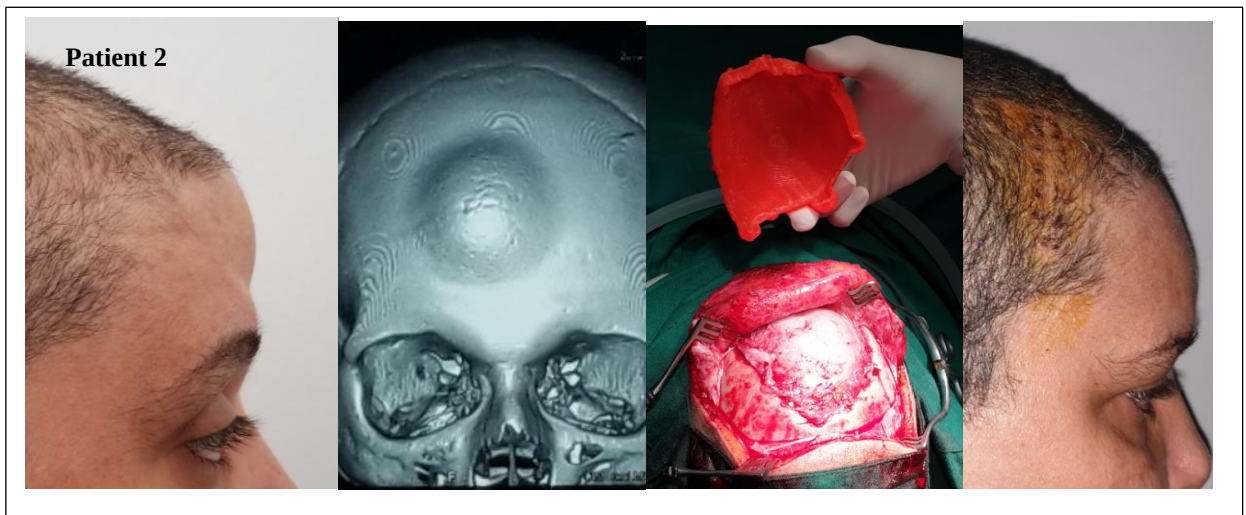
Figure 6.9 : Score de satisfaction des Patients qui ont subi une cranioplastie par impression 3D.

(1/5) très insatisfait. (2/5) insatisfait. (3/5) neutre. (4/5) satisfait. (5/5) très satisfait.

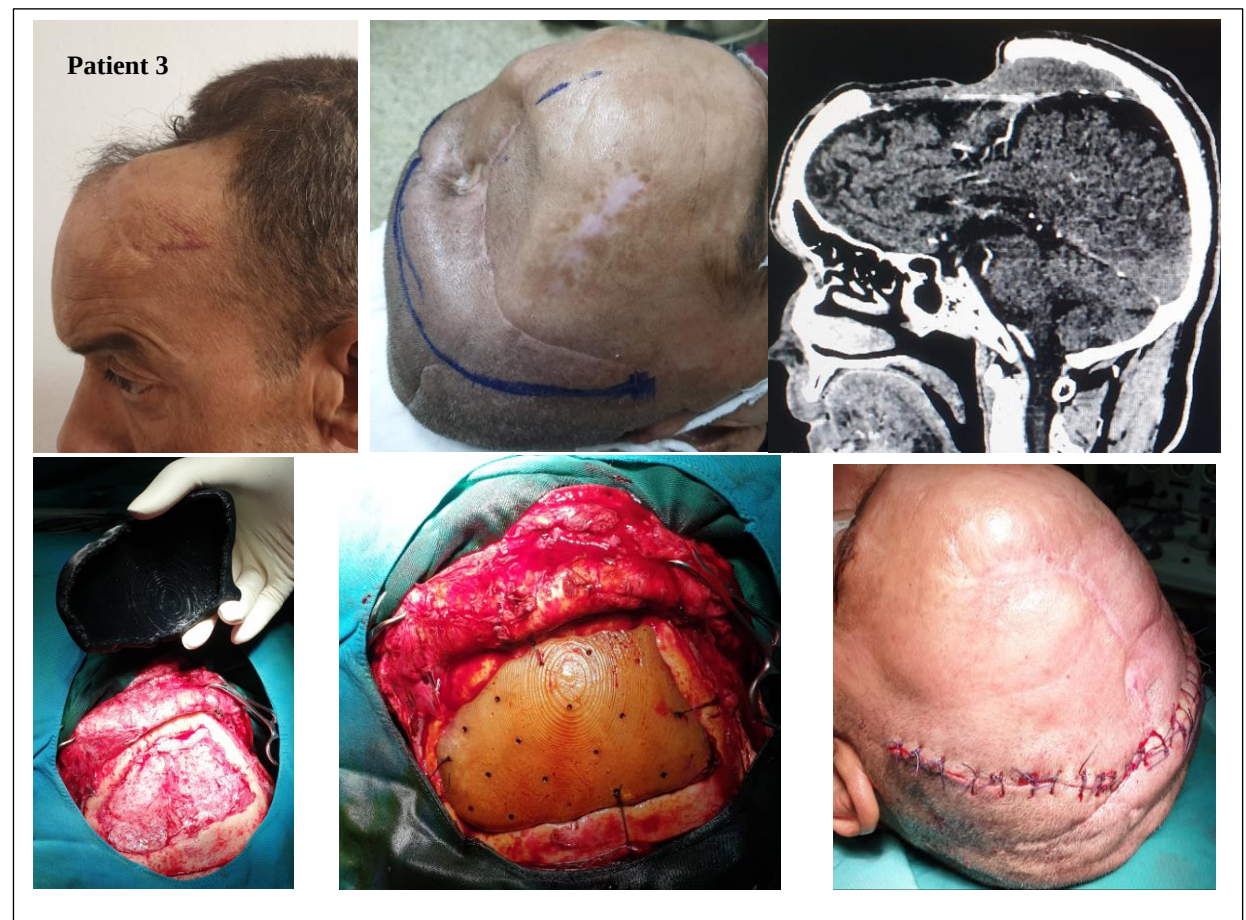


Patient 1 : Traumatisme crânio-facial suite à un accident de la circulation (accident des 2 roues)

Figure 6.10 : Photos de Patients qui ont subi une cranioplastie par impression 3D. (pré-opératoire, TDM, per-opératoire et résultat après l'intervention.

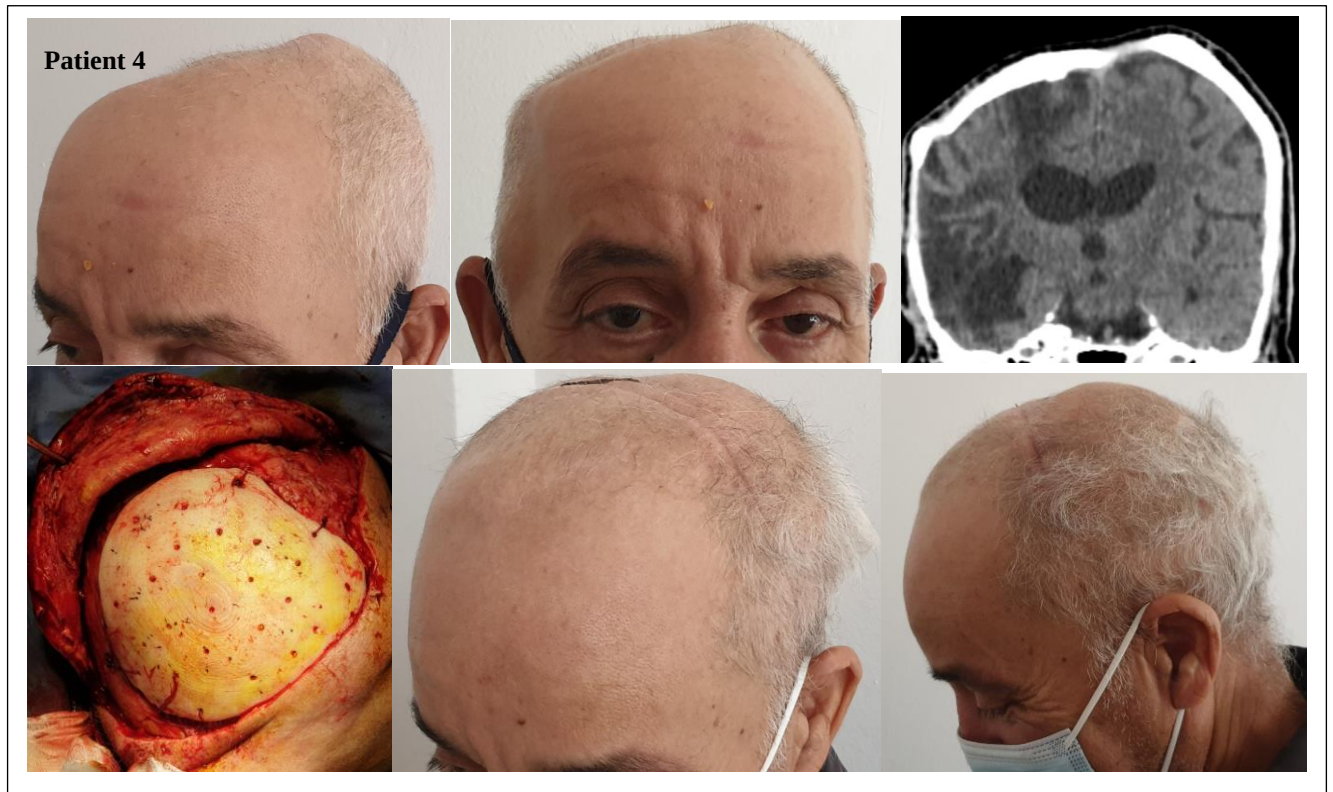


Patient 2 : excroissance néoplasique de l'os frontal



Patient 3 : Déficit crânien ancien suite à une ostéite complication d'un traumatisme crânien.

Figure 6.10 : (suite) Photos de Patients qui ont subi une cranioplastie par impression 3D. (pré-opératoire, TDM, per-opératoire et résultat après l'intervention.



Patient 4 : Un défaut crânien plus de 30 ans suite à une étiologie néoplasique



Patient 5 : Une perte de substance frontale suite à une ostéite.

Figure 6.10 : (suite) Photos de Patients qui ont subi une cranioplastie par impression 3D. (pré-opératoire, TDM, per-opératoire et résultat après l'intervention.

CHAPITRE 7 : DISCUSSION

Dans ce qui suit, nous menons une discussion qui met en relief les constatations liées aux caractéristiques des défauts crâniens, leurs relations et les avantages de la technique entreprise ainsi que la technologie employée.

7-1 Relation Lésion causale du défaut, l'Age et la Localisation :

Les lésions occasionnant les défauts crâniens peuvent être âge et sexe dépendantes. Dans notre travail, nous relevons les constatations suivantes :

- Les méningiomes invasifs se rencontrent chez 04 femmes contre 03 hommes, la localisation préférentielle est frontale ou fronto-orbitaire chez les 04 femmes contre pariétale chez 02 des 03 hommes. L'âge de survenue pour les deux sexes est l'adulte (35ans à 70ans).
- Les lésions traumatiques sont toutes remarquées chez les hommes (7 cas avec un enfant présentant une « growing fracture » négligée tandis que les autres sont de jeunes adultes). La cause la plus fréquente du traumatisme crânien était l'accident des 02 roues.
- Les lésions cutanées invasives type mélanome du cuir chevelu surviennent chez la population sénile (3 cas âgés de 83ans à 85ans). Le siège de prédilection de cette affection est le vertex.
- Les tumeurs osseuses se rencontrent chez la population pédiatrique (3 cas) avec un siège antérieur fronto-temporal (un cas fronto-orbitaire, un cas fronto-orbito-temporal et un cas temporal). Les 03 patients sont de sexe féminin.

7-2 La géométrie crânienne :

La surface exocrânienne de la calvaria est dépendante de l'âge et du sexe du malade. La moyenne chez les hommes était de 359,52 cm² (valeurs extrêmes 413,17 cm² et 321,90 cm²) contre 338,70 cm² chez les femmes (valeurs extrêmes 360,33 cm² et 318,34 cm²).

Le calcul de l'index de symétrie crânienne n'a pas montré dans notre échantillon une asymétrie aberrante impactant la conception du moule qui servira comme support pour la cranioplastie.

7-3 La conception du moule :

Contrairement aux lésions de siège médian, les défauts crâniens latéraux facilitent la génération du moule numérique avec risque d'erreur minime. L'opération effectuée étant une symétrie du côté sain du crâne pour créer la surface manquante du défaut crânien. Cette surface formera le fond du moule numérique puis physique après impression 3D.

7-4 L'ajustement per-opératoire de la cranioplastie :

La prothèse crânienne une fois confectionnée par l'application du ciment osseux sur le moule préalablement conçu et imprimé, a nécessité des ajustements chez 05 patients, 03 d'entre eux ont subi le geste de la craniectomie, la confection de la cranioplastie et sa mise en place dans le même temps opératoire. La conception du moule était approximative vu l'absence des dimensions exactes du futur défaut crânien.

La non correspondance de la prothèse chez les 02 autres cas est dû à la fibrose et aux parties molles qui entravaient sa mise en place.

7-5 Les complications :

Les patients dans notre travail ont tous bénéficié d'une cranioplastie réalisée à base du ciment osseux (méthylacrylate). Nos résultats confirment la biocompatibilité de ce matériau vu l'absence de réactions allergiques ou toxiques.

- La surélévation et déplacement de la prothèse : Cette complication est survenue chez 03 cas : 02 cas pédiatriques à cause de l'ossification à distance du geste de réparation. La surélévation n'étant pas disgracieuse et cachée par la chevelure, d'où l'intérêt d'une abstention thérapeutique chez les enfants et de favoriser l'ossification naturelle.
- Pour l'infection : Un seul cas a développé un empyème à distance du geste opératoire (trois mois). Le profil clinique de ce patient est particulier : diabétique subissant la mise en place d'une prothèse crânienne et d'une greffe cutanée, le tout réalisé en un seul temps opératoire.
- Une érosion cutanée est constatée chez un seul cas, la peau qui recouvrait la prothèse étant très fine et sous tension.

Le reste des malades ont montré une bonne tolérance.

L'utilisation de moule en PLA, conçu préalablement par impression 3D et stérilisé par le formol ou le stérilisateur, n'a pas affecté la survenue de risque de complication.

Donc grâce à ce procédé, le temps opératoire est écourté, un atout en faveur d'une bonne évolution. ([Jaberi2013], [Feroze2015])

7-6 La disponibilité :

Le ciment osseux est un matériau largement connu et utilisé par les neurochirurgiens et les traumatologues. Il a prouvé son efficacité dans les réparations osseuses. Même s'il fait défaut en milieu hospitalier, son acquisition du marché est à la portée de tout budget. Les imprimantes 3D sont devenues de plus en plus disponibles et moins coûteuses ainsi que leurs consommables PLA.

7-7 La précision :

Grâce à l'impression 3D, les prothèses crâniennes sont devenues plus personnalisées et plus précises. La conception du moule à partir des données radiologiques du patient offre une correction inégalée de la perte osseuse. Le défaut crânien sur les images scannographiques, le moule numérique et le physique après son impression gardent les mêmes dimensions. Le ciment osseux grâce à sa maniabilité contribue aussi à cette précision. ([Galvez2019])

7-8 La simplicité :

La conception de la cranioplastie sur mesure est rendue aisée par le procédé de l'impression du moule et l'application du méthylacrylate dessus. Malgré le degré de sophistication qu'offre cette technique, le volet numérique reste simple, se réalise grâce à quelques étapes par des logiciels libres (freewares) et téléchargeables gratuitement du net. Quant à la confection de la prothèse en per-opératoire, le geste est facilité par cette méthode et la maniabilité du ciment osseux. La prothèse s'adapte parfaitement au défaut crânien, les ajustements autrefois réalisés sont éliminés significativement, le temps chirurgical est ainsi réduit, diminuant tout risque anesthésique ou de complications.

7-9 Le coût :

Ce procédé offre un rétablissement d'une anomalie souvent disgracieuse à moindre coût, les matériaux utilisés, que ce soit pour la prothèse crânienne le ciment osseux ou le consommable de l'impression 3D le PLA, sont de plus en plus abordables. Les imprimantes 3D, autrefois des machines énormes et coûteuses, sont devenues de plus en plus compactes et accessibles. Une imprimante 3D de bureau, non encombrante, offre une qualité d'impression satisfaisante qui peut répondre aux exigences de cette chirurgie esthétique. Cette technique personnalisée est considérée le choix le plus économique. ([Yerragunta2021])

7-10 La satisfaction :

Tous les malades ont éprouvé une grande satisfaction vis-à-vis des réparations crâniennes réalisées grâce à cette technique. Un rétablissement esthétique et surtout psychologique a été noté chez les patients, surtout ceux qui présentaient des défauts crâniens disgracieux. Les patients rapportent une amélioration significative de leur qualité de vie et de comportement ainsi qu'une meilleure intégration sociale.

7-11 Technique innovante :

Les cranioplasties réalisées par impression 3D liées à un traitement sophistiqué d'images représentent une avancée majeure dans le domaine de la réparation crânienne. Cette technique offre une personnalisation de la prise en charge, une optimisation du processus chirurgical, une liberté et flexibilité dans la conception des formes les plus complexes.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La technologie numérique devient de plus en plus puissante et pointue dans la modélisation de géométries complexes telles que l'anatomie du crâne. La restauration de la partie manquante dans les défauts crâniens représente un défi majeur qui doit garantir la réalisabilité et le résultat esthétique.

Notre thèse a abordé la restauration anatomique des défauts crâniens par un procédé innovant en utilisant l'impression 3D. Les cranioplasties réalisées sont conçues sur mesure à partir d'un moule généré en exploitant les données radiologiques des patients et imprimé en 3D. Les points forts de cette technique résident principalement dans son aspect très économique, pratique et réalisable quel que soit la nature de la perte osseuse. Malgré la simplicité et l'aspect abordable de cette solution, ses résultats sont précis (contrairement à la confection manuelle libre) avec un minimum de complications.

En effet, nous avons conçu des moules en PLA (à partir d'une imprimante 3D standard) qui ont servi comme guide pour le façonnage de la cranioplastie en utilisant le ciment osseux. Ces deux matériaux sont disponibles, abordables, biotolérables et stérilisables. La modélisation du moule numérique passe tout d'abord par l'étape de segmentation qui génère un modèle 3D du crâne du patient à partir de ses données scanographiques (images DICOM). Ensuite et grâce à des étapes simples de traitement d'image, le modèle final du moule à imprimer est réalisé.

Une fois le moule physique fabriqué, il est stérilisé et sur lequel est appliqué en per-opératoire le ciment osseux. La cranioplastie est synthétisée ainsi après démoulage lors de l'intervention et sa mise en place sur le patient.

Lors de la réalisation du moule numérique, l'appréciation de la symétrie crânienne des patients de notre échantillon est capitale. Cette opération permet de générer la partie manquante du défaut crânien à partir du côté sain. Son évaluation est faite par l'appréciation de l'index de symétrie : des rapports de paires de distances entre les points crâniens latéraux (droits et gauches) et médiaux ont été calculés.

Cette démarche optimise le geste chirurgical de réparation en réduisant à la fois le temps opératoire et le risque de complications avec un résultat esthétique satisfaisant. Elle offre une personnalisation de la prise en charge à moindre coût. Aussi, elle apporte un guide pédagogique profitable à l'apprentissage.

Du fait que le crâne est considéré comme l'anatomie la plus compliquée du squelette humain, cette technique de la réalisation d'un moule imprimé en 3D a permis de surpasser cette difficulté. Par analogie, son extension sur le reste des os est possible. Ce principe peut encore être parfaitement reproduit pour la régénération des parties molles (le pavillon d'oreille, la pyramide nasale) en utilisant des hybrides caoutchouteux tels que le silicone ou tout autre matériau adéquat.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- [Badash2016] Ido Badash, Karen Burt, Carlos A Solorzano, Joseph N Carey. Innovations in surgery simulation: a review of past, current and future techniques. *Ann Transl Med.* 2016 Dec; 4 (23):453.10.21037/atm.2016.12.24
- 2- [Bonfield2014] Christopher M Bonfield, Anand R Kumar, Peter C Gerszten. The history of military cranioplasty. *Neurosurg Focus.* 2014 Apr; 36(4):E18.10.3171/2014.1.FOCUS13504
- 3- [Hoyek2014] Nady Hoyek, Christian Collet, Franck Di Rienzo, Mickael De Almeida. Effectiveness of three-dimensional digital animation in teaching human anatomy in an authentic classroom context. *Anat Sci Educ.* 2014 Nov-Dec;7(6):430-7.10.1002/ase.1446
- 4- [Pettersson2023] Anna F Pettersson , Klas Karlgren , Jonathan Al-Saadi , Hans Hjelmqvist . How students discern anatomical structures using digital three-dimensional visualizations in anatomy education. *Anat Sci Educ.* 2023 May-Jun; 16(3):452-464.10.1002/ase.2255
- 5- [Shepetovsky2021] David Shepetovsky, Gianluca Mezzini, Lorenzo Magrassi. Complications of cranioplasty in relationship to traumatic brain injury: a systematic review and meta-analysis. *Neurosurg Rev.* 2021 Dec; 44(6):3125-3142.10.1007/s10143-021-01511-7
- 6- [Aciduman2021] Ahmet Aciduman, Çağatay Aşkit. A Study on Head Wounds in *Kitāb al-'Umda fī Şinā'a al-Jirāḥa* by Ibn al-Quff. *World Neurosurg.* 2021 Sep; 153:84-90.10.1016/j.wneu.2021.06.017

- 7- [Aimar2019] Anna Aimar , Augusto Palermo , Bernardo Innocenti . The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. J Healthc Eng. 2019 Mar 21;2019:5340616.10.1155/2019/5340616
- 8- [Alkhaibary2020] Ali Alkhaibary, Ahoud Alharbi, Nada Alnefaie, Abdulaziz Oqalaa Almubarak. Cranioplasty: A Comprehensive Review of the History, Materials, Surgical Aspects, and Complications. World Neurosurg. 2020 Jul; 139:445-452.10.1016/j.wneu.2020.04.211
- 9- [Annan2015] Mariam Annan, Bertrand De Toffol, Caroline Hommet, Karl Mondon. Sinking skin flap syndrome (or Syndrome of the trephined): A review. Br J Neurosurg. 2015 Jun; 29(3):314-8.10.3109/02688697.2015.1012047
- 10- [Ashayeri2016] Kimberly Ashayeri, Eric M. Jackson, Judy Huang, Henry Brem, Syndrome of the Trephined: A Systematic Review. Neurosurgery 2016. 79:525–534.10.1227/NEU.0000000000001366
- 11- [Ashtiani2019] Abbas Kazemi Ashtiani, Mahdokht Azarbakhsh, Farhad Hafezi. Anthropometric Analysis of the Human Skull for Developmental Left-Sided Asymmetry, New Finding. Aesth Plast Surg 2019. <https://doi.org/10.1007/s00266-019-01526-y>
- 12- [Bader2022] Edward Ranulph Bader, Andrew Joshua Kobets, Adam Ammar, James Tait Goodrich. Factors predicting complications following cranioplasty. J Craniomaxillofac Surg. 2022 Feb; 50(2):134-139.10.1016/j.jcms.2021.08.001
- 13- [Barden1988] R C Barden, M E Ford, W Wilhelm, M Rogers-Salyer, K E Salyer. The physical attractiveness of facially deformed patients before and after craniofacial surgery. Plast Reconstr Surg. 1988 Aug; 82(2):229-35.10.1097/00006534-198808000-00003

- 14- [Belvedere2022] Claudio Belvedere, Maurizio Ortolani, Alberto Leardini, Federico De Iure. 3D Printing in Surgical Planning and Intra-Operative Assistance: A Case Report on Cervical Deformity Correction Surgery. *Appl. Sci.* 2022, 12, 11564.10.3390/app122211564
- 15- [Bisht2019] Bharti Bisht, Ashley Hope, Manash K Paul .From papyrus leaves to bioprinting and virtual reality: history and innovation in anatomy. *Anat Cell Biol.* 2019 Sep; 52(3):226-235.10.5115/acb.18.213
- 16- [Boulos2021] Maged N Kamel Boulos, Peng Zhang .Digital Twins: From Personalised Medicine to Precision Public Health, *J Pers Med* 2021 Jul 29; 11(8):745.10.3390/jpm11080745
- 17- [Carson2014] Larry V Carson, James T Goodrich, Charles J Prestigiacomo. History of craniotomy, cranioplasty, and perioperative care. *Neurosurg Focus.* 2014 Apr; 36(4): Introduction.10.3171/2014.2.FOCUS1470
- 18- [Cassagne2022] Martin Cassagne, Anne-Sophie Claes. Sinking Skin Flap Syndrome, a Rare Complication of Craniectomy. *J Belg Soc Radiol.* 2022 May 27; 106(1):52.10.5334/jbsr.2821
- 19- [Cavalcanti2002] Marcelo de Gusmão Paraiso Cavalcanti, José Leopoldo Ferreira Antunes. 3D-CT imaging processing for qualitative and quantitative analysis of maxillofacial cysts and tumors. *Pesqui Odontol Bras* 2002;16(3):189-194.10.1590/s1517-74912002000300002
- 20- [Chen2018] Sarah A Chen , Chin Siang Ong , Nagina Malguria , Luca A Vricella .Digital Design and 3D Printing of Aortic Arch Reconstruction in HLHS for Surgical Simulation and Training. *World J Pediatr Congenit Heart Surg.* 2018 Jul; 9(4):454-458.10.1177/2150135118771323

- 21- [Chytas2024] D Chytas, G Noussios, M Salmas, T Demesticha, A V Vasiliadis , T Troupis .The effectiveness of three-dimensional printing in undergraduate and postgraduate anatomy education: A review of reviews. *Morphologie* 2024 Jun; 108(361).10.1016/j.morpho.2023.100759
- 22- [Cordeiro2015] Brenda Alves Cordeiro, Fabiane Miron Stefani, Eliane Maria Goldfede. Study of the correlation between the linear measurements of the skull and face and palatal wide and length measures. *CoDAS* 2015; 27(5):472-7.10.1590/2317-1782/20152015010
- 23- [Cotton2005] François Cotton, Fernando Ramirez Rozzi, Bernard Vallee, Chahin Pachai. Cranial sutures and craniometric points detected on MRI. *Surg Radiol Anat.* 2005 Mar; 27(1):64-70.10.1007/s00276-004-0283-6
- 24- [Csámer2023] Loránd Csámer, Zoltán Csernátony, Viktor Zsolt Kővári, László Novák. Custom-made 3D printing-based cranioplasty using a silicone mould and PMMA. *Scientific Reports* | (2023) 13:11985.<https://doi.org/10.1038/s41598-023-38772-9>
- 25- [Dias2015] Paulo Dias, Luis Neves, Daniel Santos, Catarina Coelho.CraMs: Craniometric Analysis Application Using 3D Skull Models. *IEEE Comput Graph Appl.* 2015 Nov-Dec; 35(6):11-7.10.1109/MCG.2015.136
- 26- [Enquist1994] M Enquist, A Arak. Symmetry, beauty and evolution. *Nature.* 1994 Nov 10; 372(6502):169-72.10.1038/372169a0
- 27- [Feroze2015] Abdullah H Feroze, Graham G Walmsley, Omar Choudhri, H Peter Lorenz. Evolution of cranioplasty techniques in neurosurgery: historical review, pediatric considerations, and current trends. *J Neurosurg* 2015 Oct; 123(4):1098-107.10.3171/2014.11.JNS14622

- 28- [Fong2003] Kenton D. Fong, Stephen M. Warren, Elizabeth G. Lobo, James H. Henderson. Mechanical Strain Affects Dura Mater Biological Processes: Implications for Immature Calvarial Healing. *Plast Reconstr Surg*. 2003 Oct; 112(5):1312-27.10.1097/01.PRS.0000079860.14734.D6
- 29- [Galvez2019] Marcelo Galvez, Carlos E. Montoya, Jorge Fuentes, Gonzalo M. Rojas, .Error Measurement Between Anatomical Porcine Spine, CT Images, and 3D Printing. *Acad Radiol* 2019;1–10.<https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.06.016>
- 30- [Ganguli2018] Anurup Ganguli, Gelson J Pagan-Diaz, Lauren Grant, Caroline Cvetkovic. 3D printing for preoperative planning and surgical training: a review. *Biomed Microdevices*. 2018 Aug 4; 20(3):65.10.1007/s10544-018-0301-9
- 31- [Garas2018] Monique Garas, Mauro Vaccarezza, George Newland, Kylie McVay-Doornbusch. 3D-Printed specimens as a valuable tool in anatomy education: A pilot study.*Ann Anat*. 2018 Sep; 219:57-64.10.1016/j.aanat.2018.05.006
- 32- [Ged2022] C Ged, E Samson, L Riffaud. Syndrome of the trephined: When bone becomes the cure. *Neurochirurgie*. 2022 Oct; 68(5):544-545.10.1016/j.neuchi.2022.01.003
- 33- [Gosain2003] K Gosain, T Santoro, L S Song, C C Capel. Osteogenesis in Calvarial Defects: Contribution of the Dura, the Pericranium and the Surrounding Bone in Adult vs Infant Animals. *Plastic and Reconstructive Surgery* 112(2):p 515-527, August 2003. 10.1097/01.PRS.0000070728.56716.51
- 34- [Harris2014] Dominic A Harris, Abigail J Fong, Edward P Buchanan, Laura Monson. History of synthetic materials in alloplastic cranioplasty. *Neurosurg Focus*. 2014 Apr; 36(4):E20.10.3171/2014.2.FOCUS13560
- 35- [Hönn2007] Mirjam Hönn, Gernot Göz. The ideal of facial beauty: a review.*J Orolfac Orthop*. 2007 Jan; 68(1):6-16.10.1007/s00056-007-0604-6

- 36- [Iwanaga2021] Joe Iwanaga, Marios Loukas, Aaron S Dumont .A review of anatomy education during and after the COVID-19 pandemic: Revisiting traditional and modern methods to achieve future innovation. Clin Anat . 2021 Jan; 34(1):108-114.10.1002/ca.23655
- 37- [Jaberi2013] Joby Jaberi, Kenneth Gambrell, Paul Tiwana, Chris Madden. Long-term clinical outcome analysis of poly-methyl-methacrylate cranioplasty for large skull defects. J Oral Maxillofac Surg. 2013 Feb; 71(2):e81-8.10.1016/j.joms.2012.09.023
- 38- [Keenan2020] Iain D Keenan, Megan Powell. Interdimensional Travel: Visualisation of 3D-2D Transitions in Anatomy Learning. Adv Exp Med Biol. 2020:1235:103-116.10.1007/978-3-030-37639-0_6
- 39- [Koelzera2019] Sarah C. Koelzera, Ines V. Kuemmela, Jan T. Koelzerb, Frank Ramsthaler. Definitions of frontal bone inclination: Applicability and quantification. Forensic Science International 303 (2019) 109929.10.1016/j.forsciint.2019.109929
- 40- [Kopačin2024] Vjekoslav Kopačin, Vedran Zubčić, Ivan Mumlek, Dario Mužević. Personalized 3D-printed cranial implants for complex cranioplasty using open-source software. Surg Neurol Int. 2024; 15: 39.10.25259/SNI_906_2023
- 41- [Kropla2023] Fabian Kropla, Dirk Winkler, Dirk Lindner, Patrick Knorr. Development of 3D printed patient-specific skull implants based on 3d surface scans. 3D Printing in Medicine (2023) 9:19. <https://doi.org/10.1186/s41205-023-00183-x>
- 42- [Kung2013] Woon-Man Kung, Shuo-Tsung Chen, Chung-Hsiang Lin, Yu-Mei Lu. Verifying three-dimensional skull model reconstruction using cranial index of symmetry. PLoS One. 2013 Oct 25; 8(10):e74267.10.1371/journal.pone.0074267

- 43- [Láng2016] József Láng, Mario Ganau, Lara Prisco, Krisztina Bozsik. Syndrome of trephined-underestimated and poorly understood complication after decompressive craniectomy. *Ideggyogy Sz.* 2016 Jul 30; 69 (7-8):227-232.10.18071/isz.69.0227
- 44- [Laubenbacher2024] R Laubenbacher, B Mehrad, I Shmulevich, N Trayanova. Digital twins in medicine. *Nat Comput Sci.* 2024 Mar; 4(3):184-191.10.1038/s43588-024-00607-6
- 45- [Lilja-Cyron2019] Alexander Lilja-Cyron, Morten Andresen, Jesper Kelsen, Trine Hjorslev Andreasen .Intracranial pressure before and after cranioplasty: insights into intracranial physiology. *J Neurosurg.* 2019 Oct 18; 133(5):1548-1558.: 10.3171/2019.7.JNS191077
- 46- [Lin2020] Alexander Y. Lin, Lauren M. Yarholar. Plastic Surgery Innovation with 3D Printing for Craniomaxillofacial Operations. *Mo Med.* 2020 Mar-Apr; 117(2): 136–142
- 47- [Mahapure2021] Kiran S Mahapure, Dylan J Murray. "The historical timeline of cranioplasty". *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2021 Mar; 74(3):632-633.10.1016/j.bjps.2020.11.048
- 48- [Martínez-Viñuela2021] I Martínez-Viñuela, I Paredes-Borrachero, M Rubio-Mellado, L Fernández-García. Syndrome of the trephined. *Rehabilitacion (Madr).* 2021 Oct-Dec; 55(4):325-328.10.1016/j.rh.2020.11.005
- 49- [Meijer2023] Charles Meijer, Hae-Won Uh, Said El Bouhaddani. Digital Twins in Healthcare: Methodological Challenges and Opportunities. *J Pers Med.* 2023 Oct 23; 13(10):1522.10.3390/jpm13101522
- 50- [Murgitroyd2015] Ellen Murgitroyd, Marta Madurska, Jasmina Gonzalez, Angus Watson .3D digital anatomy modelling - Practical or pretty? *Surgeon.* 2015 Jun; 13(3):177-80.10.1016/j.surge.2014.10.007

- 51- [Mustroph2022] Christian M Mustroph, Christopher M Stewart, Laura M Mann , Sepehr Saberian. Systematic Review of Syndrome of the Trephined and Reconstructive Implications. J Craniofac Surg. 2022 Sep 1; 33(6):e647-e652.10.1097/SCS.00000000000008724
- 52- [Nicoloso2021] Luca Gabriele De Vivo Nicoloso, Joshua Pelz, Herb Barrack, Falko Kuester. Towards 3D printing of a monocoque transtibial prosthesis using a bio-inspired design workflow. Rapid Prototyping Journal Volume 27 · Number 11 · 2021 · 67–80.10.1108/RPJ-06-2021-0136
- 53- [Policicchio2020] Domenico Policicchio, Gina Casu, Giosuè Dipellegrini, Artan Doda. Comparison of two different titanium cranioplasty methods: Custom-made titanium prostheses versus precurved titanium mesh. Surgical Neurology International • 2020 • 11(148).10.25259/SNI_35_2020
- 54- [Pruzinsky1992] T Pruzinsky .Social and psychological effects of major craniofacial deformity. Cleft Palate Craniofac J. 1992 Nov; 29(6):578-84.10.1597/1545-1569_1992_029_0578_sapeom_2.3.co_2
- 55- [Radzi2022] Shairah Radzi, Ramya Chandrasekaran, Zhen Kai Peh, Preman Rajalingam. Students' learning experiences of three-dimensional printed models and plastinated specimens: a qualitative analysis. BMC Medical Education (2022) 22:695.https://doi.org/10.1186/s12909-022-03756-2
- 56- [Romero2013] Flávio Ramalho Romero, Marco Antônio Zanini, Luis Gustavo Ducati, Roberto Colichio Gabarra. Sinking skin flap syndrome with delayed dysautonomic syndrome-An atypical presentation. Int J Surg Case Rep. 2013; 4(11):1007-9.10.1016/j.ijscr.2013.08.013

- 57- [Sahoo2018] Nanda Kishore Sahoo, Kapil Tomar, Ankur Thakral, N Mohan Rangan. Complications of Cranioplasty. J Craniofac Surg. 2018 Jul; 29(5):1344-1348.10.1097/SCS.0000000000004478
- 58- [Schön2020] Stephan N. Schön, Nicolas Skalicky, Neha Sharma, Daniel W. Zumofen. 3D-Printer-Assisted Patient-Specific Polymethyl Methacrylate Cranioplasty: A Case Series of 16 Consecutive Patients. World Neurosurgery. Volume 148, April 2021, Pages e356-e362.<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.12.138>
- 59- [Shah2014] Aatman M Shah, Henry Jung, Stephen Skirboll. Materials used in cranioplasty: a history and analysis. Neurosurg Focus. 2014 Apr; 36(4):E19.10.3171/2014.2.FOCUS13561
- 60- [Sharma2019] Sunil Sharma, Shakti A. Goel. Three-Dimensional Printing and its Future in Medical World. Journal of Medical Research and Innovation Volume 3, Issue 1, 2019.10.15419/jmri.141
- 61- [Stewart2021] Christopher M Stewart, Christopher P Deibert, Peter W Thompson. Syndrome of the Trephined Related to Inflation of a Scalp Tissue Expander. J Craniofac Surg. 2021 Jan-Feb; 32(1):297-299.10.1097/SCS.0000000000007090
- 62- [Sveikata2022] Lukas Sveikata, Lana Vasung, Amir El Rahal, Andrea Bartoli. Syndrome of the trephined: clinical spectrum, risk factors, and impact of cranioplasty on neurologic recovery in a prospective cohort. Neurosurgical Review (2022) 45:1431–1443.<https://doi.org/10.1007/s10143-021-01655-6>
- 63- [Tarr2020] Joseph T Tarr, Matthew Hagan, Ben Zhang, Neil Tanna. Syndrome of the Trephined: Quantitative Functional Improvement after Large Cranial Vault Reconstruction. Plast Reconstr Surg. 2020 Jun; 145(6):1486-1494.10.1097/PRS.0000000000006836

- 64- [Thomas 2016] Daniel B Thomas, Jessica D Hiscox, Blair J Dixon, Johan Potgieter .3D scanning and printing skeletal tissues for anatomy education. J Anat. 2016 Sep; 229(3):473-81.10.1111/joa.12484
- 65- [Tsianaka2021] Eleni Tsianaka, Evangelos Drosos, Ajit Singh, Anastasia Tasiou. Post-Cranioplasty Complications: Lessons From a Prospective Study Assessing Risk Factors. J Craniofac Surg. 2021 Mar-Apr; 32(2):530-534.10.1097/SCS.00000000000007344
- 66- [TulsiRoy2022] Tulsi Roy, Derek M Steinbacher. Virtual Planning and 3D Printing in Contemporary Orthognathic Surgery. Semin Plast Surg. 2022 Dec 14; 36(3):169-182.10.1055/s-0042-1760209
- 67- [Ulcay2021] Tufan Ulcay, Burcu Kamaşak. Evaluation of craniometric measurements in human skulls. J Health Sci Med 2021; 4(1): 38-44.10.32322/jhsm.804341
- 68- [Vandenbossche2022] Vicky Vandenbossche, Joris Van de Velde, Stind Avet, Wouter Willaert. Digital body preservation: Technique and applications. Anat Sci Educ. 2022 Jul; 15(4):731-744.10.1002/ase.2199
- 69- [vandenElzen2017] Marijke E P van den Elzen, Sarah L Versnel, Steven E R Hovius, Jan Passchier. Adults with congenital or acquired facial disfigurement: impact of appearance on social functioning. J Craniomaxillofac Surg. 2012 Dec; 40(8):777-82.10.1016/j.jcms.2012.02.010
- 70- [Velásquez-García 2021] Luis Fernando Velásquez-García, Yosef Kornbluth. Biomedical Applications of Metal 3D Printing. Annu Rev Biomed Eng. 2021 Jul 13;23:307-338.10.1146/annurev-bioeng-082020-032402
- 71- [Vyas2022] Krishna Vyas, Marissa Suchyta, Waleed Gibreel, Jorys Martinez-Jorge. Virtual Surgical Planning and 3D-Printed Surgical Guides in Facial

- Allotransplantation. *Semin Plast Surg* . 2022 Dec 7; 36(3):199-208.10.1055/s-0042-1756452
- 72- [Wolfswinkel2017] Erik M. Wolfswinkel, Thomas A. Imahiyerobo, y J. Gordon McComb, Pedro A. Sanchez-Lara. Proteus Syndrome With a Cranial Intraosseous Lipoma. *The Journal of Craniofacial Surgery* Volume 00, Number 00, Month 2017.10.1097/SCS.00000000000003959
- 73- [Yerragunta2021] Thirumal Yerragunta, Reddy Ramanadha Kanala, Vamsi Krishna Yerramneni, Swapnil Kolpakawar. Designer Cranioplasty at Budget Prices: A Novel Use of 3D Printing Technology. *Indian Journal of Neurosurgery* 2021.10.1055/s-0040-1716995
- 74- [Zaidel2005] Dahlia W Zaidel, Shawn M Aarde, Kiran Baig. Appearance of symmetry, beauty, and health in human faces. *Brain Cogn*. 2005 Apr; 57(3):261-3.10.1016/j.bandc.2004.08.056
- 75- [Zaidel2005] D W Zaidel, J A Cohen. The face, beauty, and symmetry: perceiving asymmetry in beautiful faces. *Int J Neurosci*. 2005 Aug; 115(8):1165-73.10.1080/00207450590914464
- 76- [Zonenshayn2004] Martin Zonenshayn, Eugene Kronberg, Mark M Souweidane. Cranial index of symmetry: an objective semiautomated measure of plagiocephaly. Technical note. *J Neurosurg*. 2004 May; 100(5 Suppl Pediatrics):537-40.10.3171/ped.2004.100.5.0537

الملخص

تُعتبر العيوب الجمجمية، سواء كانت خلقية، ناتجة عن إصابات، أو بسبب التدخلات الجراحية، من التحديات الطبية والجمالية والنفسية الكبيرة. من الناحية الجسدية، تؤثر هذه العيوب على حماية الدماغ وتُعطّل وظائفه الفسيولوجية، مما يؤدي إلى مضاعفات عصبية وتدهور في جودة الحياة. من الناحية الجمالية، تؤدي هذه العيوب إلى تغييرات في تماثل الوجه، مما يؤثر على المظهر واحترام الذات. أما من الناحية النفسية والاجتماعية، فقد يؤدي ذلك إلى العزلة، الوصمة الاجتماعية، واضطرابات عاطفية مثل القلق والاكتئاب.

يقدم هذا العمل طريقة مبتكرة لتصميم وتطبيق ترقيعات جمجمة مخصصة باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد. المادة المستخدمة في الطرف الاصطناعي هي الإسمنت العظمي، وهي مادة متوافقة حيوياً وتستخدم على نطاق واسع في جراحة الأعصاب. العملية سريعة ومنخفضة التكلفة، مع الالتزام التام بمعايير التعقيم والأخلاقيات.

تشمل الإجراءات تقسيم بيانات الأشعة المقطعية (DICOM) لإنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد للجمجمة، يتبعه إنشاء القالب المطبوع. بعد التعقيم، يتم تطبيق الإسمنت العظمي على القالب أثناء العملية الجراحية، ثم يتم فكّه ووضعه على المريض. هذه التقنية تقلل من وقت العملية ومخاطر المضاعفات، مع ضمان نتيجة جمالية جيدة وبأقل تكلفة.

الكلمات المفتاحية: العيب الجمجمي، ترقيع الجمجمة المخصص، الطباعة ثلاثية الأبعاد، النشرich الافتراضي، تماثل

الجمجمة.

SUMMARY

Cranial defects, whether congenital, traumatic, or resulting from surgical interventions, present significant medical, aesthetic, and psychological challenges. Physically, they compromise brain protection and disrupt its physiological functions, leading to neurological complications and a diminished quality of life. Aesthetically, these defects alter facial symmetry, impacting appearance and self-esteem. Psychosocially, this can lead to isolation, stigmatization, and emotional disorders such as anxiety and depression.

This work proposes an innovative method for designing and applying personalized cranioplasties using 3D printing technology. The prosthetic material, bone cement, is biocompatible and widely used in neurosurgery. The process is fast and cost-effective, adhering strictly to sterilization and ethical standards.

The procedure involves segmenting CT scan data (DICOM) to generate a 3D model of the skull, followed by the creation of the printed mold. After sterilization, the bone cement is applied to the mold intraoperatively, then demolded and placed on the patient. This technique reduces operative time and the risk of complications while ensuring a good aesthetic result at a lower cost.

Keywords: Cranial defect, personalized cranioplasty, 3D printing, virtual anatomy, cranial symmetry.

RESUME

Les défauts crâniens, qu'ils soient congénitaux, traumatiques ou liés à des interventions chirurgicales, présentent des défis médicaux, esthétiques et psychologiques importants. Sur le plan physique, ils compromettent la protection du cerveau et perturbent ses fonctions physiologiques, entraînant des complications neurologiques et une altération de la qualité de vie. Esthétiquement, ces défauts modifient la symétrie faciale, affectant l'apparence et l'estime de soi. Psycho socialement, cela peut conduire à l'isolement, à la stigmatisation et à des troubles émotionnels tels que l'anxiété et la dépression.

Ce travail propose une méthode innovante pour concevoir et appliquer des cranioplasties personnalisées, en utilisant la technologie de l'impression 3D. Le matériau de la prothèse, du ciment osseux, est biocompatible et largement utilisé en neurochirurgie. Le processus est rapide et peu coûteux, avec un respect strict des normes de stérilisation et d'éthique.

Le processus consiste en la segmentation des données scannographiques (DICOM) pour générer un modèle 3D du crâne, suivi de la création du moule imprimé. Après la stérilisation, le ciment osseux est appliqué sur le moule en per-opératoire, puis démoulé et mis en place sur le patient. Cette technique réduit le temps opératoire et les risques de complications, tout en garantissant un bon résultat esthétique à moindre coût.

Mots clés : Défaut crânien, cranioplastie personnalisée, impression 3D, anatomie virtuelle, symétrie crânienne.