



HAL
open science

Modélisation par éléments finis d'un crâne d'enfant dans le cadre de la maltraitance. Utilisation conjointe et limites de logiciels open-source

Selena Nguyen

► To cite this version:

Selena Nguyen. Modélisation par éléments finis d'un crâne d'enfant dans le cadre de la maltraitance. Utilisation conjointe et limites de logiciels open-source. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02073746

HAL Id: dumas-02073746

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02073746>

Submitted on 20 Mar 2019

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

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

U.F.R. D'ODONTOLOGIE

Année 2019

Thèse n°16

THESE POUR L'OBTENTION DU

**DIPLOME D'ETAT de DOCTEUR EN CHIRURGIE
DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement

Par NGUYEN Selena

Née le 18 mars 1993 à Talence

Le 11 mars 2019

**MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS D'UN CRANE
D'ENFANT DANS LE CADRE DE LA MALTRAITANCE**

Utilisation conjointe et limites de logiciels open-source

Sous la direction de : Docteur Christophe BOU

Membres du jury:

Mme M-J BOILEAU
M. C. BOU
M. A. NAVEAU
Mme C. BADET

Président
Directeur
Rapporteur
Assesseur

UNIVERSITE DE BORDEAUX

MAJ 01/02/2019

Président M. TUNON DE LARA Manuel

Directeur de Collège des Sciences de la Santé M. PELLEGRIN Jean-Luc

COLLEGE DES SCIENCES DE LA SANTE UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DES SCIENCES ODONTOLOGIQUES

Directrice Mme BERTRAND Caroline 58-01

Directeur Adjoint à la Pédagogie Mr DELBOS Yves 56-01

Directeur Adjoint – Chargé de la Recherche M. FRICAIN Jean-Christophe 57-01

Directeur Adjoint – Chargé des Relations Internationales M. LASSERRE Jean-François 58-01

ENSEIGNANTS DE L'UFR

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Mme	Caroline	BERTRAND	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Marie-José	BOILEAU	Orthopédie dento-faciale	56-01
M	Sylvain	CATROS	Chirurgie orale	57-01
M	Raphaël	DEVILLARD	Odontologie restauratrice et endodontie	58-01
Mme	Véronique	DUPUIS	Prothèse dentaire	58-01
M.	Bruno	ELLA NGUEMA	Sciences anatomiques et physiologiques - Biomatériaux	58-01
M.	Jean-Christophe	FRICAIN	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-01

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Mme	Elise	ARRIVÉ	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme	Cécile	BADET	Sciences biologiques	57-01
M.	Etienne	BARDINET	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Michel	BARTALA	Prothèse dentaire	58-01
M.	Cédric	BAZERT	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Christophe	BOU	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme	Sylvie	BRUNET	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-01
M.	Jacques	COLAT PARROS	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
M,	Jean-Christophe	COUTANT	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
M.	François	DARQUE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	François	DE BRONDEAU	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Yves	DELBOS	Odontologie pédiatrique	56-01
M,	Emmanuel	D'INCAU	Prothèse dentaire	58-01
M.	Dominique	GILLET	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	Jean-François	LASSERRE	Prothèse dentaire	58-01
M.	Yves	LAUVERJAT	Parodontologie	57-01
Mme	Odile	LAVIOLE	Prothèse dentaire	58-01
M.	Jean-Marie	MARTEAU	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-01
Mme	Javotte	NANCY	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Adrien	NAVEAU	Prothèse dentaire	58-01
M.	Jean-François	PELI	Odontologie restauratrice – Endodontie	58-01
M.	Philippe	POISSON	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02

M.	Patrick	ROUAS	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Johan	SAMOT	Biologie Orale	57-01
Mme	Maud	SAMPEUR	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Cyril	SEDARAT	Parodontologie	57-01
Mme	Noélie	THEBAUD	Sciences biologiques	57-01
M.	Eric	VACHEY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01

AUTRES ENSEIGNANTS

Mme	Audrey	AUSSEL	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
Mme	Elsa	GAROT	Odontologie pédiatrique	56-01

ASSISTANTS

Mme	Mathilde	BOUDEAU	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	Wallid	BOUJEMAA AZZI	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Melle	Camille	BOULÉ-MONTPEZAT	Odontologie pédiatrique	56-01
Mlle	Anaïs	CAVARE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M	Hubert	CHAUVEAU	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M,	Jean-Baptiste	CULOT	Fonctions/dysfonctions, imagerie, biomatériaux	58-01
M	Pierre-Hadrien	DECAUP	Fonctions/dysfonctions, imagerie, biomatériaux	58-01
Mme	Severine	DESCAZEUX	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Julia	ESTIVALS	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Cédric	FALLA	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme	Mathilde	FENELON	Chirurgie Orale	57-01
Mme	Agathe	GREMARE	Biologie orale	57-01
M	Mickaël	HYVERNAUD	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Clémence	JAECK	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Mathilde	JACQUEMONT	Parodontologie	57-01
Mme	Olivia	KEROUREDAN	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Claudine	KHOURY	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mr	Antoine	LAFITTE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M	Adrien	LASTRADE	Prothèse dentaire	58-01
M.	Emmanuel	MASSON REGNAULT	Chirurgie Orale	57-01
Mme	Marie	MÉDIO	Orthopédie dento-faciale	56-01
Mme	Aude	MENARD	Prothèse dentaire	58-01
M	Antoine	PEPELUT	Parodontologie	57-01
M	Florian	PITEU	Prothèse dentaire	58-01
Mr	Thibaut	ROULLAND	Prothèse dentaire	58-01
M.	François	ROUZÉ L'ALZIT	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Rawen	SMIRANI	Parodontologie	57-01
Mme	Sophia	ZIANE	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01

REMERCIEMENTS

A notre Présidente de thèse

Madame le Professeur Marie-José BOILEAU

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section Orthopédie dento-faciale – 56-01

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Merci également pour votre enseignement de qualité durant ces années d'étude qui m'ont fait acquérir les bases de l'orthopédie dento-faciale.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de ma plus haute considération.

A notre Directeur de thèse

Monsieur le Docteur Christophe BOU

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale – 56-02

Je vous remercie infiniment d'avoir accepté la direction de ce travail et de m'avoir accompagnée au cours de son écriture. Tout le soutien et le temps que vous m'avez consacré dans l'élaboration de ce travail m'ont été d'une aide précieuse. Votre bienveillance, votre patience, votre gentillesse et votre disponibilité ont rendu ce travail bien plus agréable.

Je tiens également à vous témoigner ma gratitude pour ces 2 années de vacances hospitalières à Saint André à vos côtés. Avoir la chance d'assister au partage de votre passion à travers vos enseignements cliniques et théoriques a été un véritable plaisir pour moi.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de ma reconnaissance la plus sincère.

A notre Rapporteur de thèse

Monsieur le Docteur Adrien NAVEAU

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section Prothèse dentaire 58-01

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en acceptant de juger cette thèse et d'en être le rapporteur.

Merci infiniment d'avoir pris le temps de lire et de corriger ce travail, je tiens également à vous adresser ma profonde reconnaissance quant à votre investissement et votre rigueur tant sur le plan théorique que clinique durant ces 2 dernières années d'étude partagées avec vous.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mes sincères remerciements et mon profond respect.

A notre Assesseur

Madame le Docteur Cécile BADET

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section Sciences biologiques 57-01

Un grand merci d'avoir accepté de faire partie de mon membre du jury. C'est pour moi une immense joie de partager ce moment important avec vous.

Merci pour votre enseignement, votre bonne humeur, vos précieux conseils et toute la bienveillance dont vous avez pu faire preuve durant mes vacances hospitalières et années d'étude mais également en dehors du cadre universitaire.

Pour tout cela et bien plus, veuillez trouver dans ce travail toute ma reconnaissance.

A mes parents, Merci du fond du cœur d'avoir toujours été là pour moi et pour toutes les valeurs que vous m'avez inculquées. Vous rendre fiers serait pour moi le plus grand des honneurs. Pour tout cela, je vous dédie cette thèse.

- Papa, merci pour toute ta bienveillance et ta sagesse. Tu as toujours su me guider et être présent à ta façon, je suis si heureuse et fière d'être ta fille.
- Maman, merci d'être une mère si aimante et dévouée, pour ton soutien sans faille envers nous et ta gentillesse.

A mes sœurs, mes piliers,

- Alvina alias Tanou, je ne saurais t'exprimer toute ma gratitude et mon amour. Tu es une sœur exceptionnelle, qui a toujours eu un regard bienveillant envers nous. Merci d'être ce que tu es et d'avoir été un si merveilleux exemple pour moi.
- Laurianne alias Cho, merci pour ta bonne humeur perpétuelle et ton grand cœur. Tu es une personne merveilleuse, généreuse et d'une grande humanité sur qui j'ai toujours pu compter et me reposer et pour tout ça je suis si fière d'être ta sœur.
- Léanna alias Yenou, merci pour ta gentillesse et ta simplicité. Je suis en admiration de la très belle personne que tu es devenue. Ta maturité et ton grand cœur me rendent si fière de toi.

A ma famille paternelle,

- Papi, je sais que tu me regardes de là-haut et que tu veilles sur moi, j'espère que tu es fier de moi.
- Mamie, merci pour ton amour.
- Darren et Brigitte, Yaya, Yoann et maintenant Didi, Yoyo et Yanyan, merci pour tous ces bons moments partagés avec vous.
- Mes cinq grand oncles et leur famille, à toutes ces cousinades très réussies.

A ma famille maternelle,

- Ong ngoai, merci pour tous ces moments que je n'oublierai pas, je sais que tu continues de me guider de là où tu es.
- Ba ngoai, merci pour ton amour.

- Christine, Philippe, Suzanne, Frédéric, Alexandra, François, Thanh Thao, Nathalie, Maxime et leurs enfants, merci pour tous ces merveilleux moments à Paris, Agde ou ailleurs, c'est toujours un bonheur de partager ces moments avec vous.

A la famille Emringer,

- Florent, merci pour ta bonne humeur et ces bons moments. Ta simplicité et ta gentillesse font de toi une véritable 5^{ème} sœur. Merci de rendre Alvina si heureuse. Vous formez avec Line une famille magnifique.
- Cathy et Claude, Steph et Leslie et leurs enfants, merci pour votre sympathie et votre bonne humeur. Tous ces voyages, Noël et moments partagés avec vous restent des souvenirs précieux.

A mes gueuzes, Léa, Estelle, Sonia, Marine, Laure, le noyau dur, celles qui sont là depuis le début, je ne remercierai jamais assez le destin de vous avoir mises sur mon chemin. Vous êtes des personnes exceptionnelles et avez rendu mes années d'étude inoubliables. Merci pour tous ces voyages, fous rires, et surtout apéros ! Je vous aime de tout mon cœur.

A ma partenaire de pole et amie en or, Fanny, merci pour tous ces merveilleux moments, tu as toujours su être là pour moi et je ne t'en remercierai jamais assez.

A Emma, merci pour tous ces fous rires et bons moments passés avec toi. Ta bonne humeur et ta simplicité font de toi une amie très importante pour moi.

A mes acolytes de Grand Lebrun, Thaïs, Camille, Meïli, Mae, Charlotte, malgré les études qui nous séparent, nous avons toujours gardé contact. Merci pour votre simplicité et tous ces moments de retrouvaille autour d'un bon repas ou verre.

Aux collègues dentaires, pour toutes ces années qui n'auraient pas été pareilles sans vous, Anna, Pen, Lydie, Alexa, Alfredsao, Alix, JL, Dudu, Thomas, JB, Pauline, Caro, Vanessa, Marine, Alice, Bene, Sarah, Alex,.. et à toi aussi Michael, que je garderai toujours dans mon cœur.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	13
2. GENERALITES SUR LA MALTRAITANCE	14
2.1.Définitions	14
2.2.Chiffres et statistiques	16
2.3.Sous estimation de la maltraitance dans le système de santé	17
3. ANATOMIE DE L'EXTREMITÉ CEPHALIQUE DE L'ENFANT	19
3.1.Rappels anatomiques	19
3.1.1.La boîte crânienne	19
3.1.2.La face	20
3.2.Spécificités chez l'enfant	20
3.2.1.Spécificités anatomiques	20
3.2.2.Spécificités géométriques	23
3.2.3.Spécificités mécaniques	25
4. BILAN DES OUTILS EXISTANT DANS LE DIAGNOSTIC DIFFERENTIEL DE LA MALTRAITANCE PHYSIQUE	28
4.1.Les outils d'évaluation actuels	28
4.1.1.Repérage des types de fracture du crâne caractéristiques	28
4.1.2.Types d'imagerie utilisés	29
4.2.Les différents travaux réalisés utilisant des modèles éléments finis de l'extrémité céphalique chez l'enfant	30
4.2.1.Définition d'un modèle éléments finis	30
4.2.2.Les différents modèles éléments finis tête enfants	31
5. PROTOCOLE	34
5.1.Problématique	34
5.2.Objectif	34
5.3.Méthode	34
5.3.1.Segmentation du crâne à l'aide du logiciel ITK-snap	35
5.3.2.Amélioration du fichier surfacique, correction des erreurs	46

5.3.3. Analyse par éléments finis et simulation de forces	53
5.4. Résultats	57
6. DISCUSSION/ PERSPECTIVES POUR LES PROCHAINS TRAVAUX	60
6.1. Au niveau du logiciel open-source	60
6.2. Au niveau de l'utilisateur	61
6.3. Au niveau du modèle	61
6.3.1. Difficultés	61
6.3.2. Améliorations à fournir	62
6.4. Perspectives pour les prochains travaux	63
7. CONCLUSION	64
8. OUVERTURE, EXTRAPOLATION DE LA METHODE	65
9. BIBLIOGRAPHIE	66
10. ANNEXES	74

LISTE DES FIGURES ET DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Alopecie à différents stades de cicatrisation chez une fille de 4 ans.	15
Figure 2 Brûlure de la joue chez un garçon de 6 semaines.	15
Figure 3 Sutures, fontanelles et date de fermeture des fontanelles.	22
Figure 4 Répartition des segments du corps en fonction de l'âge.	24
Figure 5 Comparaison entre la proportion de la face et du crâne chez l'enfant et l'adulte.	25
Figure 6 Résumé de types de fractures entraînant la suspicion d'une maltraitance.	29
Figure 7 Description d'un modèle éléments finis.	31
Figure 8 Disposition en mosaïque d'images tomодensitométriques avec contraste par défaut.	36
Figure 9 Images après réglage du contraste mettant en évidence la structure osseuse.	37
Figure 10 Pointeur	37
Figure 11 Loupe.	37
Figure 12 Polygone.	37
Figure 13 Pinceau.	38
Figure 14 Serpent	38
Figure 15 Sélection de la zone d'intérêt représentée par le cadre rouge.	39
Figure 16 Pré segmentation.	40
Figure 17 Répartition des bulles.	41
Figure 18 Expansion des bulles.	41
Figure 19 Crâne segmenté.	42
Figure 20 Défaut du à la segmentation semi-automatique.	43
Figure 21 Diminution de l'opacité pour mettre en évidence le surplus.	43
Figure 22 Suppression du surplus en prenant soin de ne pas toucher à la zone d'intérêt.	44
Figure 23 Résultat final.	44
Figure 24 Résumé de la phase de segmentation.	46
Figure 25 Importation du modèle segmenté.	47
Figure 26 Modèle avant décimation.	48
Figure 27 Modèle après décimation.	48
Figure 28 Modèle après amélioration surfacique.	50

Figure 29 Présence de défauts de régularité au niveau du maillage empêchant la simulation des forces.	51
Figure 30 Exemple de modèles avant et après retopologie.	51
Figure 31 Résumé amélioration du fichier surfacique et correction des erreurs.	53
Figure 32 Présentation FreeCAD.	54
Figure 33 Maillage du modèle.	55
Figure 34 Icône Analyse mécanique.	55
Figure 35 Lancement de l'analyse mécanique.	56
Figure 36 Icône épaisseur de coque.	57
Figure 37 Icones contraintes de forces.	57
Figure 38 Application de forces au niveau du frontal sur un crâne maillé.	57
Figure 39 Arbre de construction terminé avec les résultats accessibles.	58
Figure 40 Icône résultats	58
Figure 41 Résultats d'analyse suite à une sollicitation de force sur le crâne d'un enfant...	59
Figure 42 Résumé analyse mécanique en éléments finis.	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Module d'élasticité en fonction de l'orientation des fibres osseuses et de la prématurité du fœtus selon Mc Pherson et Kriewall (1980).	26
Tableau 2 Module d'élasticité du crâne en fonction de l'âge selon l'étude de Irwin et Mertz	27
Tableau 3 Résumé des difficultés rencontrées au cours de la segmentation et propositions d'amélioration.	45
Tableau 4 Résumé des difficultés rencontrées durant l'étape d'amélioration surfacique et propositions de solutions.	52
Tableau 5 Tableau des différentes propriétés mécaniques utilisées.	56
Tableau 6 Résumé des différents modèles éléments finis de l'extrémité céphalique chez l'enfant.	74

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 Graphique de la répartition des enfants en danger (enfants maltraités + enfants à risque de maltraitance).....	16
Graphique 2 Graphique sur les différents types de maltraitance et leurs proportions en 1998, 2002 et 2006.....	17

1. INTRODUCTION

De nos jours, la maltraitance infantile représente un problème de santé publique. (1) Il est difficile de déterminer si les blessures d'un enfant venu aux urgences pédiatriques ont pour étiologie un accident ou sont consécutives à de la maltraitance. (2) L'expérience clinique, l'historique de la blessure et les outils d'imagerie restent les principaux critères de diagnostic. Afin de mieux comprendre les mécanismes des blessures consécutives à de la maltraitance de l'enfant, des études expérimentales post mortem ont été menées (3) mais pour des raisons éthiques, leur nombre reste faible et peu sont disponibles.

Parallèlement à ces études, des méthodes numériques ont été développées, en particulier la méthode d'analyse par éléments finis. L'extrémité céphalique étant la plus généralement touchée dans la maltraitance infantile, la méthode par éléments finis consacrée au crâne de l'enfant semble judicieuse. Cette méthode consiste, à partir d'un modèle tridimensionnel d'un crâne, d'appliquer des forces retranscrites à partir de la description de l'accident confiée par un tiers présent et ainsi visualiser les zones de pression ou de rupture sur le modèle. De cette façon, la compatibilité lésionnelle clinique et numérique seront comparées.

Des modèles éléments finis du crâne de l'enfant ont commencé à se développer dans les années 2000 (4–9) mais leur conception reste de nos jours un travail long et complexe, souvent réalisée à l'aide de logiciels spécialisés. Depuis quelques années des logiciels gratuits créés par une communauté de développeurs ont vu le jour, permettant de rendre cette méthode abordable au plus grand nombre d'utilisateurs. C'est pourquoi nous avons voulu, à travers une étude expérimentale, évaluer 3 logiciels gratuits et accessibles à tous pour la conception d'un modèle éléments finis d'un crâne d'enfant âgé de 6 mois et la simulation de contraintes dans le cadre de l'étude de la maltraitance.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer la faisabilité d'élaboration d'un modèle éléments finis sur un crâne d'enfant âgé de 6 mois et l'analyse mécanique des forces exercées en utilisant des logiciels accessibles sur internet afin d'en établir les limites, proposer des solutions afin d'améliorer le protocole et en proposer la méthodologie.

Dans un premier temps, nous allons expliquer les intérêts de la création d'un modèle éléments finis du crâne d'un enfant en commençant par des généralités sur la maltraitance. Le crâne d'un enfant ne pouvant se résumer à un modèle réduit d'un crâne d'adulte, (10) nous allons par la suite mettre en évidence les spécificités tant anatomiques, géométriques que mécaniques de l'extrémité céphalique d'un enfant. Les différents travaux de modèles éléments finis de la tête d'un enfant seront résumés pour ensuite détailler le protocole de création de notre modèle éléments finis d'un crâne d'enfant âgé de 6 mois et son évaluation.

2. GENERALITES SUR LA MALTRAITANCE

2.1. Définitions

D'après la Haute Autorité de Santé, la maltraitance infantile est définie par le non-respect des droits et des besoins fondamentaux des enfants (santé, sécurité, moralité, éducation, développement physique, affectif, intellectuel et social). (11) Véritable problème de santé publique selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), (12) ses conséquences peuvent être dramatiques car susceptibles d'entraîner la mort, des blessures graves et des conséquences à long terme sur le comportement de l'enfant. (13,14)

Depuis la loi du 5 mars 2007, l'Observatoire de l'Action Sociale Décentralisée (ODAS) a différencié deux groupes au sein de l'ensemble « enfants en danger » qui inclut tous les enfants dont la situation justifie une intervention administrative ou judiciaire (15) :

- L'enfant en risque de maltraitance représente tout enfant connaissant des conditions d'existence qui mettent en danger sa santé, sa sécurité, sa moralité, son éducation ou son entretien, sans pour autant être maltraité.
- L'enfant maltraité est la deuxième catégorie de l'enfant en danger. Cette définition comprend tout enfant victime de violences ayant des conséquences graves sur son développement physique et psychologique. (16)

On distingue la maltraitance:

- physique : diagnostiquée par des signes cliniques tels que les ecchymoses, hématomes, plaies, brûlures, alopecies, fractures et lésions osseuses... Il s'agit du type de maltraitance sur lequel nous allons nous appuyer au cours de cette thèse.



Figure 1 Alopecie à différents stades de cicatrisation chez une fille de 4 ans. D'après Adamsbaum C, Rey-Salmon C. Maltraitance chez l'enfant. Cachan: Lavoisier; 2013. (16)



Figure 2 Brûlure de la joue chez un garçon de 6 semaines. D'après Adamsbaum C, Rey-Salmon C. Maltraitance chez l'enfant. Cachan: Lavoisier; 2013. (16)

Le syndrome du bébé secoué, associé à des épisodes de secouement violent, entre également dans le cadre des maltraitances physiques. (17)

- sexuelle : La maltraitance sexuelle envers un mineur est définie par le fait de forcer ou d'inciter ce dernier à prendre part à une activité sexuelle avec ou sans contact physique, et/ou de l'exploiter sexuellement.
- psychologique : plus difficile à définir, la maltraitance psychologique désigne l'exposition répétée d'un enfant à des situations dont l'impact émotionnel dépasse ses capacités d'intégration psychologique : humiliations verbales ou non verbales, menaces verbales répétées, marginalisation systématique, dévalorisation systématique, exigences excessives ou disproportionnées à l'âge de l'enfant.

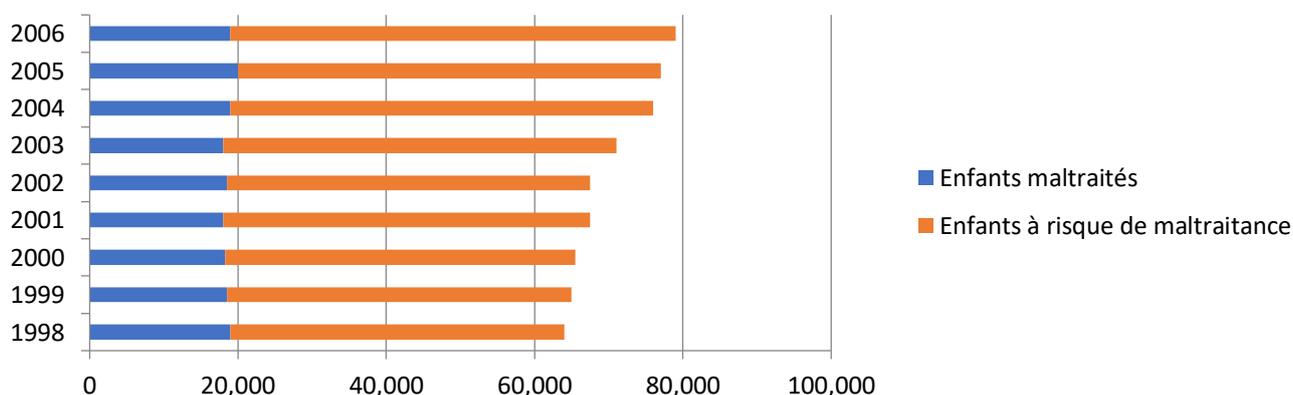
- négligence lourde : également délicate à diagnostiquer, elle concerne, à des stades différents, la dénutrition, l'hypotrophie staturo-pondérale et le nanisme psychosocial, ou encore la non dispensation de soins.

D'autre part, un même enfant peut et est souvent simultanément ou successivement soumis à plusieurs de ces formes de mauvais traitements dont les mécanismes et les conséquences sont étroitement liés. (18)

2.2. Chiffres et statistiques

Dans les pays à hauts revenus (Angleterre, Etats-Unis, Australie, Canada, France) le taux de maltraitance infantile est estimé entre 1,5 et 5% par les agences de protection de l'enfance. (13,19,20)

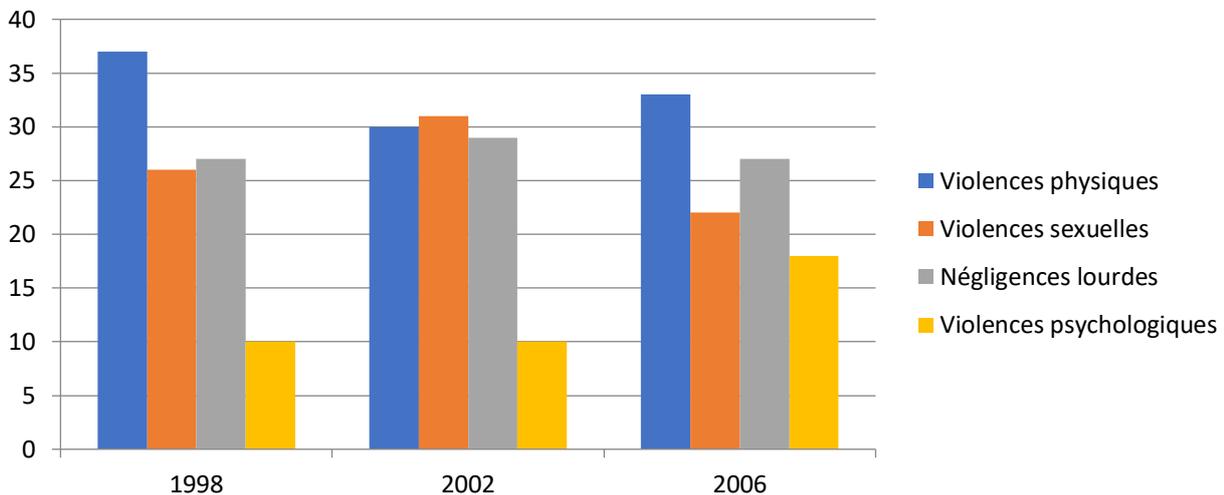
En France, Les chiffres disponibles ont été répertoriés jusqu'en 2007 par l'ODAS (Observatoire de l'Action Sociale Décentralisée) puis par l'ONPE (Observatoire National de la Protection de l'Enfance). (21,22) Alors que le nombre d'enfants signalés comme à risque de maltraitance s'accroît fortement (avec une hausse d'environ 25% entre 1998 et 2006), le nombre d'enfants maltraités est quant à lui relativement stable (environ 19 000 chaque année). (14,21) (Graphique 1)



Graphique 1 Graphique de la répartition des enfants en danger (enfants maltraités + enfants à risque de maltraitance).

Source du recensement : Observatoire National de l'Action Sociale Décentralisée (France). 2007 (21)

La maltraitance physique reste le type de maltraitance le plus signalé, elle représente environ 33% des maltraitances en 2006. (Graphique 2) Cela peut s'expliquer en partie grâce à un tableau clinique plus aisé au diagnostic par rapport aux notions de violences psychologiques et négligences lourdes qui restent difficilement catégorisables et identifiables à des fins statistiques. (14,21)



Graphique 2 Graphique sur les différents types de maltraitance et leurs proportions en 1998, 2002 et 2006
Source du recensement : Observatoire National de l'Action Sociale Décentralisée (France). 2007 (21)

Au 31 décembre 2016, on estime à 20,4‰ de mineurs suivis par le dispositif de protection de l'enfance soit 299 600 sur la France entière (hors Mayotte) selon l'Observatoire National de la Protection de l'Enfance (ONPE). En termes d'évolution, depuis 2007, le nombre estimé de mineurs suivis en protection de l'enfance s'est accru de 13 %. (22)

Pour autant, ces chiffres ne correspondent pas au nombre réel d'enfants en danger car toutes les situations de mauvais traitements ne sont pas reconnues ni signalées. (23) Il existe donc une véritable sous-estimation de la maltraitance.

2.3. Sous-estimation de la maltraitance dans le système de santé

En 2002, le rapport mondial sur la violence et la santé de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (12) mettait en avant à la fois le nombre considérable de décès d'enfants de moins de 15 ans par homicide survenus dans le monde, la particulière vulnérabilité des

très jeunes enfants, et le manque de données fiables et de travaux épidémiologiques. (1,18,24)

Selon l'article R4127-235 du code de déontologie, lorsqu'un chirurgien-dentiste discerne, dans le cadre de son exercice, qu'un mineur puisse être victime de sévices ou de privations, il doit, en faisant preuve de prudence et de circonspection, mettre en œuvre les moyens les plus adéquats pour le protéger en alertant les autorités compétentes s'il s'agit d'un mineur de moins de quinze ans, conformément aux dispositions du code pénal relatives au secret professionnel. (25) Le dépistage d'un enfant maltraité est donc primordial pour le dentiste ainsi que tout professionnel de santé ou autre professionnel susceptible d'être en observation clinique avec un enfant (médecins, pédiatres, psychiatres, puéricultrices, infirmiers scolaires, sages-femmes, professionnels des structures d'accueil de la petite enfance et des services médico-sociaux).

Néanmoins, seulement 2% des signalements d'enfants maltraités proviennent du système de santé. (16) Même si un professionnel de santé ne peut être sanctionné pour signalement abusif, la maltraitance infantile reste sous évaluée alors que la quasi totalité des enfants maltraités passent un jour ou l'autre par le système de santé, les parents étant souvent contraints de les amener en consultation d'urgence. Parmi les raisons de ce faible taux de signalements, nous pouvons citer :

- L'absence de système de transfert de données dans les milieux hospitaliers et dans le secteur libéral. En effet, seule la nature des lésions traumatiques est mentionnée et non son caractère intentionnel ou non. Il n'y a que très peu de transfert des résultats définitifs des investigations scientifiques depuis les hôpitaux vers les institutions en charge de la compilation des données sur les enfants maltraités.
- Le non ou le sous diagnostic : le manque de formation, l'insuffisance des investigations et l'absence de recours à la littérature scientifique peuvent en partie expliquer le non ou sous diagnostic de la maltraitance chez l'enfant. Le professionnel de santé se voit également parfois dans l'incapacité à imaginer et accepter le diagnostic de la maltraitance. (1,26)

- Le non signalement : du à une crainte de la mise en place de procédures administratives ou judiciaires, ainsi que la peur des poursuites pour signalement abusif et la crainte d'échecs de la protection de l'enfance. (27)

Cette sous-estimation nous amène à développer de nouvelles recherches afin d'améliorer les outils diagnostiques de dépistage de la maltraitance chez l'enfant et plus particulièrement au niveau de l'extrémité céphalique, l'architecture délicate et complexe du squelette cranio-facial le rendant plus sensible aux fractures par rapport à d'autres parties du squelette humain. (28) Le traumatisme crânien est d'ailleurs une des premières causes de mortalité par maltraitance.

3. ANATOMIE DE L'EXTREMITE CEPHALIQUE DE L'ENFANT

3.1. Rappels anatomiques

3.1.1. La boîte crânienne

Le crâne (ou neuro-crâne) est une enveloppe osseuse qui abrite l'encéphale. Durant toute sa croissance, la boîte crânienne va subir un développement de volume progressif jusqu'à atteindre sa taille définitive. Elle est composée de la base du crâne, sa partie inférieure, sur laquelle repose la voûte du crâne (ou calvaria). Toutes deux vont subir des croissances différentes. (29,30)

3.1.1.a. La base du crâne

La base du crâne est moulée sur la face inférieure de l'encéphale, elle a un aspect irrégulier, parfois très épaisse et par endroits très fine. (29) Sa croissance se fait sous l'influence à la fois de facteurs génétiques et de facteurs environnants. Cette croissance enchondrale commence au niveau de zones de cartilage spécialisées, les synchondroses, et est aussi sous l'influence des phénomènes de remodelage du périoste.

La base du crâne est composée de 4 os impairs que sont le frontal, l'ethmoïde, le sphénoïde et l'occipital. Elle est également formée de deux os pairs latéralement : les os temporaux.

3.1.1.b. La voûte du crâne (calvaria)

La voûte du crâne est uniformément convexe et lisse. Elle est formée d'os plats articulés entre eux et son épaisseur varie relativement selon les zones. La croissance de la voûte du crâne subit un mécanisme sutural, membraneux tout comme la croissance de la face et est en partie guidée par les zones de croissance que représentent les sutures. (31,32)

Elle est composée de l'os frontal, occipital et sphénoïde ainsi que des os pariétaux et temporaux.

3.1.2. La face

La face est un complexe neuro-sensoriel dont le rôle est considérable dans la perception grâce aux organes des sens abrités au sein des cavités faciales : orbites, cavité nasale et cavité orale.

La face est formée de quatorze os :

- six os pairs et symétriques: l'os nasal, l'os lacrymal, l'os zygomatique, le cornet nasal inférieur, l'os palatin et l'os maxillaire.
- deux os impairs et médian : le vomer et la mandibule.

3.2. Spécificités chez l'enfant

L'étude portant sur les crânes d'enfants, il est important de comprendre leurs particularités afin de mieux appréhender les mécanismes de traumatisme crânien pédiatrique. En effet, la tête d'un enfant ne pourrait se résumer à un modèle réduit de la tête d'un adulte. (32) Elle a des spécificités d'un point de vue anatomique, géométrique et mécanique.

3.2.1. Spécificités anatomiques

3.2.1.a. Ossification incomplète

A la naissance, les os ne sont formés que de fines bandes de tissus osseux partiellement calcifiées et ne sont pas soudés entre eux comme chez l'adulte. Ils transmettent facilement les impacts sur les structures plus profondes du cerveau. Le processus

d'ossification se poursuivra tout au long de la croissance jusqu'à ossification complète à l'âge adulte.

Ainsi, la microstructure de l'os chez l'enfant diffère de celle de chez l'adulte. Lorsque l'ossification est complète, le crâne est constitué de 3 couches d'os : 2 couches d'os compact et cortical très denses formées de lamelles osseuses concentriques à un canal central vasculaire (canal de Havers). Ces 2 couches entourent une couche d'os poreux, le diploé, dont la structure globale est une structure alvéolaire tridimensionnelle. Ces 3 couches ne sont pas différenciées en couches distinctes lors des premières années de vie conférant à l'os de l'enfant une microstructure uniforme. C'est à l'âge de 4 ans que le diploé se met en place.

Cette ossification incomplète est importante à prendre en compte car l'épaisseur moins importante du crâne chez l'enfant aura une conséquence directe sur la réponse à l'impact. (33)

3.2.1.b. Présence de sutures et de fontanelles

Durant les premières années de vie, les os sont joints par l'intermédiaire de bandes de tissu fibreux plus ou moins larges appelées sutures. Ces sutures, qui représentent une véritable articulation de type fibreux, vont s'ossifier avec le temps. Elles jouent un rôle crucial dans la croissance rapide du cerveau, représentant pendant des années des zones actives de prolifération conjonctive, véritables joints de dilatation selon Delaire. (27) On distingue les sutures :

- Sagittale située entre les deux os pariétaux.
- Coronale : elle se localise entre l'os frontal et l'os pariétal.
- Lambdoïde : entre l'os pariétal et occipital.
- Temporo-pariétale. (36)

La jonction entre ces différentes sutures est appelée fontanelle et sont au nombre de 6 :

- La fontanelle antérieure (ou bregma) est la plus importante, elle disparaît entre 15 et 18 mois.
- Les 2 fontanelles sphénoïdes (ou ptériques) se ferment à 6 mois.

- Les 2 fontanelles mastoïdiennes ou astériques se ferment à 18 mois.
- La fontanelle postérieure (lambda) est la première à s'ossifier. Elle a une forme triangulaire et se ferme entre 2 et 3 mois. Elle se trouve entre les sutures lambdoïde et sagittale ou interpariétale.

Toutes ces fontanelles sont constituées de tissu membraneux cartilagineux flexible.

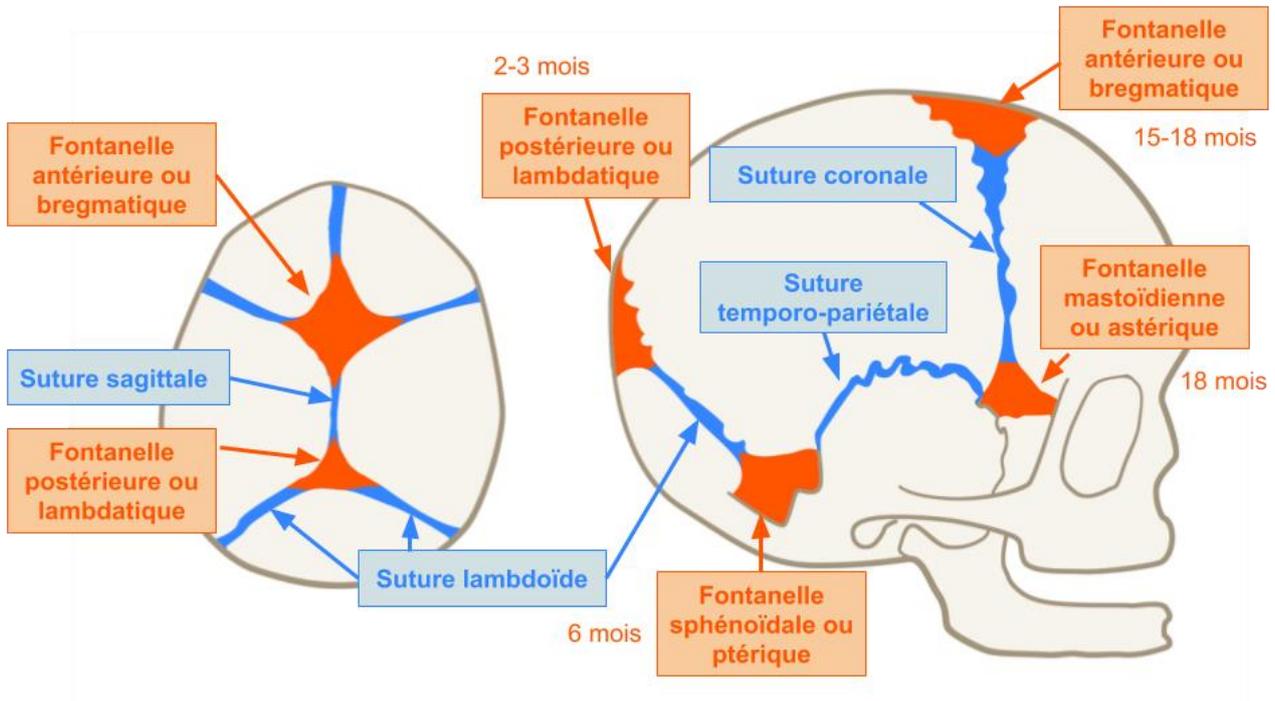


Figure 3 Sutures, fontanelles et date de fermeture des fontanelles.(40)

3.2.1.c. Immaturité du cou

Le rachis cervical est une région anatomique complexe joignant la tête au reste du corps. Son rôle est d'assurer la stabilité de la tête tout en permettant sa mobilité. En effet, la colonne cervicale est équivalente à un mât flexible, rigidifié ou mobilisé grâce au système musculaire qui l'entoure. (37) Ces muscles de la nuque doivent à tout instant contrebalancer le poids de la tête afin d'éviter de la faire tomber en avant. (38) A la

naissance, le manque de tonicité et la laxité des structures de soutien de la tête entraînent une plus grande difficulté à sa tenue et une résistance minimale à tout mouvement extérieur ce qui explique en partie la fréquence plus élevée de blessures à la tête du nourrisson.

De plus, durant les premières années de vie, les vertèbres cervicales sont des surfaces plates et peu profondes. Elles sont constituées d'os de nature cartilagineuse et dont l'ossification n'est pas aboutie ce qui augmente le potentiel de déplacement relatif entre les vertèbres. Le cou dans son ensemble peut alors s'étirer de manière significative au-delà des limites de subluxation sans rupture ligamenteuse. (39)

3.2.2. Spécificités géométriques

3.2.2.a. Proportion tête/corps

Le rapport entre la tête d'un enfant et son corps est bien plus important que chez l'adulte et plus un enfant sera jeune, plus ce rapport sera grand en termes de volume et poids. (

Figure 4) La tête pèse à la naissance jusqu'à un tiers du poids total du corps, ce qui explique qu'elle est en réalité une masse presque sans support. La croissance importante de la tête se poursuit tout au long de l'enfance : en effet, à 18 mois, 70% du poids du cerveau adulte est atteint, 80% à 3 ans et environ 95% à la 10ème année, le poids moyen d'un cerveau adulte étant de 1350g. (40)

Le point d'impact d'un enfant très jeune sera donc le plus souvent situé au niveau de l'extrémité céphalique. (41)

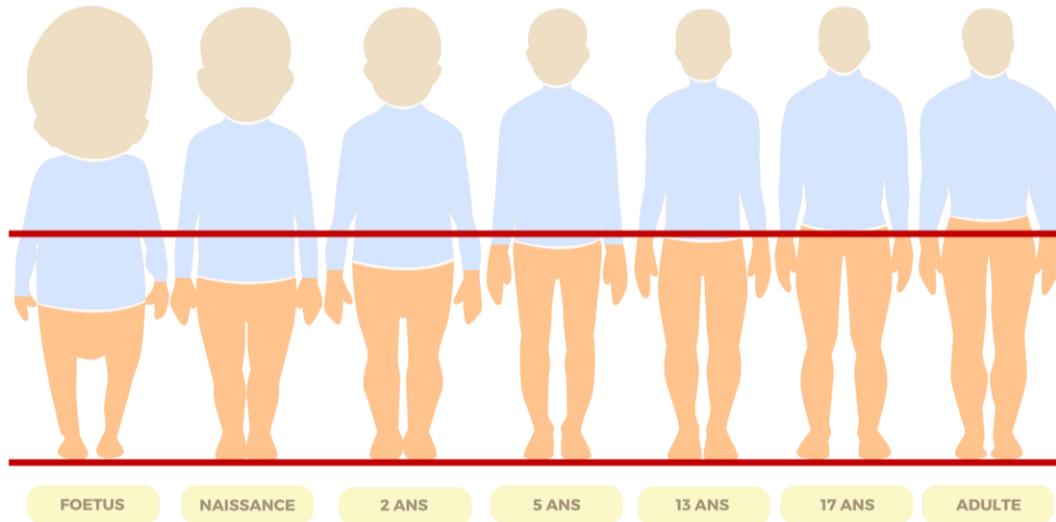


Figure 4 Répartition des segments du corps en fonction de l'âge. (40)

3.2.2.b. Evolution différentielle crâne/face

La proportion entre le crâne et la face d'un enfant est différente de celle d'un adulte. En effet, le crâne et la face subissent deux croissances distinctes avec des pics d'évolutions à des intervalles différents. (Figure 5) (30)

La croissance de la boîte crânienne suit parallèlement l'augmentation du volume de l'encéphale puis de ses enveloppes permettant une bonne compliance de la boîte crânienne. Cette croissance est non uniforme. En effet, elle est rapide les deux premières années post-natales et est possible grâce à l'activité du tissu conjonctif des sutures et fontanelles qui séparent les différents os. Ainsi, la taille cérébrale d'un nourrisson double entre la naissance et le 7^{ème} mois. Après 5 ans, la dimension du diamètre crânien se stabilise.

Au contraire, la face se développe plus lentement avec des pics situés après la naissance et lors de la puberté. (34) À la naissance, la partie faciale de la tête est plus petite que le crâne avec un rapport face/crâne de 1/8 (le rapport adulte est de 1/2,5). La croissance verticale du visage du nourrisson est liée aux besoins respiratoires et à l'éruption dentaire. La première poussée de croissance est principalement olfactive, associée à la croissance

verticale de la partie supérieure du nez et de la cavité nasale.

La croissance de l'extrémité céphalique et plus précisément de la face dépend également des fonctions propres à chacun comme la ventilation, la phonation, la mastication, la vision et l'olfaction. (34)

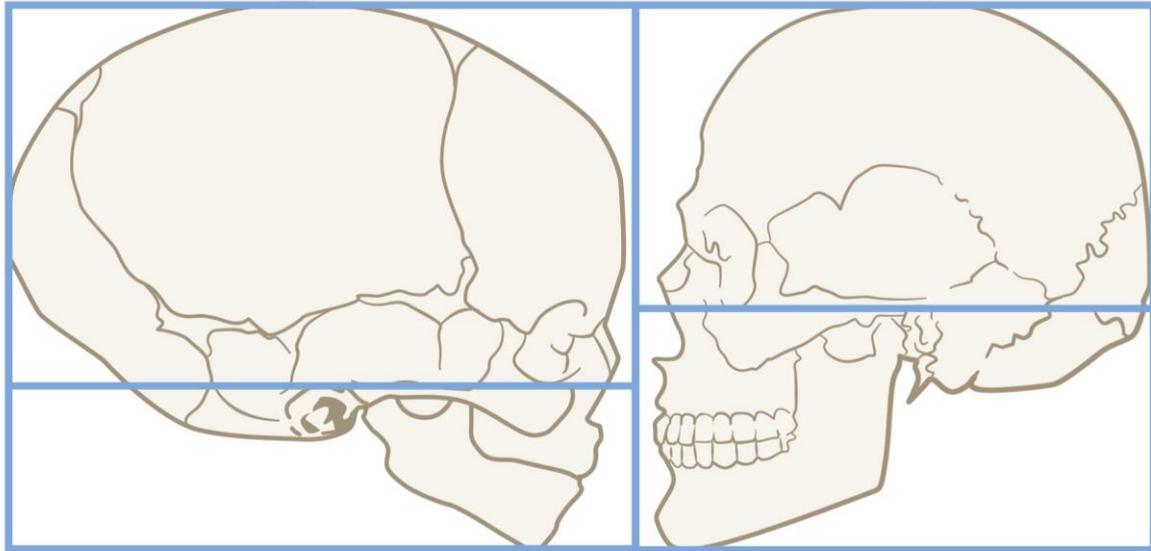


Figure 5 Comparaison entre la proportion de la face et du crâne chez l'enfant et l'adulte. (40)

3.2.3. Spécificités mécaniques

3.2.3.a. Rappels sur les notions mécaniques des matériaux

Les changements anatomiques et géométriques de la boîte crânienne sont associés à une modification des propriétés du crâne et des sutures d'un nourrisson au cours de sa croissance. L'os crânien, comme tout autre matériau, réagit aux stimulations extérieures de manière spécifique selon sa propre loi de comportement. Cette loi caractérise les relations entre les efforts appliqués et les déformations recueillies grâce à des essais mécaniques consistant à appliquer des forces et à en mesurer les réponses.

Les propriétés d'un matériau élastique sont définies par un certain nombre de constantes d'élasticité tel que :

- le **module de Young** ou **module d'élasticité** : le module d'élasticité d'un matériau permet d'évaluer sa rigidité sous une contrainte. En effet, plus le module d'élasticité

est élevé, plus le matériau est rigide et moins il se déforme sous la contrainte.

Lorsque la contrainte est faible, la loi d'élasticité est la loi de Hooke : $\sigma = E \varepsilon$ où

σ est la contrainte (en unité de pression),

E est le module de Young (en unité de pression),

ε est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel).

- le **coefficient de Poisson** qui permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué.

3.2.3.b. Spécificités mécaniques du crâne et du cerveau

En 1979, McPherson et Kriewall (42) ont abordé les influences possibles de l'âge et de l'orientation de la fibre osseuse sur le module élastique. Après avoir effectué des essais de flexion en 3 points sur 86 échantillons de 6 crânes de fœtus, ils en ont conclu qu'il existe une différence significative entre le module d'élasticité des fœtus prématurés et ceux arrivés à terme. De plus, le crâne d'un nouveau-né présente des modules d'élasticité différents en fonction de l'orientation perpendiculaire ou parallèle des contraintes par rapport à la trame osseuse. Il est en effet inférieur lorsque les fibres sont perpendiculaires à la contrainte et si le nourrisson est né prématurément.

Le Tableau 1 répertorie les moyennes des résultats obtenus :

	Module d'élasticité si la contrainte est parallèle à la trame osseuse (en MPa)	Module d'élasticité si la contrainte est perpendiculaire à la trame osseuse (en MPa)
Prématurés	1650	145
A terme	3880	951

Tableau 1 Module d'élasticité en fonction de l'orientation des fibres osseuses et de la prématurité du fœtus selon Mc Pherson et Kriewall (1980). (42)

Les os crâniens d'un nouveau né sont donc généralement beaucoup plus solides et plus

rigides dans la direction transversale ou tangente à la direction du crâne par rapport à la direction radiale. (43) Cette différence est importante durant les premières années de vie mais ne persiste pas à l'âge adulte. Ces résultats ont été confirmés en 2000 par Margulies et Thibault. (44)

En 1997, Irwin et Mertz (45) ont établi les modules d'élasticité ainsi que les limites de tolérance suite à un impact au niveau du frontal d'enfants de 6, 12, 18 mois, 3 et 6 ans en se basant sur des résultats expérimentaux validés obtenus sur des adultes et la technique de facteurs d'échelle.

Âge	6 mois	12 mois	18 mois	3 ans	6 ans	Adulte
Module d'élasticité (GPa)	2,8	3,2	3,6	4,7	6,6	9,9

Tableau 2 Module d'élasticité du crâne en fonction de l'âge selon l'étude de Irwin et Mertz (1997). (45)

Coats et Margulies (2006) (46) ont effectué des tests dynamiques de flexion et de tension en trois points sur l'os crânien et la suture du nourrisson. Il a été observé que plus l'âge du nourrisson augmentait, plus le module d'élasticité et la contrainte ultime de l'os crânien augmentaient également. Il a également été constaté que la suture du nourrisson se déforme considérablement (30 fois plus) par rapport à l'os crânien avant rupture. Cela signifie qu'en raison de la flexibilité du crâne, des lésions cérébrales peuvent toujours survenir même en l'absence de fracture du crâne.

Il en résulte que les sutures, en plus d'assurer la fonction de croissance des os, permettent également une fonction biomécanique, (47,48) rendant alors possible une certaine déformation et résistance aux forces associées à l'accouchement lors du passage de la voie génitale. (35) Le module d'élasticité étant moins important sur les sutures, l'absorption d'énergie est alors augmentée ce qui permet de réduire le stress subi par les os environnants et d'agir comme un coussin dans le crâne. Cet effet est cependant dépendant de la morphologie de la suture, de l'orientation de ses fibres et du taux de charge. (49–52)

L'ensemble des particularités du crâne d'enfants confirment l'importance de prendre en compte les caractéristiques morphologiques de l'extrémité céphalique propres à l'enfant

afin de mieux appréhender les lésions traumatiques suite à un épisode de maltraitance qui en résultent. La connaissance de ces spécificités permet en effet l'amélioration du dépistage et du diagnostic de la maltraitance chez l'enfant.

4. BILAN DES OUTILS EXISTANT DANS LE DIAGNOSTIC DIFFERENTIEL DE LA MALTRAITANCE PHYSIQUE

4.1. Les outils d'évaluation actuels

Lors de l'arrivée d'un traumatisme crânien aux urgences pédiatriques, il est primordial de différencier une blessure accidentelle d'une blessure consécutive à une maltraitance. Pour cela, un examen complet de l'enfant doit être entrepris. Une blessure à caractère intentionnel est suspectée en prenant en compte la nature et la topologie de la ou les lésions, les antécédents cliniques de l'enfant et/ou de la fratrie, le récit de l'historique de la blessure ou encore l'attitude et réactions de l'enfant et des parents faisant penser à un traumatisme infligé. (53,54) Le retard aux soins et une incohérence entre la nature des lésions, l'âge de l'enfant, son niveau de développement et le mécanisme invoqué doivent également être pris en compte. Enfin, la précocité, la gravité, la répétition, la chronicité représentent les signaux d'alerte dans l'identification de la maltraitance. (1,55)

4.1.1. Repérage des types de fracture du crâne caractéristiques

Pour des raisons pratiques, nous ne développerons pas l'ensemble des signes cliniques caractéristiques d'une maltraitance au niveau post crânien et allons nous concentrer sur les fractures rencontrées au niveau de l'extrémité céphalique.

Bien que de nombreuses études aient décrit des types de fracture évoquant des abus, (3,56–61) il n'existe pas de schéma de fracture permettant un diagnostic certain. (62)

L'imagerie radiographique aura alors pour but d'identifier l'étendue des fractures et de mettre en évidence qu'il s'agit bien d'un cas de maltraitance en excluant l'alternative d'un accident. Une maltraitance doit être suspectée dès que plusieurs fractures osseuses sont observées. En effet, Weber a démontré dans des études expérimentales qu'un seul

impact au niveau de la tête pouvait entraîner de multiples fractures osseuses au niveau du crâne. (3) Il sera également important de repérer la présence de lésions complexes, d'âges différents, (60) situées à des localisations inhabituelles pour des chutes (54,63) indiquant plusieurs épisodes de violence, et donc un haut risque de récurrence. (61) Un trait de fracture supérieur à 3 cm est également un signe d'une potentielle maltraitance. (59) La fracture linéaire localisée unilatérale de l'os pariétal et sans dépression est souvent retrouvée chez les enfants maltraités, néanmoins il s'agit également de la fracture la plus répandue dans les accidents. L'ensemble des fractures suspectes retrouvées dans la littérature a été répertorié dans la Figure 6.

TYPE DE FRACTURES SUSPECTES
Multiplés
A localisation inhabituelle
Longueur de la fracture > 3 cm
Bilatérale
Fractures d'âges différents
Complexe
Fracture déprimée
Lésion intracrânienne associée
Fracture avec enfoncement occipital

Figure 6 Résumé des types de fractures entraînant la suspicion d'une maltraitance.

4.1.2. Types d'imagerie utilisés

En premier lieu, une radiographie corps entier permet d'avoir une vue globale de la structure osseuse de l'enfant et de détecter des lésions plus ou moins récentes. Ce bilan osseux permet le repérage de la moitié des fractures dues à des violences. (54,64)

Si la moindre suspicion de maltraitance physique survient, le scanner est le premier examen à effectuer quel que soit l'âge de l'enfant. (64) Son accessibilité et sa simplicité en font un examen d'urgence de choix. En effet, l'examen ne dure que quelques secondes et

est réalisable sans sédation ce qui représente un véritable avantage chez les enfants. Cet examen a une excellente sensibilité et spécificité pour détecter les fractures crânio-faciales par rapport à l'IRM. Le scanner permet aussi de détecter des hémorragies intracrâniennes.

L'IRM (Imagerie à Résonance Magnétique) aura davantage une visée pronostique. (65,66) Chez les enfants complètement asymptomatiques mais dont la suspicion d'une maltraitance est tout de même présente (au sein d'une fratrie d'un cas avéré par exemple) l'IRM est proposée en première intention, à la recherche de lésions subaiguës. Chez les enfants symptomatiques durant la première semaine, elle est recommandée en complément du scanner. (64)

Les critères radiographiques, notamment au niveau du crâne, peuvent permettre la mise en évidence d'une maltraitance infantile. Néanmoins, depuis quelques années, les progrès de l'imagerie ainsi que des performances informatiques ont permis l'utilisation progressive de ces données afin de reconstituer virtuellement les structures anatomiques et constituer une réelle aide au diagnostic.

4.2. Les différents travaux réalisés utilisant des modèles éléments finis de l'extrémité céphalique chez l'enfant

Afin de compléter les apports de l'imagerie dans le diagnostic différentiel de la maltraitance infantile, l'analyse des modèles éléments finis de la tête d'un enfant sont de plus en plus utilisés afin de comprendre sa biomécanique lors de certains traumatismes crâniens. En effet, pour des raisons éthiques, les crânes d'enfants ne sont plus utilisés à des fins de tests expérimentaux sur la réponse dynamique de la tête de l'enfant et les modèles numériques se révèlent alors très utiles pour prédire les conséquences d'un impact lors d'un traumatisme.

4.2.1. Définition d'un modèle éléments finis

La méthode par éléments finis consiste à créer un modèle virtuel qui s'approche de la géométrie d'une structure réelle. Celui-ci se compose d'un nombre fini de sous ensembles

de forme géométrique simple appelés éléments. Les sommets de ces éléments sont appelés nœuds, ils assurent la connexion entre les éléments. L'ensemble est nommé maillage. Différents éléments peuvent être utilisés selon la structure à modéliser tels que les éléments de coque et les éléments solides de forme tétraédrique et hexaédrique. (67) (Figure 7)

Il est alors possible d'établir des forces sur l'ensemble de ces éléments et d'en mesurer les réponses. Cette analyse par éléments finis permet finalement d'obtenir une estimation réaliste du déplacement des contraintes et de l'énergie de déformation pour tout élément du modèle et d'anticiper sa réaction face à des contraintes appliquées. (32)

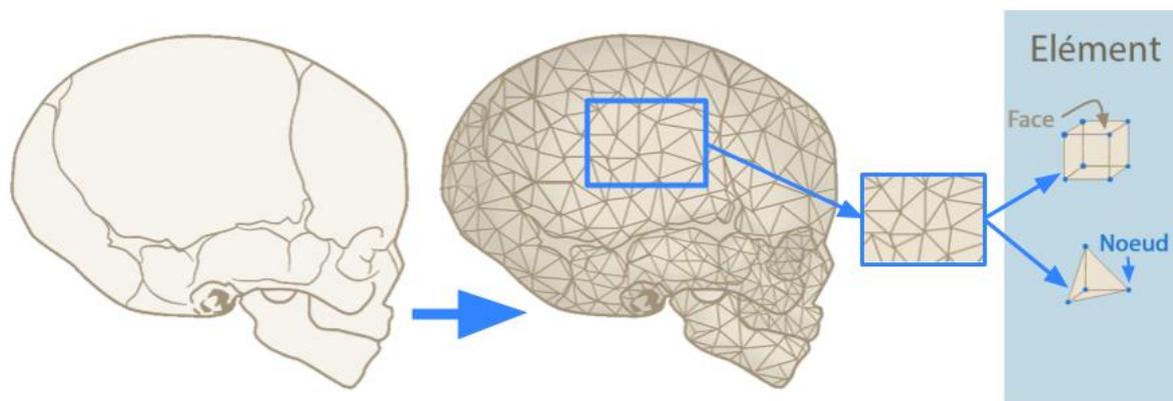


Figure 7 Description d'un modèle éléments finis.

4.2.2. Les différents modèles éléments finis tête enfants

Si de nombreux modèles éléments finis adultes ont été mis en place, très peu d'études sur les enfants ont été validées en raison du manque de données expérimentales disponibles. L'ensemble des études sur les modèles éléments finis chez l'enfant a été répertorié dans cette partie, y compris les modèles visant un autre domaine que la maltraitance. La plupart des applications de ces modèles éléments finis enfants repose en effet sur l'étude de la déformation du crâne d'un nourrisson lors de l'accouchement ainsi que l'analyse des crânes d'enfants lors d'un accident motorisé.

En 2001, Lapeer et Prager (4) ont mis au point un modèle élément fini du crâne d'un nouveau-né afin d'analyser les déformations des os pariétaux lors du premier stade

de l'accouchement. Il s'agit d'un modèle statique et linéaire des os pariétaux grâce auquel il a été possible de comparer significativement les mesures de déformations du modèle par rapport à celles de photos prises juste après l'accouchement. Néanmoins, il s'agit d'un modèle simplifié avec peu de paramètres sur les propriétés des matériaux du crâne d'enfant par rapport aux nombreux facteurs impliqués dans la déformation du crâne lors du processus de naissance.

En 2002, Desantis et Klinich (5) ont créé un modèle élément fini de la tête d'un enfant de 6 mois afin de prédire sa réponse aux chocs et la tolérance à la fracture du crâne grâce à des tests de reconstitution d'un accident de voiture. Dans ce modèle, la face, le cerveau, la dure mère et le liquide céphalo rachidien, le crâne et les sutures ont été modélisés. Un des avantages de cette étude est la prise en compte du rôle des sutures et fontanelles considérées comme une charnière lors des chocs. Les auteurs ont également corrélé la réponse du modèle en termes de déformation et de distribution des contraintes à des cas réels.

En 2007, Coats et Margulies (6) ont mis au point un modèle éléments finis de la tête d'un nouveau né de 1,5 mois afin d'étudier les fractures du crânes causées par des impacts occipitaux lors d'une chute de 0,3m. Cette étude a été validée en comparaison à des études expérimentales sur des crânes d'enfants. Il en a résulté que le modèle n'est pas sensible aux petites variations anatomiques des structures du crâne.

En 2007-2008, Roth et al. (7) ont développé un modèle éléments finis de crâne d'enfant de 6 mois afin d'étudier la réponse mécanique intracérébrale du crâne lors du syndrome du bébé secoué (pression intracérébrale, de cisaillement et de perte de contrôle relatif du mouvement du cerveau et du crâne). Le modèle éléments finis a été créé à partir d'images tomodensitométriques et les matériaux et propriétés se sont basés sur la littérature. (68) Puis en 2008-2009, Roth et al. (69) ont étudié la réponse mécanique du crâne d'un enfant de 3 ans lors d'un accident de voiture grâce à un modèle éléments finis.

En 2011, Li et al. (8) ont mis en place des modèles éléments finis de crânes d'enfants de 0 à 3 mois en se basant sur 11 images tomodensitométriques. Pour la première fois, la géométrie tridimensionnelle du crâne et des sutures a été quantifiée de manière détaillée. La validation a pu être obtenue grâce à des comparaisons avec des

tests sur cadavres. Néanmoins, le peu de sujet étudiés (11) et le manque de données disponibles sur les cadavres d'enfants ne permettent pas une validation optimale et un ajustement des performances du modèle. Les résultats de cette étude indiquent qu'il est important de prendre en compte les propriétés des matériaux et les variations géométriques lors de l'estimation des réponses de la tête chez l'enfant et de la prévision des risques de traumatisme crânien.

Li et al. en 2015 (9) ont mis en place un modèle statistique en éléments finis pour d'enfants entre 0 et 3 ans en se basant sur les images tomodensitométriques de 56 crânes. Le repérage des caractéristiques géométriques du crâne du nourrisson, telles que la taille, la forme et l'épaisseur du crâne, ainsi que la largeur de la suture, ont été quantifiées à l'aide d'images tomodensitométriques et d'une analyse statistique. Grâce à cette analyse d'image puis analyse statistique, un modèle a été créé afin que la géométrie d'un crâne de nourrisson puisse être générée et généralisée en fonction de l'âge et du tour de tête du nourrisson. Les propriétés mécaniques telles que la densité ou le module d'élasticité n'ont pas été prises en compte.

En 2017, l'étude de Li et al. (70) est la première à se baser sur l'hypothèse que les modèles composés de matériaux non linéaires sont plus à même de représenter l'extrémité céphalique chez l'enfant. Un modèle au comportement élastique non linéaire comprenant le cuir chevelu, les sutures, la dure mère, le crâne, le liquide céphalo rachidien et le cerveau a été créé. Par la suite, cinq tests d'impact (impacts sur le front, l'occiput, le vertex, pariétal droit et gauche) et deux tests de compression ont été réalisés sur ce modèle et les résultats obtenus pour différents groupes d'âge concordent bien avec les données expérimentales rapportées dans la littérature.

Les différents travaux réalisés ont été résumés dans le tableau en annexe. (Tableau 6)

Ces études apportent chacune une réelle amélioration de la compréhension de la biomécanique de la tête de l'enfant et la méthode des éléments finis tend à être de plus en plus utilisée. Le but de notre projet est de mettre en place une méthodologie pour la conception d'un crâne d'enfant par éléments finis à l'aide de logiciels accessibles à tous.

5. PROTOCOLE

5.1. Problématique

Lors d'un traumatisme crânien, le doute d'une maltraitance est potentiel lorsque les propos des parents sont équivoques eu égard aux circonstances du traumatisme. Face à ce problème, des travaux sur la modélisation d'une tête d'enfant et son étude par éléments finis sont de plus en plus utilisés et permettent d'améliorer les évaluations de traumatismes crâniens. Leur réalisation reste cependant à ce jour très longue et complexe et est permise grâce à des logiciels spécialisés. Parallèlement, se sont développés des logiciels accessibles à tous rendant cette méthode abordable au plus grand nombre d'utilisateurs, même novices. Ces logiciels sont des programmes gratuits et évolutifs et sont spécialisés dans un domaine particulier tel que la modélisation par éléments finis. Toute la communauté mondiale y a accès et peut les mettre à jour. (71)

5.2. Objectif

Suite à une acquisition tomодensitométrique de l'extrémité céphalique d'un enfant de 6 mois, l'objectif de ce travail est de proposer une méthodologie permettant la création d'un modèle pouvant servir dans une analyse par éléments finis à l'aide de logiciels gratuits dédiés à cette procédure. Les difficultés et les limites de cette méthode seront présentées et des solutions proposées afin de s'en défaire. Ce modèle permettra par la suite d'étudier les effets des forces s'exerçant sur lui et de le valider au regard des données cliniques d'enfants présentant des lésions suite à des actes de maltraitance avérés. Ainsi, il sera possible d'avoir une aide diagnostique différentielle complémentaire dans l'évaluation des traumatismes de l'enfant eu égard le contexte de l'étiologie de ces lésions.

5.3. Méthode

Cette étude expérimentale se divise en plusieurs étapes :

PHASE 1 - A partir d'une acquisition tomodensitométrique de l'extrémité céphalique d'un enfant, la première étape consiste en une segmentation d'un crâne à l'aide du logiciel ITK-SNAP.

PHASE 2 – L'amélioration du fichier surfacique, la correction des erreurs grâce au logiciel Meshlab et la retopologie du modèle permettent son importation dans un logiciel d'analyse par éléments finis.

PHASE 3- Enfin, le paramétrage du modèle pour exploitation par méthode d'analyse par éléments finis et simulation de forces est réalisé grâce au logiciel FreeCAD.

5.3.1. Segmentation du crâne à l'aide du logiciel ITK-snap

Pour réaliser cette étape, des acquisitions tomodensitométriques de la tête d'un nourrisson de 6 mois suite à sa mort subite ont été utilisées. Ces images radiologiques sont issues de l'Institut Médico-Légal (IML). Cet âge a été opté en raison de la fréquence des traumatismes crâniens non accidentels.

5.3.1.a. Présentation ITK snap

Définition et indications

ITK-snap est un logiciel en libre accès créé en 2006 et spécialisé dans le traitement d'images médicales. Il permet la visualisation d'images et surtout la segmentation de structures anatomiques. Dans notre cas, cette segmentation consiste à isoler la structure osseuse du crâne d'un enfant pour aboutir à la création d'un modèle tridimensionnel.

Le logiciel est capable de prendre en charge les imageries de type IRM (Imagerie à Résonance Magnétique) ainsi que les imageries tomodensitométriques et est utilisé par tous les domaines médicaux prenant en charge cette imagerie 3D en particulier la neuroimagerie et la cardiologie. Dans des expérimentations plus récentes, la segmentation est utilisée en médecine légale afin de prévoir et mieux appréhender les blessures suite à un accident de la circulation ou encore une maltraitance.

La fenêtre principale

Après importation du fichier Dicom, nous avons 3 fenêtres représentant les 3 plans de l'espace : axial, coronal et sagittal. Le curseur tridimensionnel commun à ces 3 plans permet de se concentrer sur une seule partie du scanner dans les 3 plans de l'espace. En effet, à chaque fois qu'on déplace le curseur sur un des plans, les autres fenêtres se centrent instantanément sur le même emplacement. La 4^{ème} vue représente un affichage du rendu de surface 3D de la segmentation. (Figure 8) Les images peuvent être visualisées de deux manières différentes: une disposition en mosaïque, où les 3 plans de coupe coronal, axial et sagittal sont affichés (Figure 8) et une disposition en vignettes, dans laquelle un plan de coupe choisi occupe l'intégralité de la fenêtre. Des outils de réglage de contraste linéaire et non linéaire sont également présents afin de mettre en évidence distinctement les zones osseuses à segmenter.

Le but est de différencier au maximum la structure à segmenter des autres zones anatomiques afin de se retrouver avec deux niveaux de gris extrêmes (noir et blanc) pour que la segmentation soit plus aisée. (Figure 9)

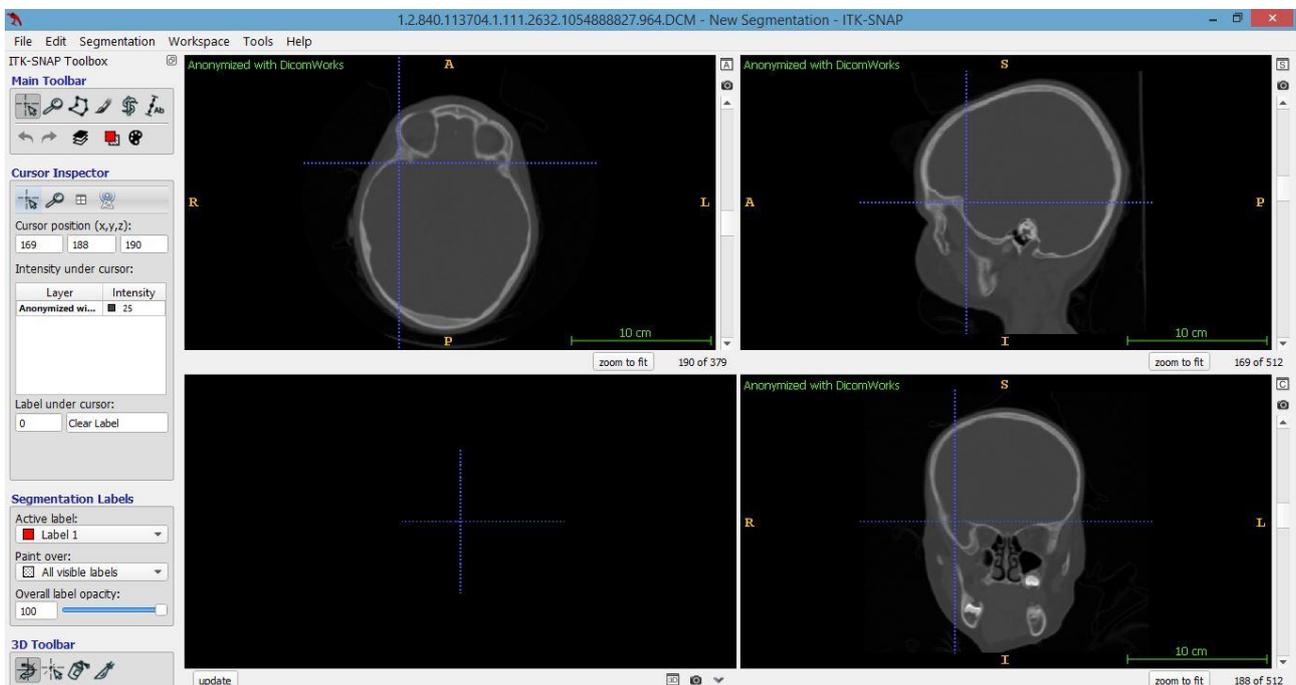


Figure 8 Disposition en mosaïque d'images tomographiques avec contraste par défaut. (Source : S. Nguyen)

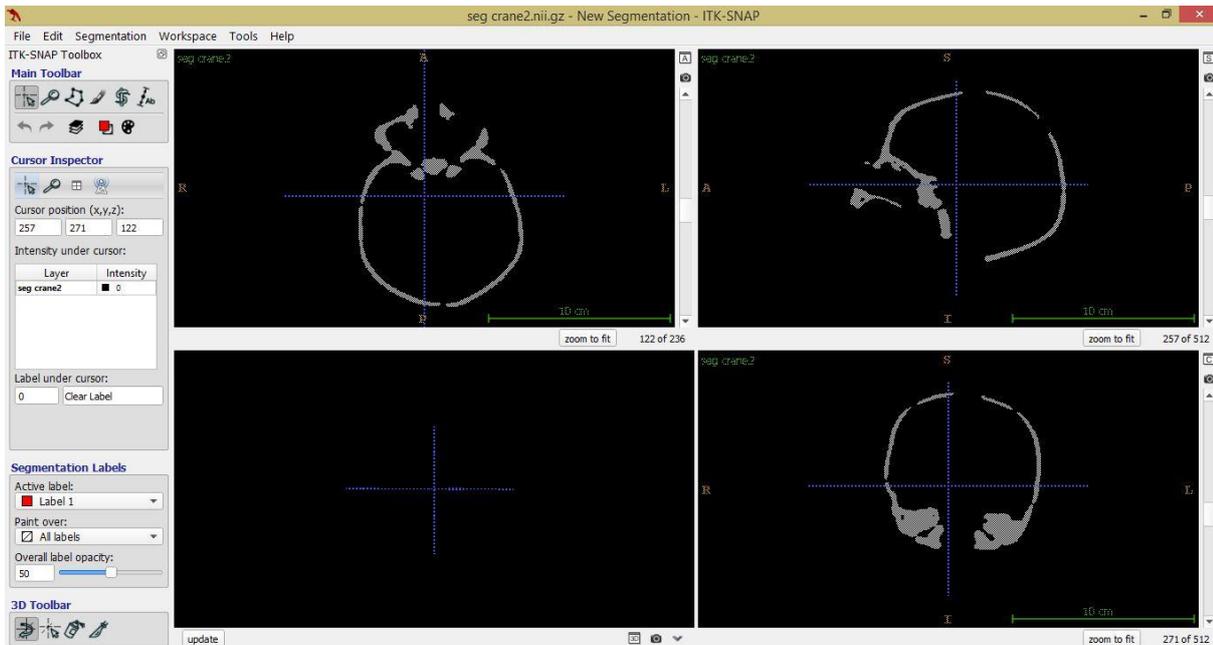


Figure 9 Images après réglage du contraste mettant en évidence la structure osseuse. (Source : S. Nguyen)

La boîte à outils

Le pointeur permet de se déplacer dans chacun des 3 plans. Un « curseur 3D » disponible dans la boîte à outils 3D permet de naviguer à travers les volumes en concentrant les 3 vues sur le même emplacement de l'image 3D.



La loupe est utilisée afin d'agrandir ou réduire une zone d'intérêt.



Le polygone permet de détourner manuellement les parties à segmenter.



Le pinceau permet de segmenter manuellement une zone précise.



Le serpent est utile pour la segmentation automatique ou semi-automatique. Cet outil permet de délimiter la zone anatomique qui nous intéresse pour la segmentation.



Segmentation manuelle

La segmentation se fait à l'aide des outils polygone (détourage plan par plan d'une forme) ou pinceau. Avec l'outil Polygone, l'utilisateur trace la région dans l'une des vues coupe par coupe. L'outil Pinceau permet de dessiner et de faire des retouches rapidement, avec des masques de formes et de tailles différentes. Il s'agit d'une méthode très précise mais extrêmement longue.

Segmentation semi automatique

La segmentation semi automatique est la plus utilisée car les segmentations entièrement automatiques ne sont pas disponibles ou ne fonctionnent pas au niveau de précision souhaité. Il s'agit d'une alternative rapide à la segmentation manuelle jugée trop longue et fastidieuse, les imageries étant de plus en plus précises et complexes. La segmentation semi-automatique permet à l'utilisateur de guider la segmentation tout en minimisant les tâches pouvant être automatisées.

5.3.1.b. Les différentes étapes de la segmentation semi-automatique

5.3.1.b.i. Sélection de la zone d'intérêt

La première étape consiste à se positionner sur l'os qui nous intéresse dans une des 3 vues (plan axial, longitudinal et horizontal) grâce au pointeur.

L'outil à la forme de serpent sert à délimiter la zone anatomique d'intérêt ou ROI (Region Of Interest). (Figure 15) Une zone trop limitée permettra un travail plus précis mais aura le désavantage de devoir multiplier les étapes de segmentation. Au contraire avec une zone trop étendue, le temps de segmentation sera allongé et pourra entraîner subitement l'arrêt du logiciel.

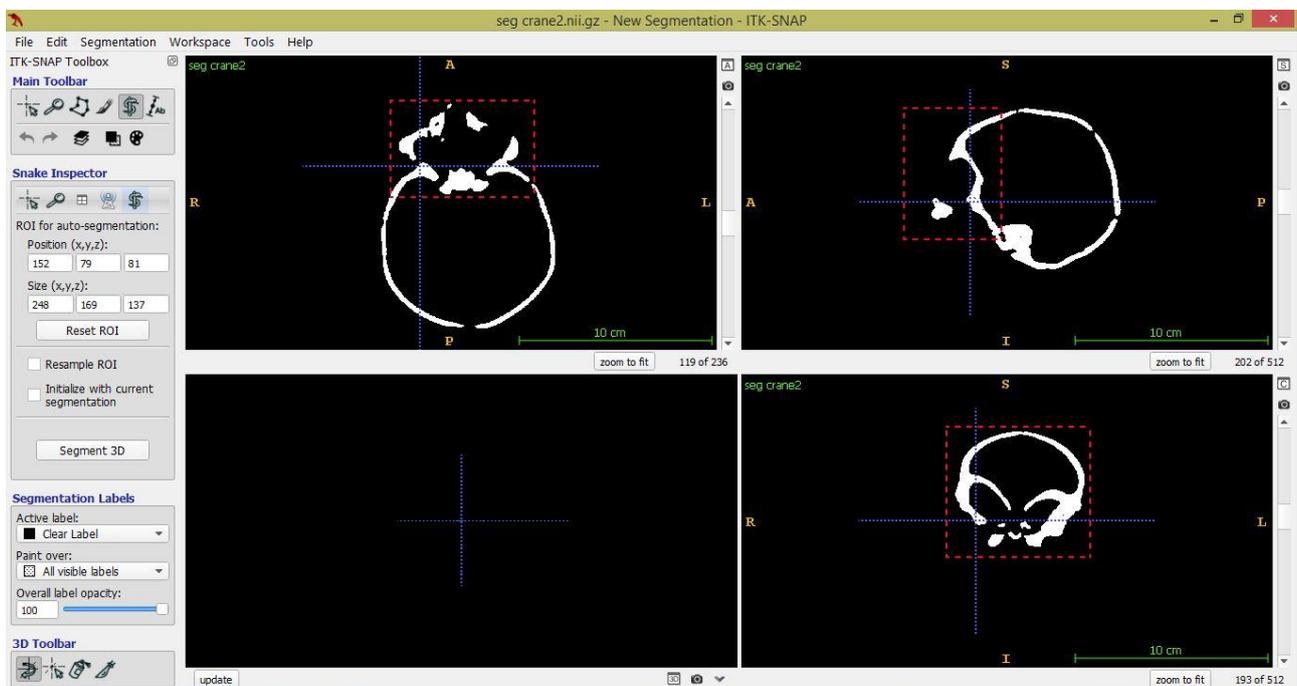


Figure 15 Sélection de la zone d'intérêt représentée par le cadre rouge. La modification du contraste des images tomodensitométriques permet de mettre en évidence seulement la partie que l'on souhaite segmenter. (Source : S. Nguyen)

5.3.1.b.ii. Pré segmentation

Après avoir cliqué sur « segment 3D », la zone délimitée va être isolée et l'image transformée en bleu et blanc. En faisant varier les contrastes, le but est d'obtenir de la façon la plus contrastée possible l'os en blanc et le reste de l'image bleue. L'image blanche représentera la structure que l'on souhaite transformer en 3D. (Figure 16)

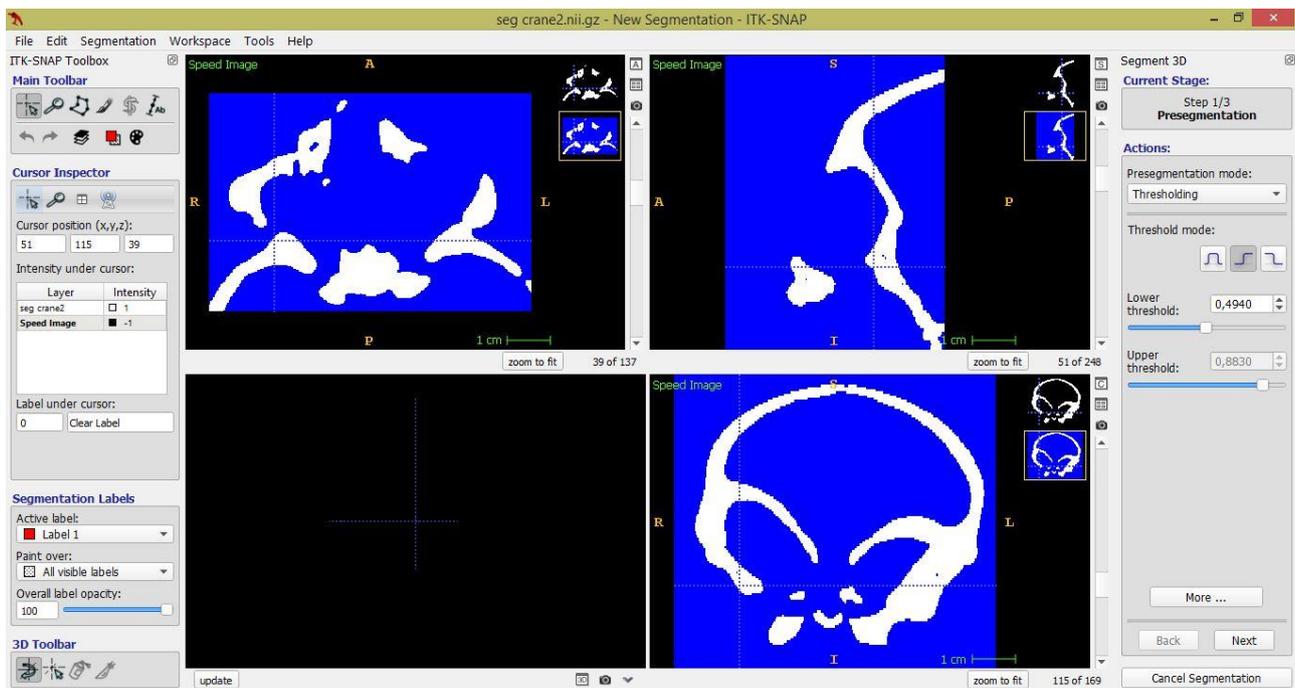


Figure 16 Pré segmentation. La structure osseuse intéressée est représentée en blanc, le reste des structures est la zone bleue. (Source : S. Nguyen)

5.3.1.b.iii. Segmentation active du contour

Pour cela, des bulles seront ajoutées et réparties harmonieusement à l'intérieur de la zone qui nous intéresse. (Figure 17) La taille des bulles est modifiable, l'objectif étant de garder au maximum les bulles à l'intérieur de la zone d'intérêt. Néanmoins, des bulles trop volumineuses déborderont hors de notre zone d'intérêt et la segmentation sera alors faussée. L'actionnement des bulles va permettre d'induire leur expansion jusqu'au remplissage total de la zone d'intérêt. La fin de la segmentation est inspectée visuellement et arrêtée manuellement. (Figure 18)

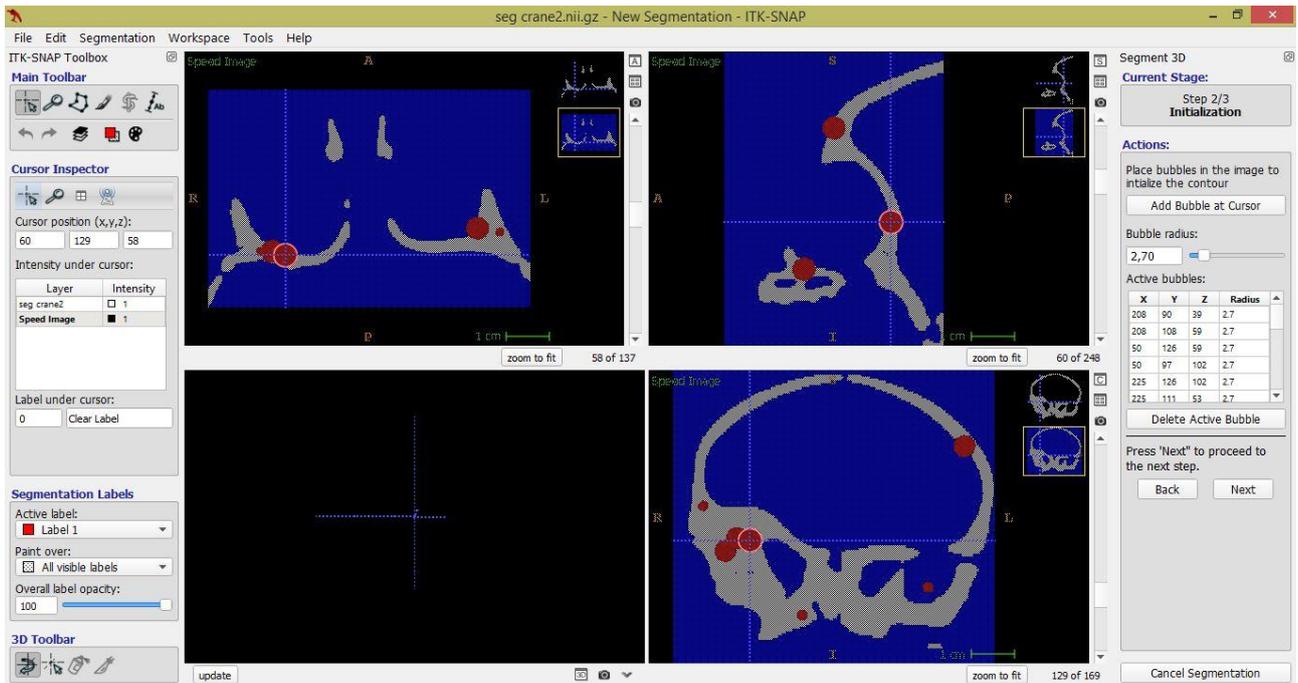


Figure 17 Répartition des bulles. (Source : S. Nguyen)

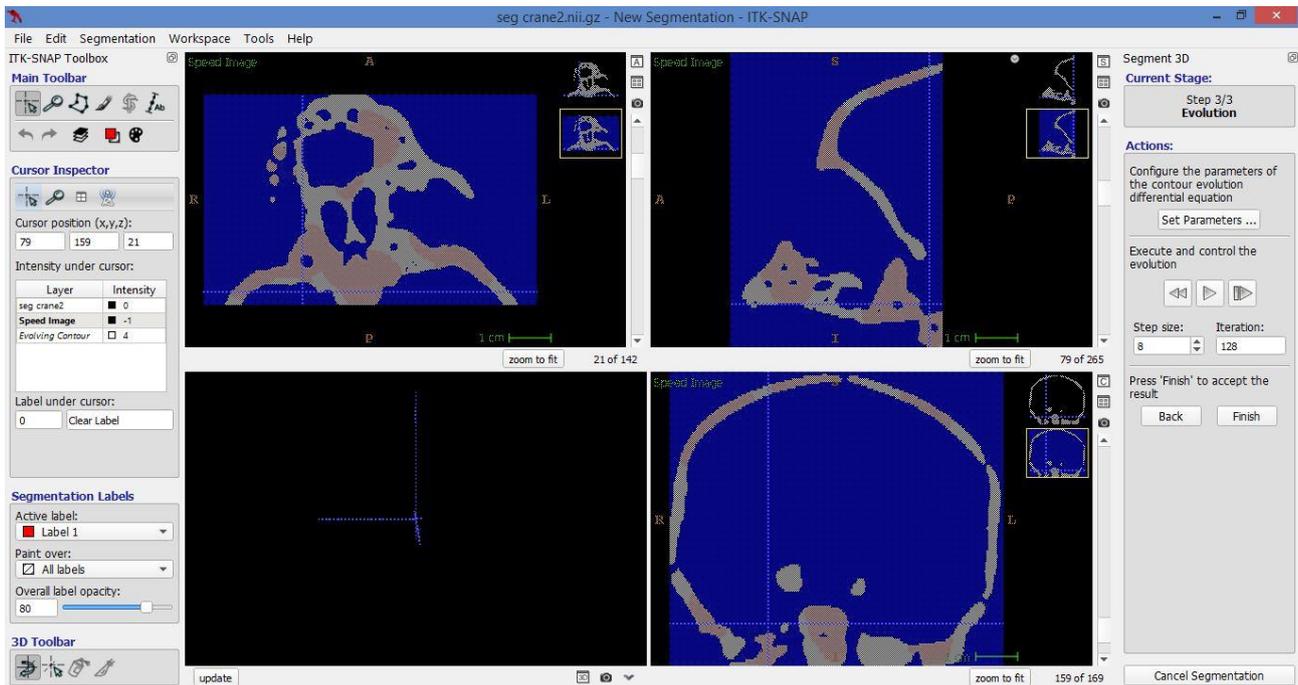


Figure 18 Expansion des bulles. (Source : S. Nguyen)

Cette segmentation est visible sous la forme d'une couche semi-opaque superposée aux images anatomiques et l'ensemble de la pièce anatomique segmentée est visible en 3D dans la fenêtre inférieure gauche du logiciel. Il est possible de régler l'opacité de la segmentation créée. L'opération sera répétée jusqu'à ce que l'intégralité du crâne soit modélisée. (Figure 19)

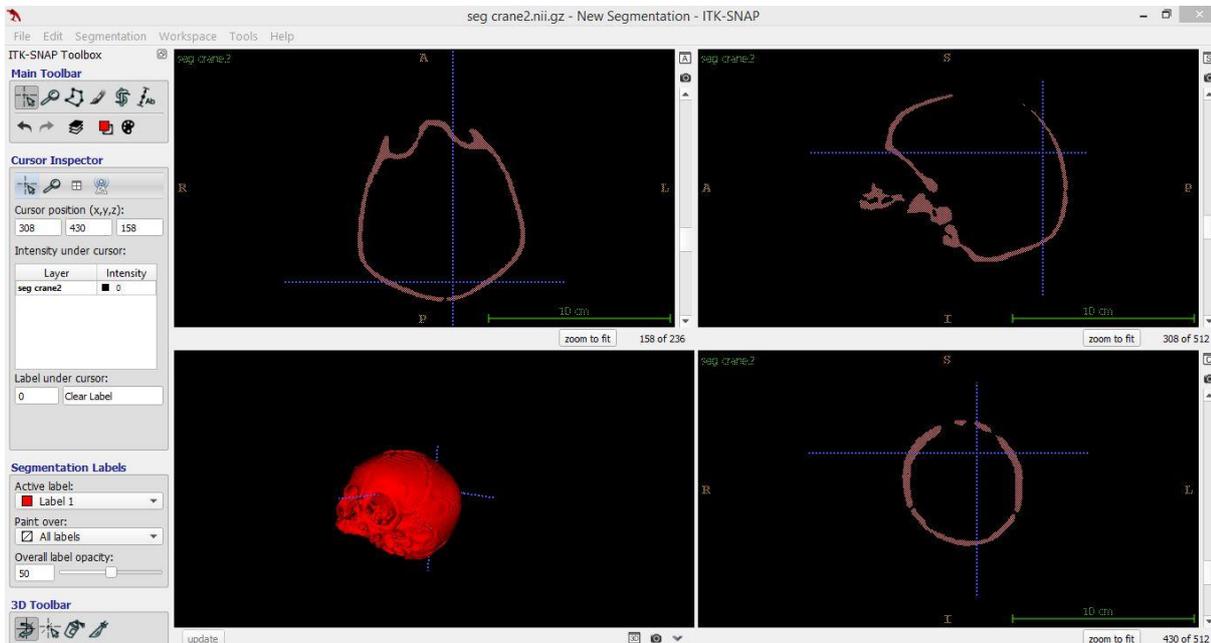


Figure 19 Crâne segmenté. (Source : S. Nguyen)

5.3.1.b.iv. Les finitions

La segmentation semi automatique entraine certains défauts comme des aberrations ou un manque d'harmonie. Certaines zones seront affinées en sélectionnant une partie d'intérêt plus précise et en segmentant à nouveau jusqu'à disparition des imprécisions ou en utilisant la méthode de la segmentation manuelle. (Figures 20-21-22)

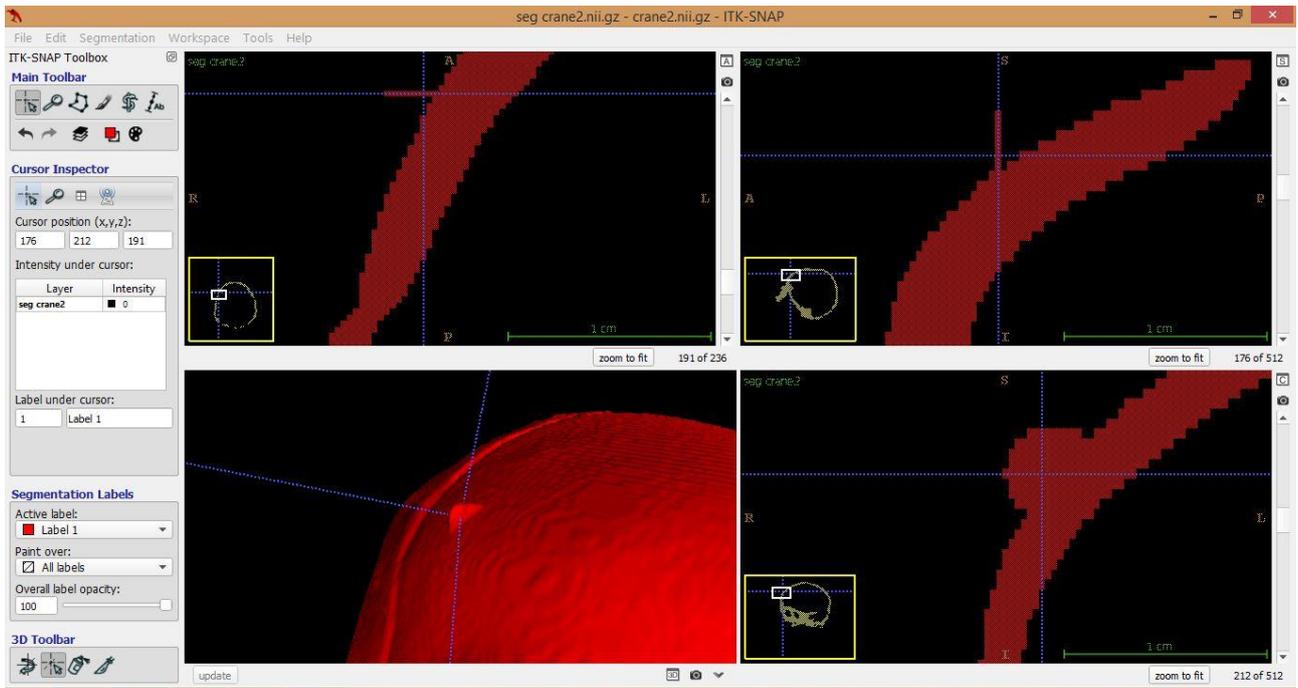


Figure 20 Défaut du à la segmentation semi-automatique. (Source : S. Nguyen)

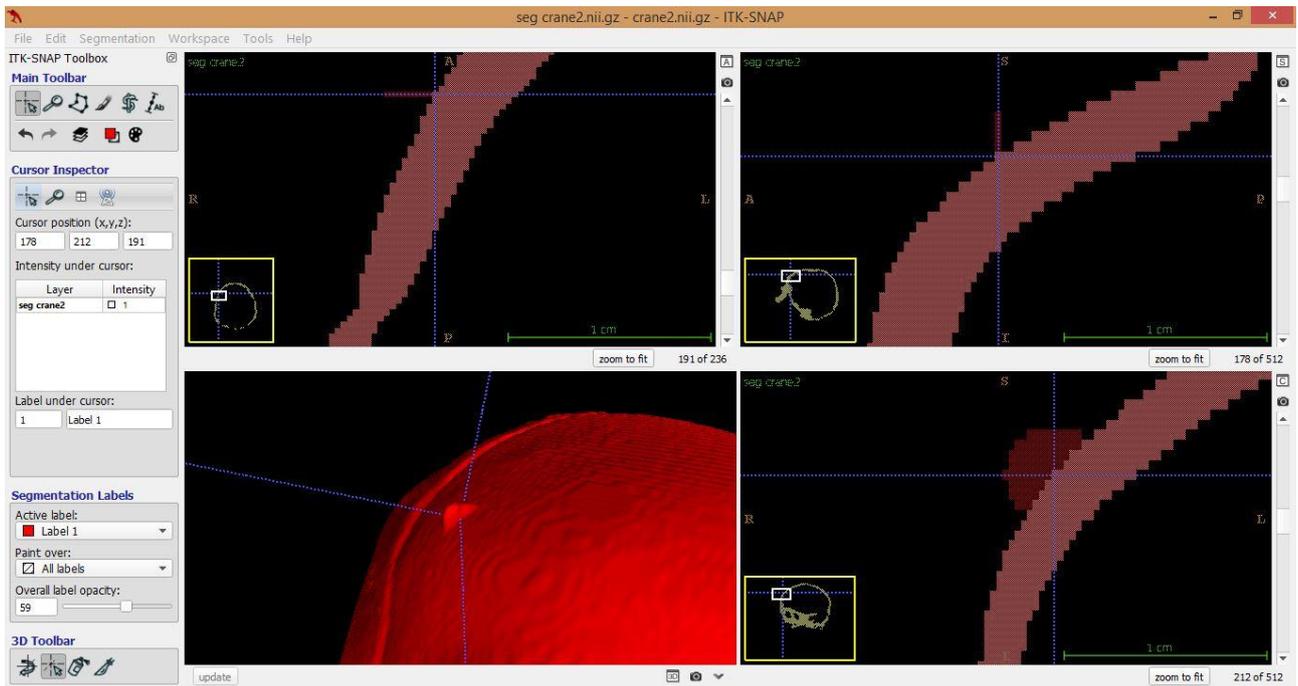


Figure 21 Diminution de l'opacité pour mettre en évidence le surplus. (Source : S. Nguyen)

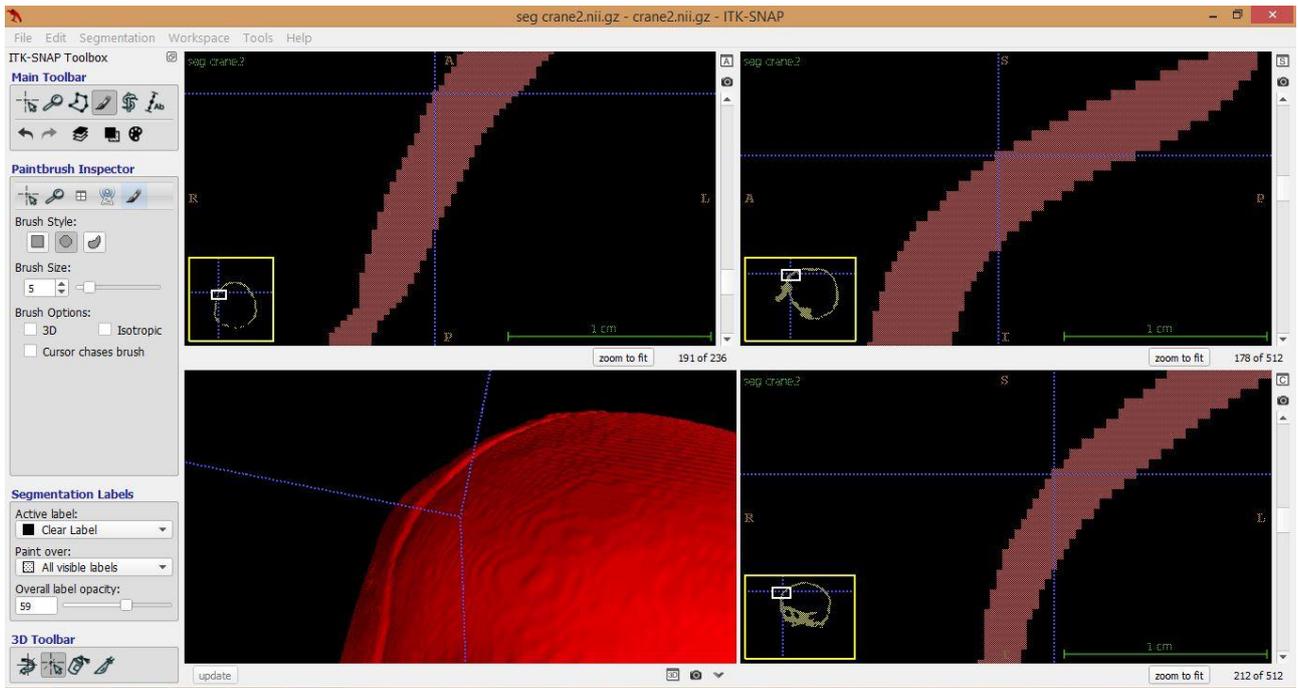


Figure 22 Suppression du surplus en prenant soin de ne pas toucher à la zone d'intérêt. (Source : S. Nguyen)

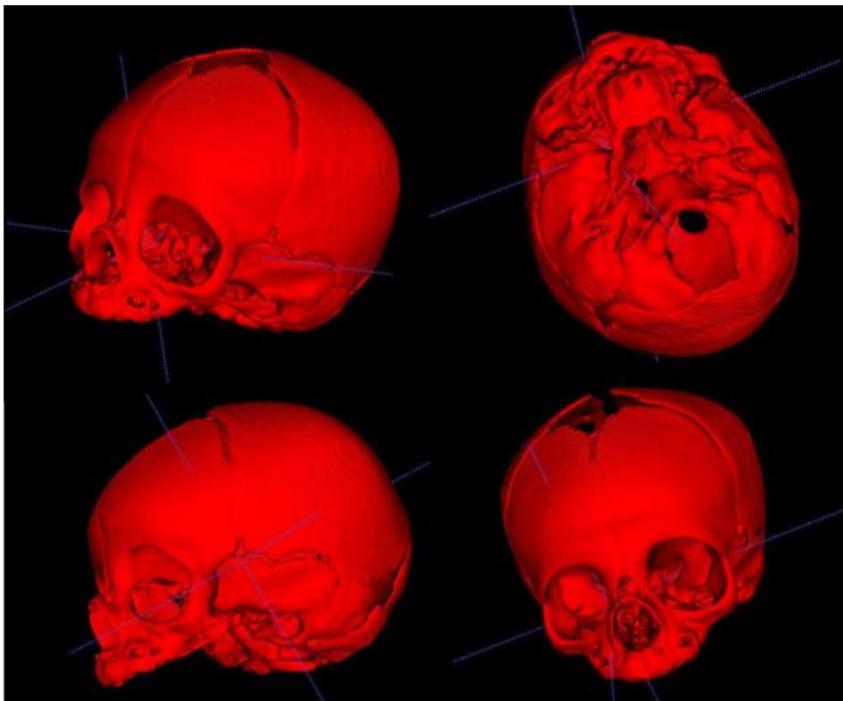


Figure 23 Résultat final. (Source : S. Nguyen)

5.3.1.c. Difficultés rencontrées et propositions d'amélioration

L'absence d'ossification complète à certains endroits du crâne immature rend la segmentation plus difficile à différents emplacements. Une précaution particulière et un contraste optimal (assez élevé pour pouvoir différencier les os des autres structures mais pas à outrance afin de ne pas avoir de manque) doivent être mis en œuvre lors de la segmentation. Enfin, l'étape de segmentation est subjective et peut entraîner une estimation incorrecte des contours osseux. Au fur et à mesure de l'avancée de l'étude, nous nous sommes rendus compte de l'importance de cette étape. L'amélioration surfacique qui représente l'étape suivante dans la création d'un modèle éléments finis ne peut palier à tous les défauts de la segmentation. Dans l'optique de permettre la segmentation la plus adéquate possible, nous avons résumé l'ensemble des difficultés rencontrées et les critères à prendre en compte pour les dépasser. (Tableau 3)

Étape	Difficultés et erreurs rencontrées	Propositions d'amélioration
Segmentation Logiciel ITK-snap	Épaisseur du modèle trop faible dans certaines zones	→ Diminution de la limite de seuil de contraste afin de pouvoir mettre en évidence l'intégralité de l'os même peu calcifié
	Discontinuité dans le modèle	→ Contrôle des jonctions entre les différentes structures anatomiques
	Présence de vide	→ Contrôle minutieux de la segmentation plan par plan → Modification du contraste des images

Tableau 3 Résumé des difficultés rencontrées au cours de la segmentation et propositions d'amélioration.

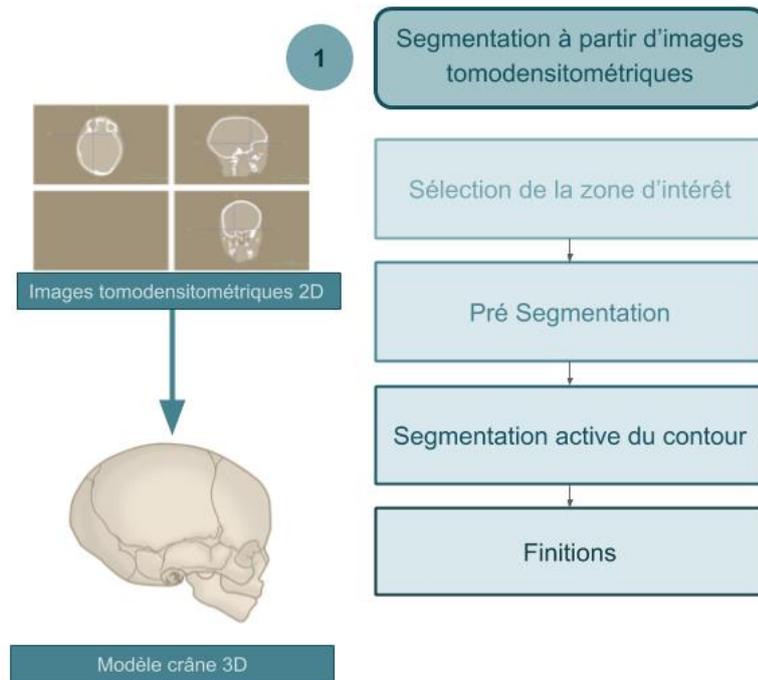


Figure 24 Résumé de la phase de segmentation.

5.3.2. Amélioration du fichier surfacique, correction des erreurs

5.3.2.a. Présentation Meshlab

Pour cette deuxième étape, nous avons utilisé le logiciel Meshlab. Ce logiciel gratuit est un outil de modélisation géométrique surtout utilisé dans les domaines de l'informatique, de l'archéologie, de la biologie et l'anthropologie.

Il permet la manipulation et l'édition de modèles tridimensionnels sous forme de maillage.

Après importation du fichier stl de la segmentation, (Figure 25) le modèle ne peut pas être utilisé tel quel pour une analyse mécanique. Le maillage des os va être optimisé afin d'être exploitable par le logiciel de calcul en éléments finis.

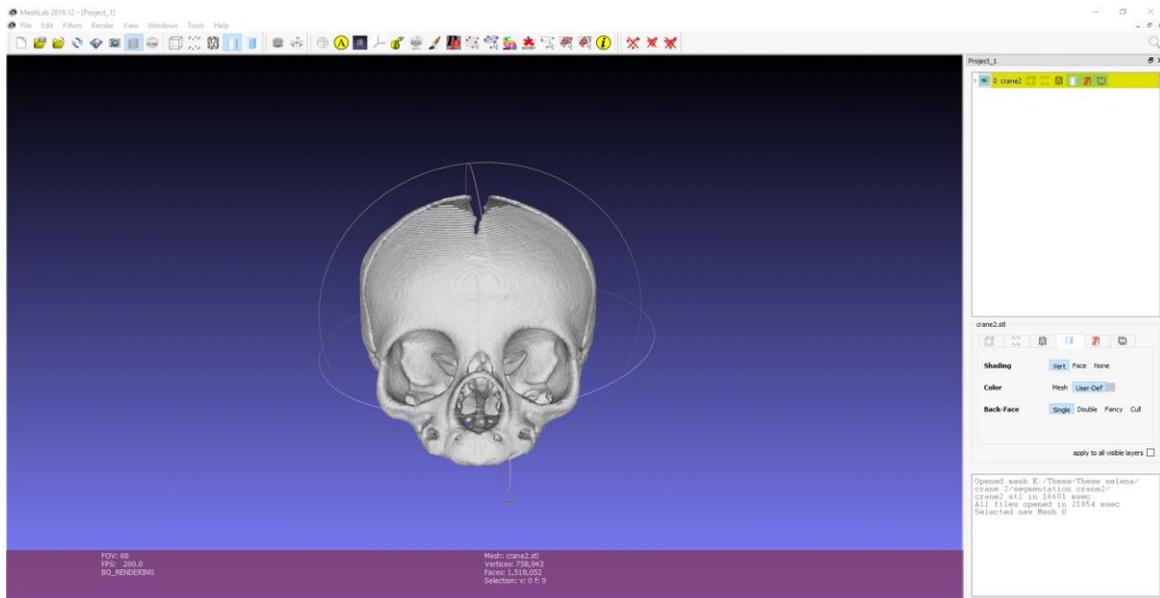


Figure 25 Importation du modèle segmenté. (Source : S. Nguyen)

5.3.2.b. Les différentes étapes de l'amélioration surfacique

5.3.2.b.i. Décimation

Afin de pouvoir être pris en charge par un logiciel d'analyse mécanique, le premier objectif va être de réduire la taille par simplification du maillage sans pour autant détérioration de la forme du modèle. Pour cela, il faudra aller dans « Filters » -> « Remeshing, Simplification and Reconstruction » -> « Quadric edge collapse decimation ». Durant cette étape, l'option de préservation de la typologie sera activée. Il est possible de choisir le nombre de faces que l'on souhaite obtenir à la fin ou bien de déterminer un pourcentage de réduction. La proportion de réduction va dépendre du volume ainsi que de la taille de l'os. Elle est inspectée visuellement par l'utilisateur jusqu'à ce que le maillage obtenu soit convenable et sans perte significative d'informations. Il est important de ne pas réduire à outrance la taille du modèle afin de ne pas compromettre la forme du crâne et être le plus précis possible.

Avant décimation, le modèle comportait 1 518 052 faces. Le fichier pesait 297 594 Ko. (Figure 26)

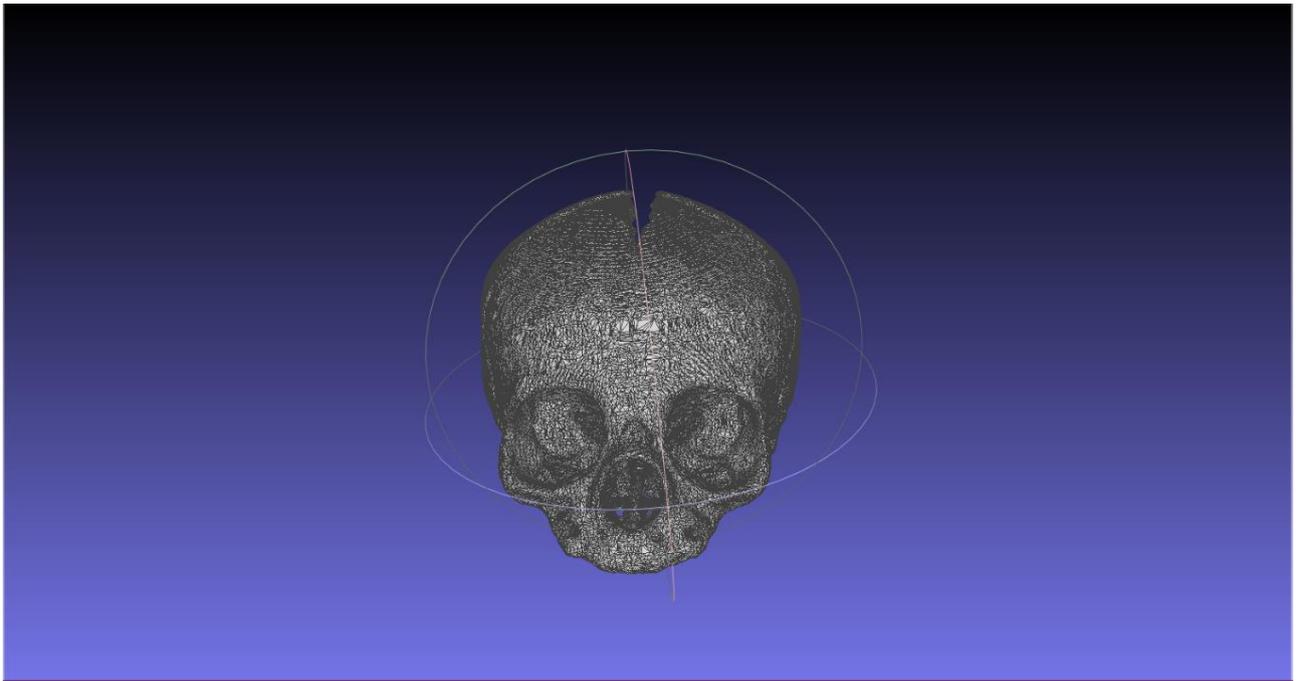


Figure 26 Modèle avant décimation. (Source : S. Nguyen)

Après décimation, le modèle comportait 4 441 faces et le fichier pesait 292 Ko. (Figure 27)

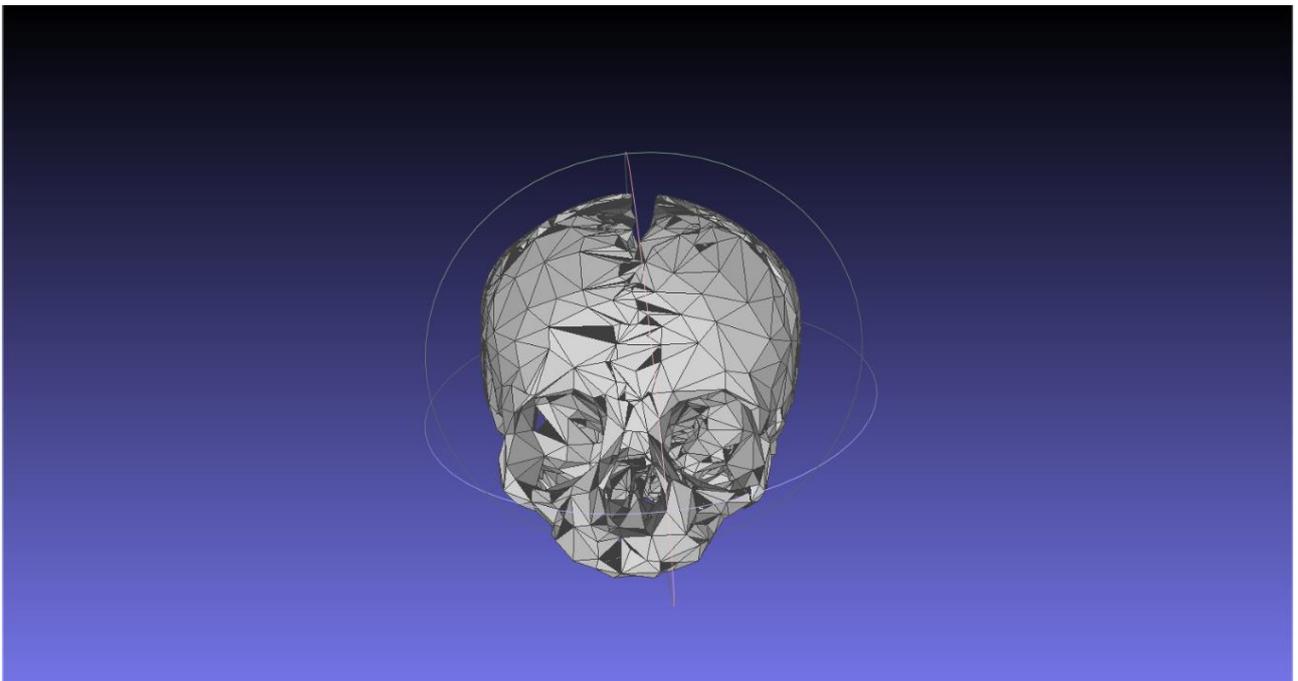
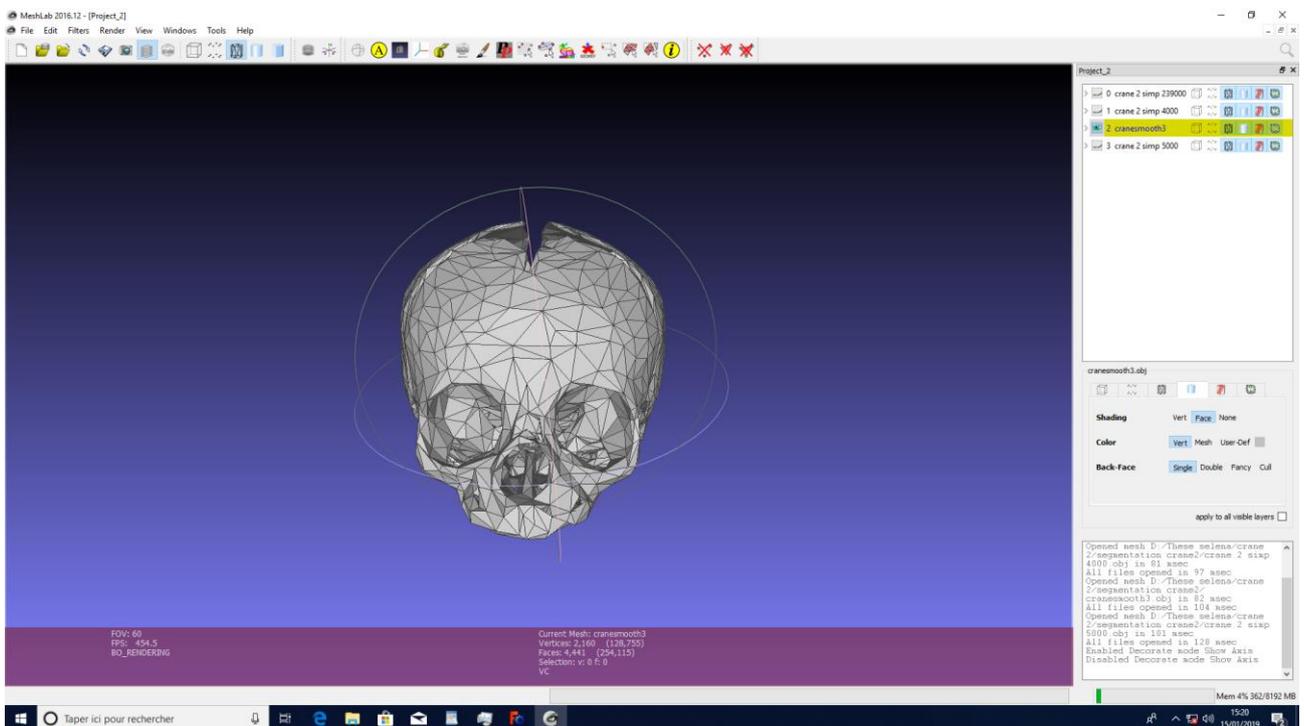


Figure 27 Modèle après décimation. (Source : S. Nguyen)

5.3.2.b.ii. Adoucissement du maillage

Après cette étape de décimation/ réduction proportionnelle, le traitement de surface de l'os va être entrepris. En effet, il est important que la segmentation ne soit pas trop anguleuse et il est nécessaire de supprimer toutes les zones non précises et empêchant l'analyse mécanique. L'option d'adoucissement des angles est utilisée en utilisant l'option « Filters » -> « Smoothing, Fairing and Deformation » -> « Smooth normal faces ». D'autres filtres peuvent également être utilisés selon la régularité du modèle comme la réorientation des faces ainsi que la suppression des faces non soutenues.



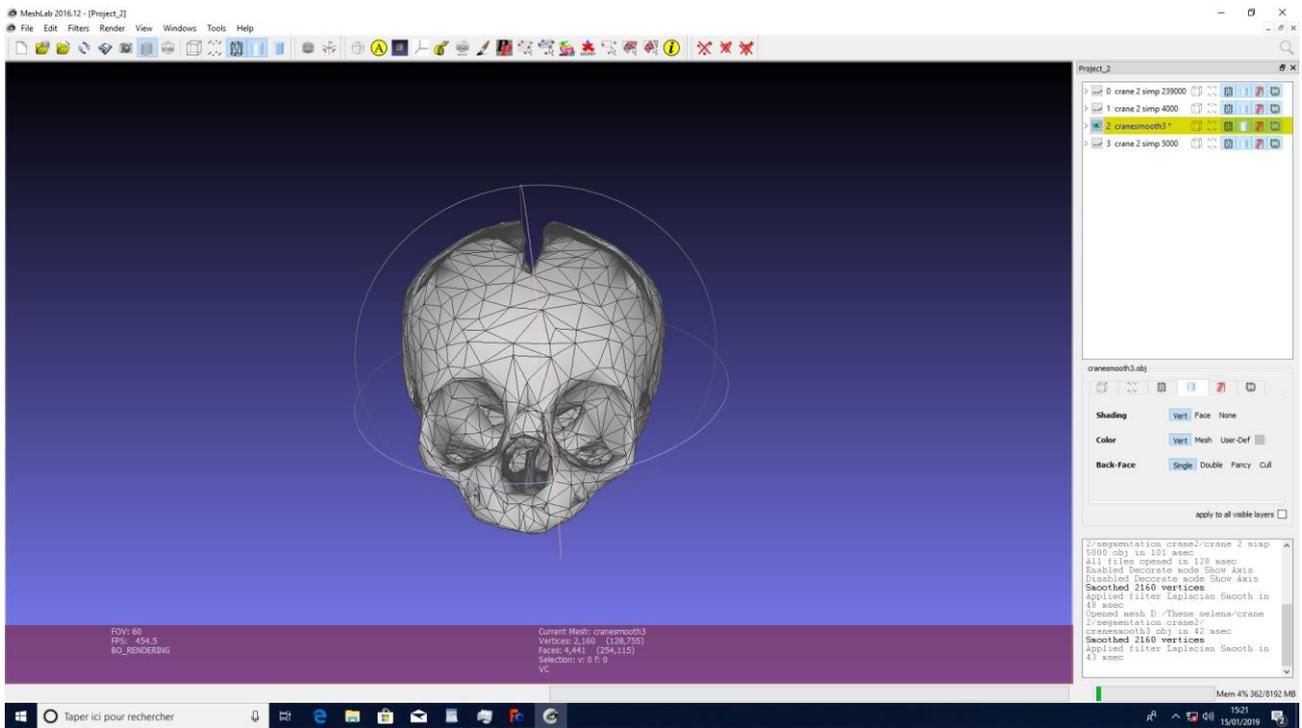


Figure 28 Modèle après amélioration surfacique. (Source : S. Nguyen)

5.3.2.c. Difficultés rencontrées et propositions d'améliorations

L'objectif de l'amélioration surfacique est de rendre le modèle le plus régulier possible. Une attention particulière sera apportée sur la vérification de l'épaisseur de la structure osseuse, suppression des défauts et les artefacts et correction les manques si besoin. (Figure 29) En effet, les résultats des simulations des contraintes appliquées des premiers modèles créés n'ont pas abouti en raison de la complexité des éléments, de forme, et de volume de la structure.

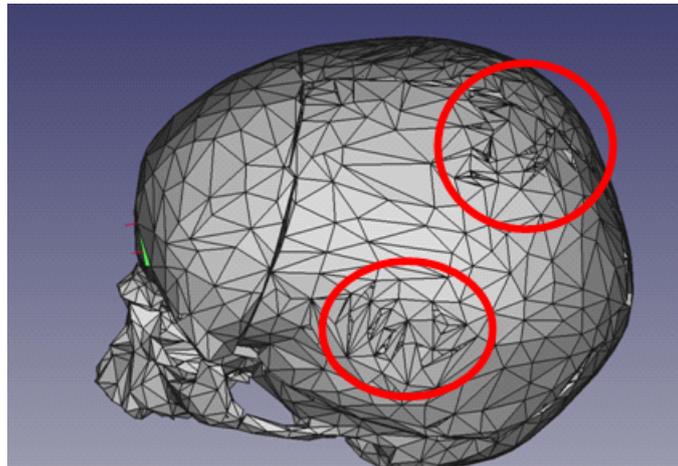


Figure 29 Présence de défauts de régularité au niveau du maillage empêchant la simulation des forces. (Source : S. Nguyen)

Les simplifications répétitives du nombre d'éléments peuvent rendre l'ensemble moins précis et avec certaines parties vides (par exemple au sein même d'une structure osseuse moins épaisse) ainsi que des faces non organisées. Ces défauts empêchant l'analyse mécanique de la structure, une restructuration du maillage (ou retopologie) sera entreprise afin de remailler les faces vides jusqu'à obtenir un modèle dont les surfaces sont régulières et sans vide. (Figure 30)

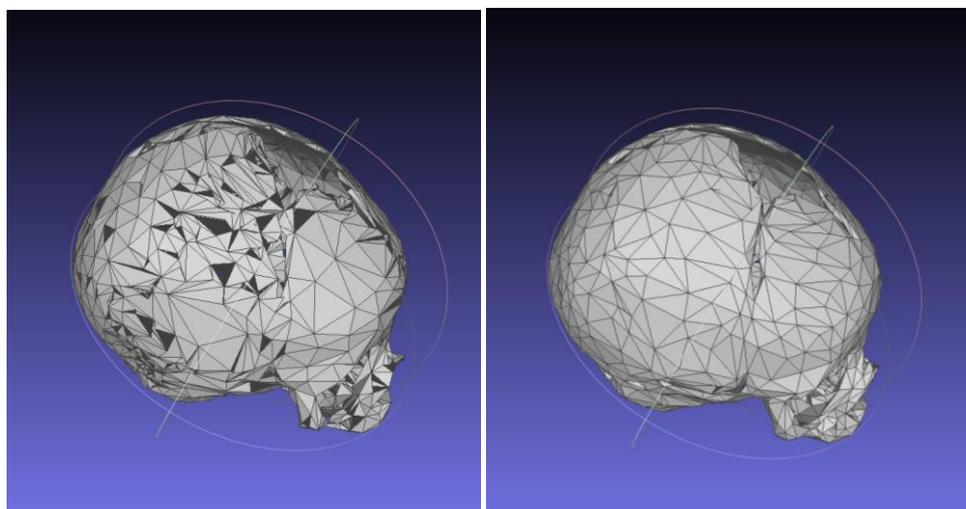


Figure 30 Exemple de modèles avant et après retopologie. (Source : S. Nguyen)

De nombreux modèles expérimentaux ont été créés avant d’aboutir à un modèle pris en charge par le logiciel d’analyse mécanique. L’ensemble des difficultés rencontrées et propositions d’amélioration sont répertoriées dans le Tableau 4 :

Étape	Difficultés et erreurs rencontrées	Proposition d’amélioration
Amélioration surfacique Logiciel Meshlab	Présence de vide	→ Retopologie
	Maillage non ordonné et irrégularité des surfaces	→ Filtre « Réorientation des normales » → Filtre « Décimation » qui permet d’adoucir le maillage → Filtre « Adoucissement des faces » → Retopologie
	Fichier trop volumineux	→ Filtre « Décimation du modèle » au maximum sans dénaturer la forme du modèle
	Présence de faces non soutenues	→ Filtre « Supprimer les éléments non soutenus »

Tableau 4 Résumé des difficultés rencontrées durant l’étape d’amélioration surfacique et propositions de solutions.

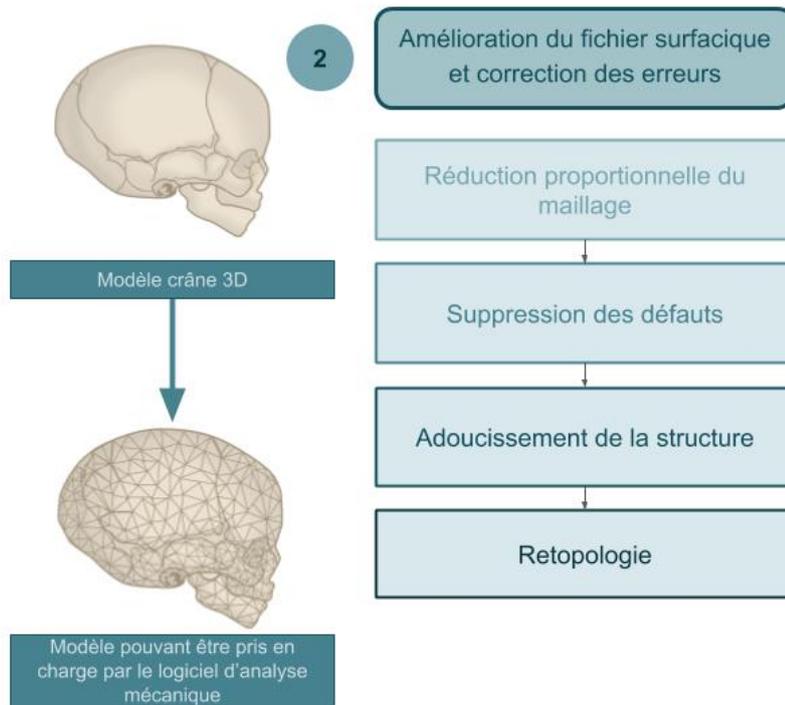


Figure 31 Résumé amélioration du fichier surfacique et correction des erreurs.

5.3.3. Analyse par éléments finis et simulation de forces

Après avoir procédé à cette amélioration surfacique, nous allons pouvoir commencer l'analyse mécanique grâce au logiciel FreeCad.

5.3.3.a. Présentation FreeCAD

Définition

FreeCAD se présente comme un logiciel gratuit et open-source c'est-à-dire accessible au grand public, le but étant de rendre cette méthodologie abordable à un nombre de personnes le plus important possible.

Il s'agit d'un logiciel de modélisation 3D d'application générale. Il permet en premier lieu la conception de produits, mais vise également d'autres disciplines, telles que le génie mécanique, l'architecture ou d'autres champs d'activité d'ingénierie. Il n'a pour l'instant pas été l'objet d'étude au niveau de la médecine.

Dans notre cas, nous nous intéressons à sa capacité à créer une analyse en éléments finis, c'est-à-dire calculer les propagations des forces à l'intérieur d'un objet 3D, en analysant l'impact de chaque élément sur ses voisins. L'objectif est de simuler des déformations lorsque le crâne est soumis à des contraintes. L'ensemble de cette étape a eu lieu à l'Université d'odontologie de Bordeaux au sein de la cellule imagerie.

Description

La fenêtre principale du logiciel est divisée en plusieurs parties : la barre d'ateliers est un menu déroulant permettant à l'utilisateur de se concentrer uniquement sur les outils nécessaires à un projet précis. Tous ces outils sont triés et disposés en haut de la fenêtre en fonction de l'atelier choisi (image, part design, mesh, FEM ..).

En haut à gauche, nous retrouvons l'arbre de construction qui contient toutes les actions réalisées dans l'ordre chronologique du projet en cours. La fenêtre du dessous représente l'ensemble des propriétés du modèle. (Figure 32)

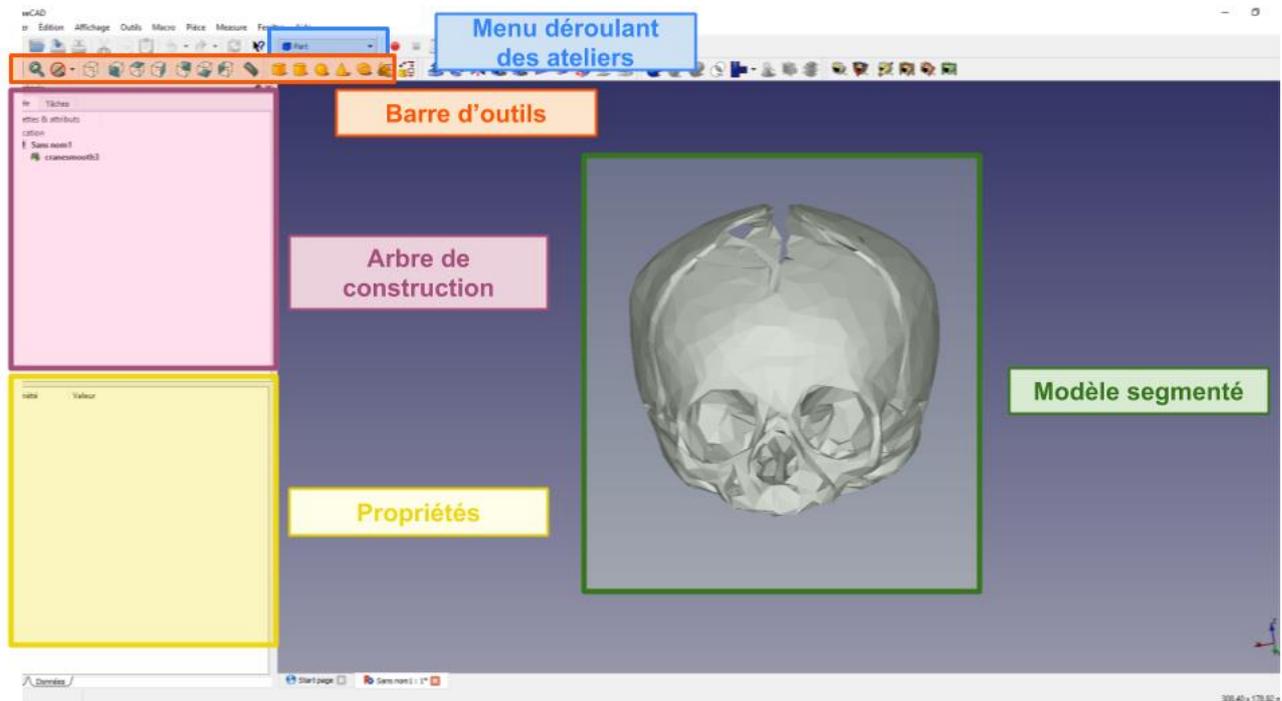


Figure 32 Présentation FreeCAD. (Source : S. Nguyen)

5.3.3.b. Les différentes étapes de l'analyse mécanique

5.3.3.b.i. Prétraitement de l'image

Dans le cas de l'analyse mécanique souhaitée, après avoir importé le modèle du crâne modifié en format stl, la première étape consiste à utiliser l'atelier Part afin de créer la forme du crâne à partir du maillage existant. (Figure 33) Sans cette action, le modèle n'est pas pris en compte pour l'analyse. Le modèle segmenté comprend 4441 faces, 6734 arêtes, 2160 nœuds. Ses dimensions sont de 206.73x119.93 mm.

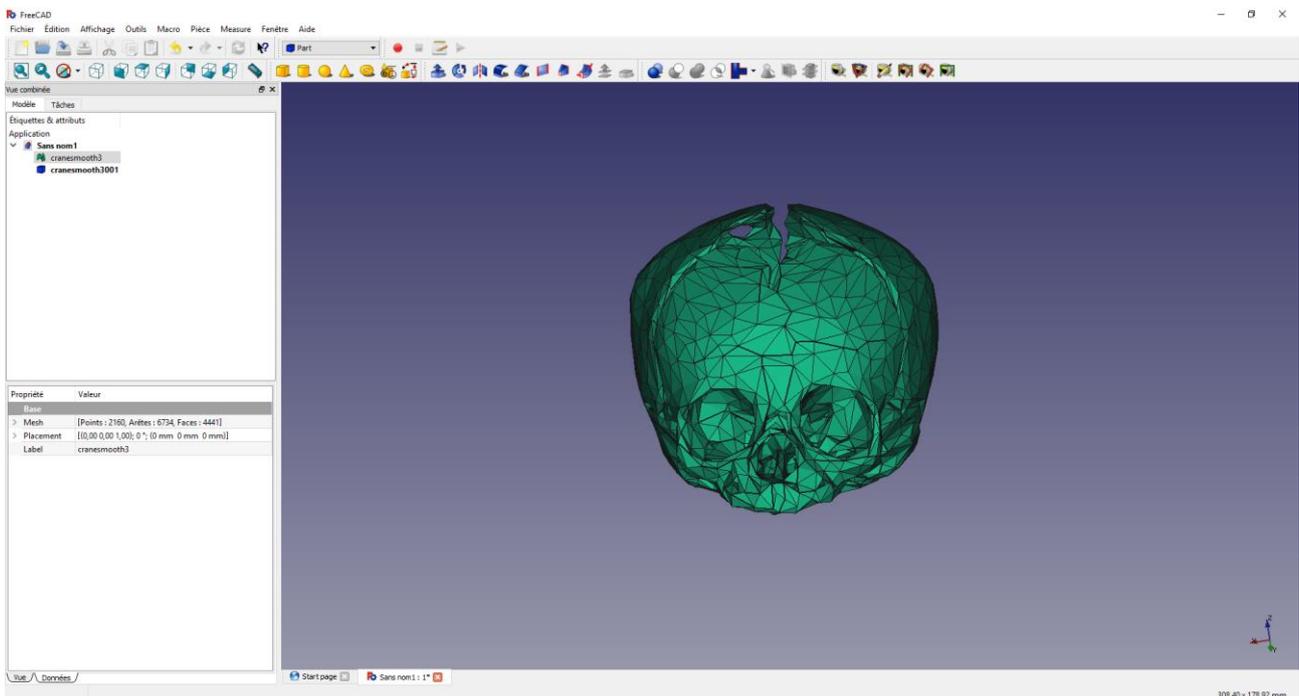
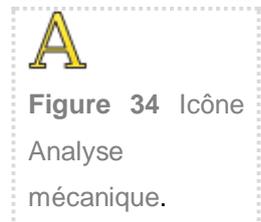


Figure 33 Maillage du modèle. (Source : S. Nguyen)

5.3.3.b.ii. Lancement de l'analyse mécanique

Le modèle est alors prêt à être analysé en modèle éléments finis. Une fois dans l'atelier « FEM » (Modèle éléments finis), l'utilisateur lance l'analyse mécanique en cliquant sur l'option Analyse mécanique. (Figure 34)



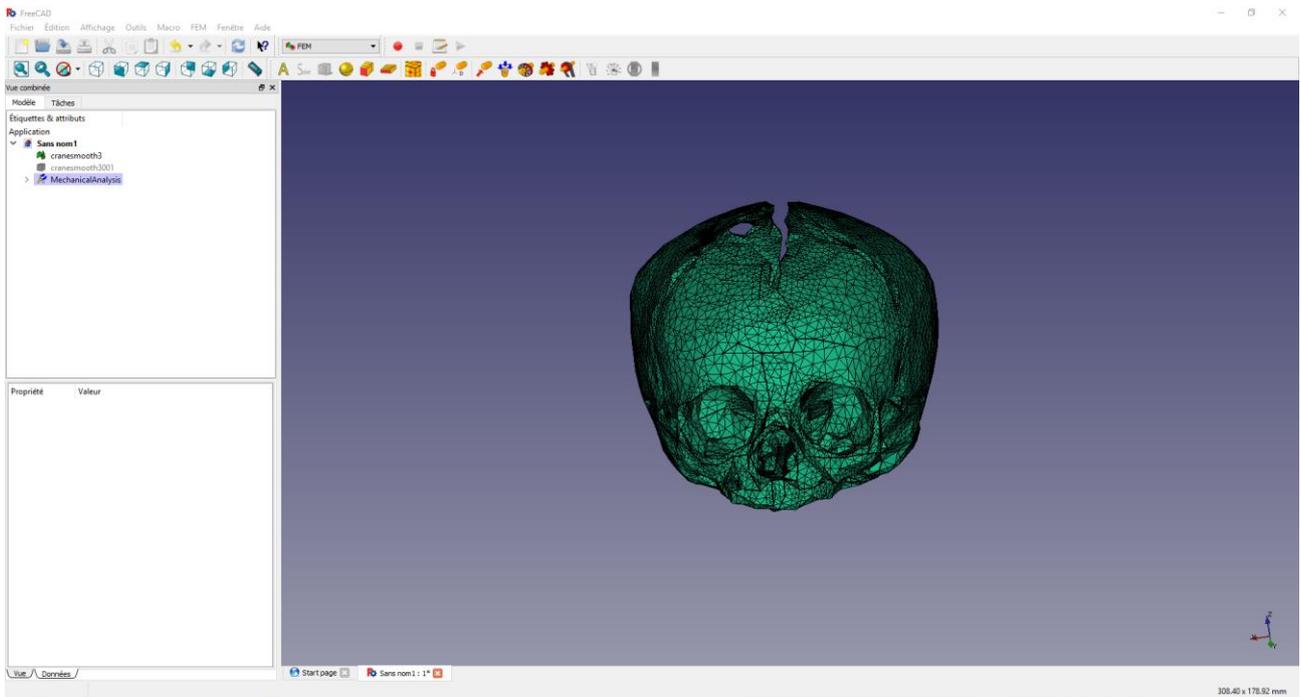


Figure 35 Lancement de l'analyse mécanique. (Source : S. Nguyen)

5.3.3.b.iii. *Intégration des propriétés mécaniques (caractéristiques mécaniques, densité...)*

Les propriétés mécaniques du crâne doivent être spécifiées afin de reproduire le plus fidèlement possible les conditions d'expérimentation et d'appliquer différents types de forces. Nous avons utilisé les propriétés mécaniques du crâne décrites dans la littérature et résumées dans le Tableau 5.

Propriété	Valeur	Source
Module de Young	2,8GPa	Irwin et Mertz (1997)(45)
Coefficient de Poisson	0,28	Margulies et Thibault (2000) (44) Coats et al. (2006)(46)
Densité	2150 kg/m ³	Margulies et Thibault (2000) (44) Coats et al.(2006)(46)

Tableau 5 Tableau des différentes propriétés mécaniques utilisées.

L'ensemble de la structure a ensuite été définie comme une coque de 2 mm comme nous l'indiquent les données de la littérature (9) après avoir cliqué sur l'icône d'épaisseur de coque.



Figure

36 Icône épaisseur de coque

5.3.3.b.iv. Mise en place des forces

Il faudra au préalable avoir établi une contrainte fixe du modèle, c'est-à-dire la partie du modèle qui ne bougera pas puis appliquer une contrainte de force à la valeur de charge, direction et endroit désirés. (Figure 38)



Figure 37 Icones contraintes de forces.

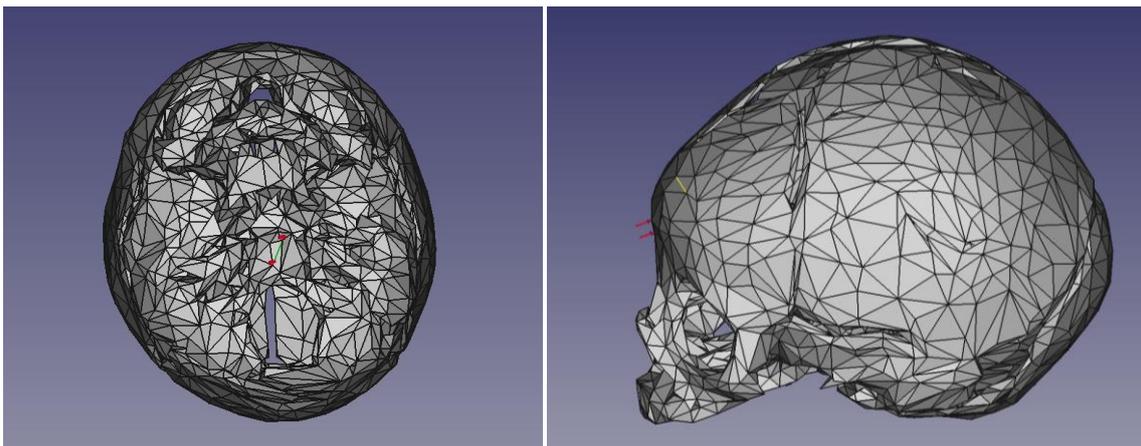


Figure 38 Application de forces au niveau du frontal sur un crâne maillé. (Source : S. Nguyen)

5.4. Résultats

A partir de cette étape, l'arbre de construction est complet, le modèle est alors prêt à être analysé et les résultats peuvent être affichés. (Figure 39) L'analyse mécanique par éléments finis de la résistance du crâne va consister à calculer les contraintes et déformations que va subir ce crâne dans le but de les dimensionner.

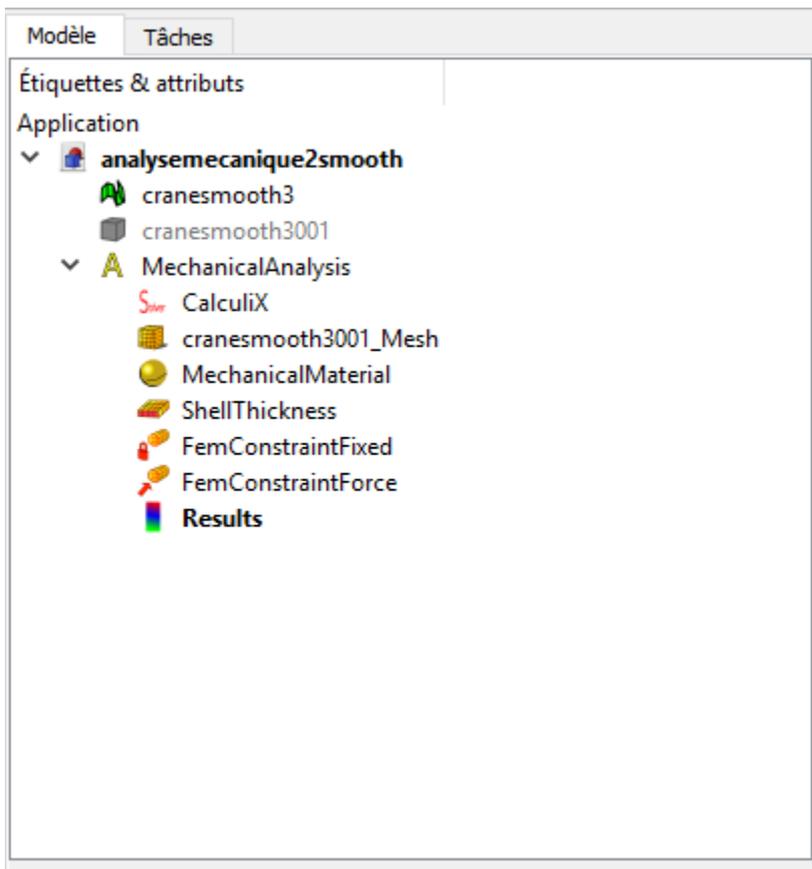
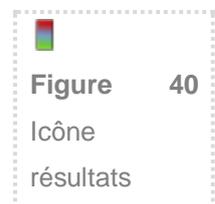


Figure 39 Arbre de construction terminé avec les résultats accessibles. (Source : S. Nguyen)

Les résultats sont obtenus grâce au logiciel informatique Calculix. Il s'agit d'un outil de calcul ou solveur qui analyse les contraintes et les déformations d'un biomatériau soumis à différentes sollicitations mécaniques. Les résultats peuvent être obtenus en cliquant sur l'icône prévu à cet effet. (Figure 40)



Il peut s'agir d'une étape plus ou moins longue selon le nombre d'éléments issus du modèle. En effet, plus la discrétisation sera fine (nombre d'éléments dans le maillage important), plus les résultats seront précis mais le temps de calcul sera alors augmenté.

Les résultats sont alors représentés en terme de déplacement selon X, Y, Z ou encore déplacement absolu. Les contraintes de Von Mises (représentant l'ensemble des contraintes additionnées afin d'obtenir une valeur finale) peuvent également être

observées. Pour chaque résultat, la valeur minimale, moyenne et maximale sont présentées.

La répartition des contraintes est mise en évidence par des couleurs, rouge pour le point d'impact maximal et tend au vert lorsque les contraintes diminuent. Des premières simulations ont été réalisées avec différentes forces appliquées au niveau du frontal. (Figure 41)

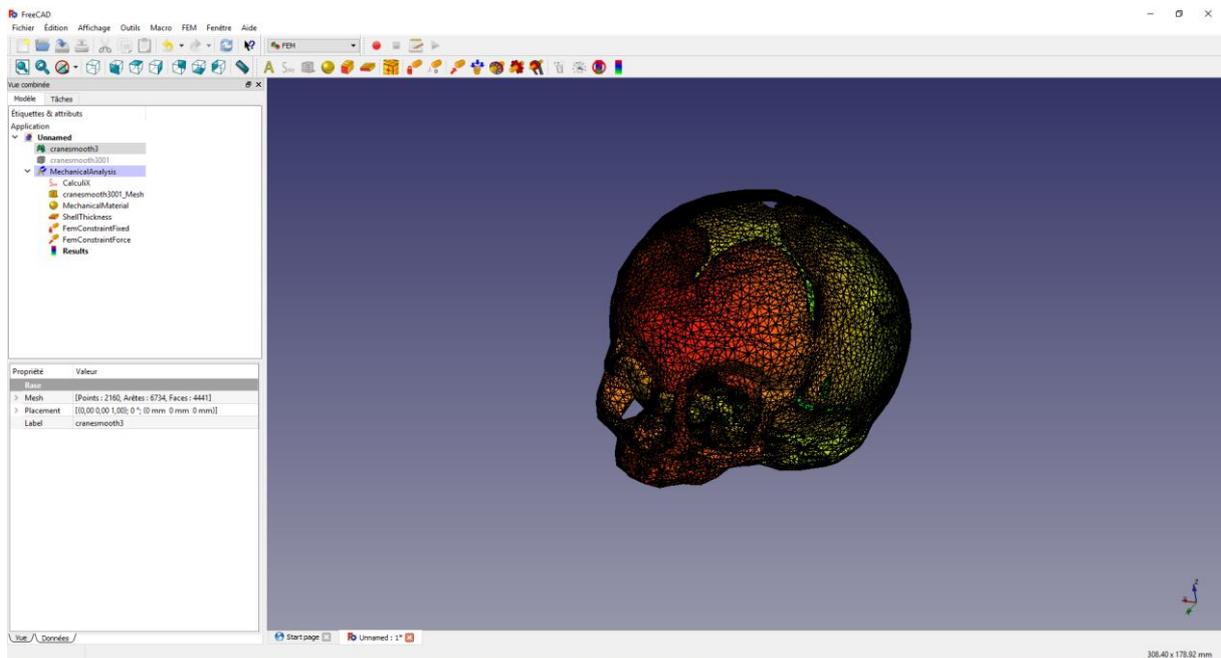


Figure 41 Résultats d'analyse suite à une sollicitation de force sur le crâne d'un enfant. (Source : S. Nguyen)

Les différentes étapes de cette dernière phase ont été résumées dans la figure suivante :

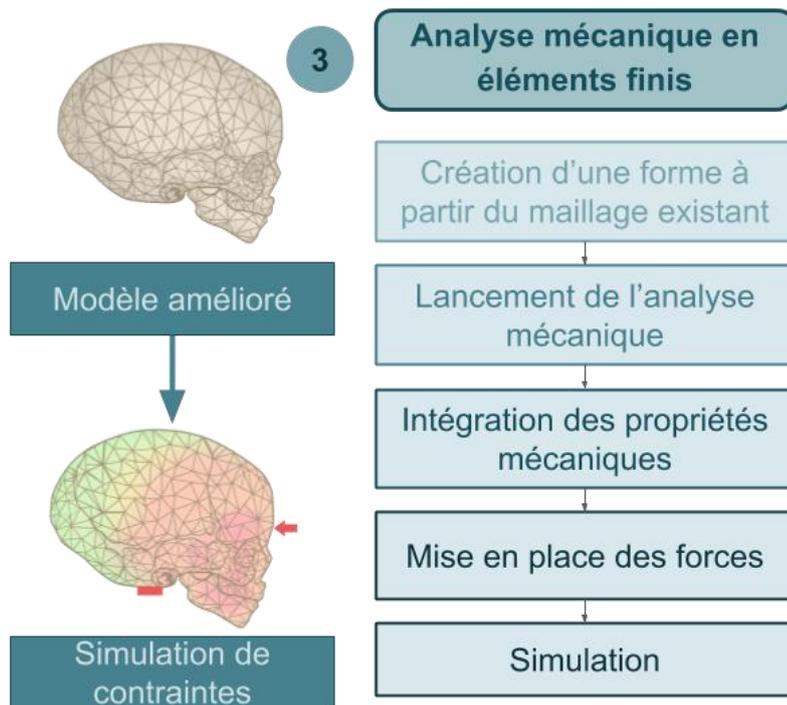


Figure 42 Résumé analyse mécanique en éléments finis.

6. DISCUSSION/ PERSPECTIVES POUR LES PROCHAINS TRAVAUX

Notre étude porte sur la mise en place d'une méthodologie pour la création d'un modèle en éléments finis d'un crâne d'enfant afin d'établir une analyse mécanique permettant de comprendre les traumatismes dus à la maltraitance chez l'enfant. Le but était de rendre cette méthodologie accessible au plus grand nombre de personnes en détaillant chaque étape. Comme pour chaque étude, il existe certains biais :

6.1. Au niveau du logiciel open-source

Au niveau de la simulation des forces, le logiciel FreeCAD en libre service est un logiciel spécialisé dans la modélisation 3D mais beaucoup moins dans l'analyse mécanique. Cette

option est en cours de développement et seules des analyses simples peuvent être entreprises. A ce jour, le logiciel n'accepte pas les fichiers trop volumineux ou une analyse mécanique plus complexe amenant l'utilisateur à travailler à simplifier au maximum le modèle. Afin d'avoir une analyse plus poussée, d'autres logiciels plus performants prenant en charge des forces dynamiques dans différentes conditions seront sûrement nécessaires.

6.2. Au niveau de l'utilisateur

Toute expérimentation dépendant d'un utilisateur entraîne une subjectivité. L'étape de segmentation, selon l'expérience de l'utilisateur peut aboutir à une estimation incorrecte des contours osseux.

Les 3 logiciels décrits ont été utilisés pour la première fois au cours de cette étude. Il s'agissait également de la première tentative de modélisation. Comme toute initiation, la courbe d'apprentissage est chronophage et une maîtrise approfondie de ces logiciels avec compréhension globale de leur champ d'application permettra une modélisation plus rapide, plus précise et de meilleure qualité. (72)

L'ensemble de ce travail de modélisation et de recherches de solutions suite aux difficultés rencontrées a duré plus de 6 mois en ce qui concerne la segmentation et 2 mois afin d'obtenir un modèle amélioré valable.

6.3. Au niveau du modèle

6.3.1. *Difficultés*

Une des difficultés au cours de cette étude expérimentale était de représenter les géométries complexes des structures anatomiques du crâne qui aurait nécessité parfois des logiciels plus spécialisés. (67,72)

Les différentes étapes de segmentation, remaillage, retopologie du modèle ont pu entraîner des modifications dans la géométrie du crâne. Après la segmentation,

persistaient des zones de vide à combler. Certains emplacements ont pu être arbitrairement épaissis alors que d'autres endroits sont devenus très fins, ces zones de remaillage ne représentent pas l'anatomie exacte du crâne.

Les propriétés mécaniques utilisées pour les crânes d'enfants ont été obtenus par la technique d'échelle et pas par des résultats expérimentaux, ils se sont basés sur des tests in vitro d'os pariétal de nouveaux-nés et d'enfants de 6 ans. (42,45) Compte tenu de la variation interindividuelle des propriétés mécano-humaines (par exemple, le module d'élasticité dépend de l'âge de gestation (42)), nous pouvons nous interroger sur la pertinence de tels facteurs d'échelle.

6.3.2. Améliorations à fournir

Afin de compléter notre modèle et le rendre plus précis et donc plus représentatif de la structure réelle de l'extrémité céphalique d'un enfant, plusieurs améliorations sont à mettre en place :

- Ajouter l'ensemble des tissus (cerveau, liquide céphalo-rachidien, dure-mère, peau...) de la tête et leurs propriétés mécaniques. La structure hétérogène de l'os (os compact et os spongieux) sera également à considérer.
- Prendre en compte les sutures et les fontanelles spécifiques aux enfants.
- Considérer la structure non uniforme du crâne avec une variation d'épaisseur et la présence des poutres, piliers et arcs de renforcement crâniens. (73)
- Par la suite prendre en compte les vertèbres cervicales qui jouent un rôle important dans le maintien de la tête.
- Tenir compte des propriétés hétérogènes et non linéaires de l'extrémité céphalique d'un enfant. (70)
- Améliorer la précision des modèles grâce à une expérience plus importante de la méthode par éléments finis et la maîtrise des logiciels dédiés à la modélisation et simulation de contraintes.

6.4. Perspectives pour les prochains travaux

L'objectif des prochains travaux sera de valider le modèle de manière biomécanique en comparant les résultats expérimentaux à la simulation numérique avec le modèle éléments finis créé. Pour cela, il est nécessaire de justifier que les modèles virtuels soient des représentations adéquates des systèmes qu'ils simulent. (74)

Une approche structurée de critères d'évaluation des modèles permettrait une meilleure comparaison des modèles entre les groupes de recherche et une meilleure garantie de qualité. (75) Nous pouvons imaginer que des normes établies en ce qui concerne la qualité du maillage (taille minimum, choix du nombre de nœuds par élément, distorsion de chaque élément) et la précision de la simulation pourrait fournir une aide importante au développement de modèles éléments finis compatibles de manière biomécanique au crâne d'un enfant. (74–77) Dans cette optique, Brooks et al. (67) ont résumé l'ensemble des données sur les matériaux utilisés pour la création d'un modèle éléments finis de la tête d'un enfant en vue d'une simulation à une force : géométrie, maillage, éléments, matériels et propriétés. Aucune des études relevée n'a proposé une justification selon leurs choix de type d'éléments (67) mais d'après l'étude de Pavarinho et al., la forme des faces et le nombre de nœuds dépend de la région et la forme de la région. Les faces rectangulaires seront plus adéquates pour des régions simples et les faces triangulaires pour les structures anatomiques plus complexes. Cependant, les formes des faces ne doivent pas être trop déformées lors du maillage. De plus, plus il y a de nœuds, meilleure sera la représentation des régions courbes. (72)

Une fois ce modèle validé, nous pourrions étudier différentes configurations d'impact avec des sollicitations statiques et dynamiques, et comparer la simulation virtuelle à un scénario réel de maltraitance avérée. Des situations typiques comme le syndrome du bébé secoué pourront également être étudiées. Ce syndrome se caractérise par des épisodes de secouement violent entraînant hématome sous-dural aigu, hémorragies rétinienne et fractures métaphysaires ou costales. (32)

Il faudra tout de même garder à l'esprit que la modélisation par éléments finis reste une méthode approximative et nécessite de connaître l'intégralité des caractéristiques biomécaniques des structures composant le modèle, les résultats dépendant de ces

valeurs de données recueillies. Malheureusement suite à un épisode maltraitance, rares sont les cas où le recueil de données (nature de l'agent vulnérant, vitesse, point d'impact) est suffisant. Des informations approximatives ou erronées n'empêcheront pas la réalisation d'une simulation de contraintes mais les résultats seront forcément inexacts. (32)

7. CONCLUSION

Les intérêts des modèles éléments finis sont nombreux, et la méthode par élément finis représente une réelle aide complémentaire dans le diagnostic et la compréhension des blessures consécutives à une maltraitance. En effet, cette méthode permet la création de modèles virtuels uniques et a l'avantage d'être plus rapide et moins coûteuse que la méthode expérimentale. La possibilité de modifier de nombreux paramètres notamment au niveau des propriétés mécaniques et des forces appliquées ouvrent un champ de possibilités infini dans le domaine de recherche.

Au vu de l'utilisation de plus en plus importante de cette méthode, (78) nous avons voulu créer, à l'aide de logiciels dédiés à la modélisation tridimensionnelle ainsi que l'analyse mécanique de contraintes, un modèle éléments finis d'un crâne d'un enfant compatible avec une analyse mécanique par éléments finis. Les 3 logiciels utilisés ont l'avantage d'être gratuits et accessibles à tous et ne cessent d'être retravaillés afin de devenir plus performants. Ils ont été utilisés pour la première fois au cours de cette étude et même si l'ensemble de leurs applications et leurs fonctionnalités n'ont pas encore été entièrement maîtrisées pour l'heure, la mise en place d'un modèle éléments finis d'un crâne d'enfant a pu aboutir et une méthodologie détaillant chacune des étapes a été proposée. Des études complémentaires doivent être entreprises afin de pouvoir simuler des scénarios et les comparer aux données cliniques d'enfants présentant des lésions suite à des actes de maltraitance avérés, cette méthode restant une approche simplifiée de la réalité ne permettant pas de s'affranchir des connaissances cliniques et techniques du praticien ou des essais mécaniques traditionnels.

8. OUVERTURE, EXTRAPOLATION DE LA METHODE

Tout au long de ce travail, une méthodologie de conception d'un modèle éléments finis d'un crâne d'enfant a été mise en place. Cette méthode de plus en plus courante peut être extrapolée à d'autres domaines de recherches notamment en médecine où la méthode par éléments finis est très utilisée en particulier en chirurgie orthopédique, traumatologie et chirurgie cardiovasculaire. Cette méthode est également répandue dans le secteur de la médecine légale, afin de recueillir davantage d'informations en complément des constatations faites sur les lieux de survenue d'un traumatisme. (32)

Dans le domaine d'odontologie, cette méthode est également de plus en plus répandue et peut être utile :

- Pour l'enseignement de l'anatomie tête et cou, la modélisation par éléments finis représente un outil interactif simple et pédagogique. (79)
- En chirurgie maxillo-faciale (80–82) : au niveau de l'implantologie, les modèles éléments finis permettent de réaliser une simulation préimplantaire personnalisée en vue d'optimiser le positionnement d'un implant dentaire avant sa mise en charge.
- En orthopédie dento-faciale (ODF) (83,84) : la simulation du mouvement dentaire permet à l'orthodontiste de comprendre les effets de sa mécanique et de prévisualiser son traitement.
- En arthroplastie, pathologie de l'articulation temporomandibulaire : (85,86) cette méthode est utilisée afin de mieux comprendre les phénomènes de luxation ou de dégénération de l'articulation temporo-mandibulaire dans le cas de bruxisme par exemple.

9. BIBLIOGRAPHIE

1. Tursz A. La maltraitance cachée : pour une meilleure connaissance épidémiologique. Archives de Pédiatrie. juin 2009;16(6):936-9.
2. Li X, Sandler H, Kleiven S. Infant skull fractures: Accident or abuse?: Evidences from biomechanical analysis using finite element head models. Forensic Sci Int. 17 nov 2018;294:173-82.
3. Weber W. Biomechanical fragility of skull fractures in infants. Zeitschrift für Rechtsmedizin. 1985;94(2):93-101.
4. Lapeer RJ, Prager RW. Fetal head moulding: finite element analysis of a fetal skull subjected to uterine pressures during the first stage of labour. J Biomech. sept 2001;34(9):1125-33.
5. Desantis Klinich K, Hulbert GM, Schneider LW. Estimating infant head injury criteria and impact response using crash reconstruction and finite element modeling. Stapp Car Crash J. nov 2002;46:165-94.
6. Coats B, Margulies SS, Ji S. Parametric study of head impact in the infant. Stapp Car Crash J. oct 2007;51:1-15.
7. Roth S, Raul J-S, Ludes B, Willinger R. Finite element analysis of impact and shaking inflicted to a child. International Journal of Legal Medicine. 13 avr 2007;121(3):223-8.
8. Li Z, Hu J, Reed MP, Rupp JD, Hoff CN, Zhang J, et al. Development, validation, and application of a parametric pediatric head finite element model for impact simulations. Ann Biomed Eng. déc 2011;39(12):2984-97.
9. Li Z, Park B-K, Liu W, Zhang J, Reed MP, Rupp JD, et al. A statistical skull geometry model for children 0-3 years old. PLoS ONE. 2015;10(5):e0127322.
10. Raul JS. Applications des modèles éléments finis de la tête en médecine légale. Th.D Sciences de la vie et de la santé : Option : Physique - Mécanique. Université Louis Pasteur Strasbourg; 2007. 123 p.

11. Haute Autorité de santé. Maltraitance chez l'enfant : repérage et conduite à tenir. Octobre 2014, mise à jour Juillet 2017 [Internet]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2014-11/fiche_memo_maltraitance_enfant.pdf
12. Organisation Mondiale de la Santé. Rapport mondial sur la violence et la santé [Internet]. 2002. Disponible sur: https://www.who.int/violence_injury_prevention/violence/world_report/en/full_fr.pdf
13. Gilbert R, Widom CS, Browne K, Fergusson D, Webb E, Janson S. Burden and consequences of child maltreatment in high-income countries. *The Lancet*. janv 2009;373(9657):68-81.
14. Tursz A. La maltraitance envers les enfants: Qu'en sait-on actuellement en France? *Les Cahiers Dynamiques*. 2015;66(4):17.
15. Observatoire National de l'Action Sociale Décentralisée. L'observation de l'enfance en danger: guide méthodologique. S.L.: Observatoire national de l'action sociale décentralisée; 2001.
16. Adamsbaum C, Rey-Salmon C. Maltraitance chez l'enfant. Cachan (14, rue de Provigny 94236): Lavoisier; 2013.
17. Haute Autorité de santé. Recommandations : Syndrome du bébé secoué. 2017 [Internet]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_2794425/fr/syndrome-du-bebe-secoue-ou-traumatisme-cranien-non-accidentel-par-secouement
18. Tursz A, Gerbouin-Rérolle P. Enfants maltraités. Les chiffres et leur base juridique en France. Paris: Éditions Lavoisier; 2008.
19. Borowsky IW, Capecchi TP, Widome R, Resnick MD. Young People and Violence. In: *International Encyclopedia of Public Health*. Elsevier; 2017. p. 502-10.
20. Straus MA, Kantor GK. Definition and measurement of neglectful behavior: some principles and guidelines. *Child Abuse & Neglect*. janv 2005;29(1):19-29.
21. Observatoire National de l'Action Sociale Décentralisée. Protection de l'enfance : Une plus grande vulnérabilité des familles, une meilleure coordination des acteurs [Internet]. 2007. Disponible sur: http://odas.net/IMG/pdf/200711_protection_enfance_2007.pdf

22. Organisation nationale de protection de l'enfance. Douzième rapport au Gouvernement et au Parlement [Internet]. 2017. Disponible sur: https://www.onpe.gouv.fr/system/files/publication/ragp_2017_web_complet.pdf
23. Rey-Salmon C. Diagnostiquer et signaler la maltraitance : repères. Laennec. 2008;Tome 56(1):6-17.
24. Dumaret A-C, Guerry E, Crost M. Placements dans l'enfance et devenir à l'âge adulte : insertion générale et qualité de vie liée à la santé. Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence. août 2011;59(5):289-98.
25. Ordre des chirurgiens dentistes. Code de déontologie dentaire [Internet]. 2009. Disponible sur: <http://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/code-de-deontologie/consulter-le-code-de-deontologie.html>
26. Krugman RD, Leventhal JM. Confronting child abuse and neglect and overcoming gaze aversion: the unmet challenge of centuries of medical practice. Child Abuse & Neglect. avr 2005;29(4):307-9.
27. Flaherty EG, Sege R. Barriers to physician identification and reporting of child abuse. Pediatr Ann. mai 2005;34(5):349-56.
28. Hardt N, Kuttnerberger J, éditeurs. Craniofacial Trauma. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2010.
29. Chevrel J-P, Fontaine C. Tête et cou. Paris: Springer; 1996.
30. Akinin J-J. Croissance craniofaciale. Médecine buccale - 28-802-C-10 ;3(1):1-21. Elsevier Masson; 2008.
31. Herring SW. Mechanical Influences on Suture Development and Patency. In: Rice DP, éditeur. Frontiers of Oral Biology. Basel: S. KARGER AG; 2008. p. 41-56.
32. Opperman LA. Cranial sutures as intramembranous bone growth sites. Developmental Dynamics. déc 2000;219(4):472-85.
33. Ruan J, Prasad P. The effects of skull thickness variations on human head dynamic impact responses. Stapp Car Crash J. nov 2001;45:395-414.
34. Bouaoud J, Corre P, Khonsari R-H. Croissance craniofaciale. EMC - Médecine buccale 2018;13(4):1-19 [Article 28-020-H-05].

35. Yu JC, Borke JL, Zhang G. Brief synopsis of cranial sutures: Optimization by adaptation. *Seminars in Pediatric Neurology*. déc 2004;11(4):249-55.
36. Russell WP, Russell MR. Anatomy, Head and Neck, Coronal Suture. In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2018.
37. Kapandji AI. *Physiologie articulaire: schémas commentés de mécanique humaine*. 11. Paris: Maloine; 2005.
38. Goffard I, Lebrault H. Problématique de la tenue de tête chez l'enfant polyhandicapé avec hypotonie globale : proposition de différentes modalités d'appareillage à partir d'un cas clinique. *Motricité Cérébrale : Réadaptation, Neurologie du Développement*. mars 2016;37(1):18-26.
39. Bandak FA. Shaken baby syndrome: a biomechanics analysis of injury mechanisms. *Forensic Sci Int*. 30 juin 2005;151(1):71-9.
40. Burdi AR, Huelke DF, Snyder RG, Lowrey GH. Infants and children in the adult world of automobile safety design: pediatric and anatomical considerations for design of child restraints. *J Biomech*. juill 1969;2(3):267-80.
41. Penneçot G-F, Mouliès D, éditeurs. Chapitre 2 - Le nouveau-né. In: *Pathologie Orthopédique de L'enfant*. Paris: Content Repository Only!; 2017. p. 13-68.
42. McPherson GK, Kriewall TJ. The elastic modulus of fetal cranial bone: A first step towards an understanding of the biomechanics of fetal head molding. *Journal of Biomechanics*. janv 1980;13(1):9-16.
43. McElhaney JH, Fogle JL, Melvin JW, Haynes RR, Roberts VL, Alem NM. Mechanical properties of cranial bone. *Journal of Biomechanics*. 1 oct 1970;3(5):495-511.
44. Margulies SS, Thibault KL. Infant skull and suture properties: measurements and implications for mechanisms of pediatric brain injury. *J Biomech Eng*. août 2000;122(4):364-71.
45. Irwin A, Mertz HJ. Biomechanical Basis for the CRABI and Hybrid III Child Dummies. In 1997.
46. Coats B, Margulies SS. Material Properties of Human Infant Skull and Suture at High Rates. *Journal of Neurotrauma*. 1 août 2006;23(8):1222-32.

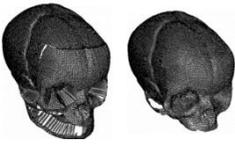
47. Maloul A, Fialkov J, Whyne CM. Characterization of the bending strength of craniofacial sutures. *J Biomech.* 15 mars 2013;46(5):912-7.
48. Wang J, Zou D, Li Z, Huang P, Li D, Shao Y, et al. Mechanical Properties of Cranial Bones and Sutures in 1–2-Year-Old Infants. *Med Sci Monit.* 3 oct 2014;20:1808-13.
49. Rafferty KL, Herring SW. Craniofacial sutures: Morphology, growth, and in vivo masticatory strains. *Journal of Morphology.* nov 1999;242(2):167-79.
50. Jaslow CR. Mechanical properties of cranial sutures. *J Biomech.* 1990;23(4):313-21.
51. Herring S, Ochareon P. Bone - special problems of the craniofacial region. *Orthodontics and Craniofacial Research.* août 2005;8(3):174-82.
52. Davis MT, Loyd AM, Shen HH, Mulroy MH, Nightingale RW, Myers BS, et al. The mechanical and morphological properties of 6 year-old cranial bone. *J Biomech.* 11 oct 2012;45(15):2493-8.
53. Biló RAC, Robben SGF, Rijn RR van. *Forensic Aspects of Pediatric Fractures: Differentiating Accidental Trauma from Child Abuse.* Springer Science & Business Media; 2010. 219 p.
54. Flaherty EG, Perez-Rossello JM, Levine MA, Hennrikus WL, Christian CW, Crawford-Jakubiak JE, et al. Evaluating children with fractures for child physical abuse. *Pediatrics.* 2014;133(2):e477-89.
55. Ghanem MAH, Moustafa TA, Megahed HM, Salama N, Ghitani SA. A descriptive study of accidental skeletal injuries and non-accidental skeletal injuries of child maltreatment. *Journal of Forensic and Legal Medicine.* 1 févr 2018;54:14-22.
56. Raynor E, Konala P, Freemont A. The detection of significant fractures in suspected infant abuse. *Journal of Forensic and Legal Medicine.* 1 nov 2018;60:9-14.
57. Barber I, Kleinman PK. Imaging of skeletal injuries associated with abusive head trauma. *Pediatr Radiol.* 1 déc 2014;44(4):613-20.
58. Offiah A, van Rijn RR, Perez-Rossello JM, Kleinman PK. Skeletal imaging of child abuse (non-accidental injury). *Pediatr Radiol.* 1 mai 2009;39(5):461-70.

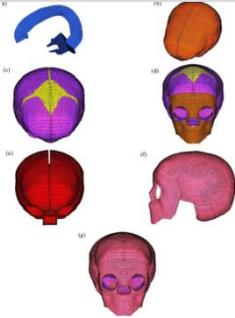
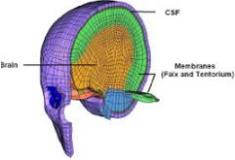
59. Hobbs CJ. Skull fracture and the diagnosis of abuse. Arch Dis Child. mars 1984;59(3):246-52.
60. Carty HM. Fractures caused by child abuse. J Bone Joint Surg Br. nov 1993;75(6):849-57.
61. Adamsbaum C, Rey-Salmon C. Quelle imagerie cérébrale devant une suspicion de maltraitance ? Archives de Pédiatrie. mai 2011;18(5):H25-6.
62. Dwek JR. The Radiographic Approach to Child Abuse. Clin Orthop Relat Res. 1 mars 2011;469(3):776-89.
63. Meservy C, Towbin R, McLaurin R, Myers P, Ball W. Radiographic characteristics of skull fractures resulting from child abuse. American Journal of Roentgenology. 1 juill 1987;149(1):173-5.
64. Radiology S on. Diagnostic Imaging of Child Abuse. Pediatrics. 1 juin 2000;105(6):1345-8.
65. Christophe C, Ziereisen F, Damry N, Guissard G, Fonteyne C, Dan B. L'IRM cérébrale chez les enfants secoués : comment ? Quand et pourquoi ? Archives de Pédiatrie. juin 2006;13(6):733-5.
66. Bonnier C, Nassogne M-C, Saint-Martin C, Mesples B, Kadhim H, Sebire G. Neuroimaging of Intraparenchymal Lesions Predicts Outcome in Shaken Baby Syndrome. PEDIATRICS. 1 oct 2003;112(4):808-14.
67. Brooks T, Choi JE, Garnich M, Hammer N, Waddell JN, Duncan W, et al. Finite element models and material data for analysis of infant head impacts. Heliyon. déc 2018;4(12):e01010.
68. Thibault KL, Margulies SS. Age-dependent material properties of the porcine cerebrum: effect on pediatric inertial head injury criteria. J Biomech. déc 1998;31(12):1119-26.
69. Roth S, Vappou J, Raul J-S, Willinger R. Child head injury criteria investigation through numerical simulation of real world trauma. Computer Methods and Programs in Biomedicine. janv 2009;93(1):32-45.

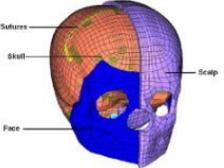
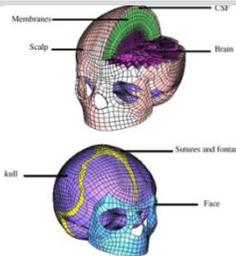
70. Li X, Sandler H, Kleiven S. The importance of nonlinear tissue modelling in finite element simulations of infant head impacts. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. juin 2017;16(3):823-40.
71. Ganry L, Hersant B, Quilichini J, Leyder P, Meningaud JP. Use of the 3D surgical modelling technique with open-source software for mandibular fibula free flap reconstruction and its surgical guides. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*. 1 juin 2017;118(3):197-202.
72. Pavarino E, Neves LA, Machado JM, de Godoy MF, Shiyou Y, Momente JC, et al. Free Tools and Strategies for the Generation of 3D Finite Element Meshes: Modeling of the Cardiac Structures. *Int J Biomed Imaging*. 2013;2013:540571.
73. Deck C, Willinger R. Modélisation par éléments finis des lésions crânio-encéphaliques: Application à l'optimisation du casque vis à vis de critères biomécaniques. Vol. Th.D-Biomécanique. Université Louis Pasteur (Strasbourg); 2004. 496 p.
74. Lund ME, de Zee M, Andersen MS, Rasmussen J. On validation of multibody musculoskeletal models. *Proc Inst Mech Eng H*. févr 2012;226(2):82-94.
75. Burkhart TA, Andrews DM, Dunning CE. Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: A review with recommendations associated with the modeling of bone tissue. *Journal of Biomechanics*. 31 mai 2013;46(9):1477-88.
76. Henninger HB, Reese SP, Anderson AE, Weiss JA. Validation of Computational Models in Biomechanics. *Proc Inst Mech Eng H*. 2010;224(7):801-12.
77. Cristofolini Luca, Schileo Enrico, Juszczak Mateusz, Taddei Fulvia, Martelli Saulo, Viceconti Marco. Mechanical testing of bones: the positive synergy of finite–element models and in vitro experiments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 13 juin 2010;368(1920):2725-63.
78. Erdemir A, Guess TM, Halloran J, Tadepalli SC, Morrison TM. Considerations for Reporting Finite Element Analysis Studies in Biomechanics. *J Biomech*. 23 févr 2012;45(4):625-33.
79. Uhl JF, Plaisant O, Ami O, Delmas V. La modelisation tridimensionnelle en morphologie: Méthodes, intérêt et resultants. *Morphologie*. 1 mars 2006;90(288):5-20.

80. Savoldelli C, Tillier Y, Bouchard P-O, Odin G. Apport de la méthode des éléments finis en chirurgie maxillofaciale. *Revue de Stomatologie et de Chirurgie Maxillo-faciale*. févr 2009;110(1):27-33.
81. Van Staden RC, Guan H, Loo YC. Application of the finite element method in dental implant research. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. août 2006;9(4):257-70.
82. Koca OL, Eskitascioglu G, Usumez A. Three-dimensional finite-element analysis of functional stresses in different bone locations produced by implants placed in the maxillary posterior region of the sinus floor. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. janv 2005;93(1):38-44.
83. Bouton A, Simon Y, Goussard F, Teresi L, Sansalone V. Nouveau protocole d'étude par élément finis : simulation clinique du mouvement dentaire orthodontique. *International Orthodontics*. juin 2017;15(2):165-79.
84. Geramy A, Tanne K, Moradi M, Golshahi H, Farajzadeh Jalali Y. Analyse par éléments finis de la convergence des centres de résistance et de rotation avec des rapports moment/force extrêmes. *International Orthodontics*. juin 2016;14(2):161-70.
85. Tanaka E, Hirose M, Koolstra JH, van Eijden TMGJ, Iwabuchi Y, Fujita R, et al. Modeling of the Effect of Friction in the Temporomandibular Joint on Displacement of Its Disc During Prolonged Clenching. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. mars 2008;66(3):462-8.
86. Tanaka E, Rodrigo DP, Tanaka M, Kawaguchi A, Shibazaki T, Tanne K. Stress analysis in the TMJ during jaw opening by use of a three-dimensional finite element model based on magnetic resonance images. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. oct 2001;30(5):421-30.

10. ANNEXES

Auteur	Année	Âge	Image	Application	Contenu	Logiciel	Type et nombre d'éléments	Limites
Lapeer	2001	Nourri sson		Déformations du crâne dues aux pressions utérines lors de la 1ère étape de l'accouchement	Crâne	Abaqus		- peu de paramètres sur les propriétés d'un crâne
Klinich	2002	6 mois	<p>Tomodensitométrie d'enfant de 27 semaines</p> <p>Propriétés basées sur les données de la littérature (de l'adulte et du porc)</p> 	Reconstruction d'accident de la circulation lors d'un impact frontal	Crâne Sutures			- pas validé en comparaison à des expériences expérimentales

Coats	2007	1,5 mois	Tomodensitométrie et atlas 	Etudes des fractures du crâne causées par les impacts occipitaux Paramètres des réponses mécaniques du cerveau et de la géométrie des sutures lors d'impacts occipitaux d'une chute de 0,3m	Crâne Sutures Cerveau	Abaqus	32881 Crâne en éléments hexagonaux à 8 nœuds	- à compléter par d'autres études sur surfaces plus molles
Roth	2007-2008	6 mois		Réponse mécanique intracérébrale lors du syndrome du bébé secoué Comparaison entre secousses vigoureuses et l'impact infligé.	Crâne Fontanelles Liquide céphalo rachidien Cuir chevelu Cerveau	Radioss	69 324 éléments solides, 9187 éléments coques Crâne en éléments coques	- manque de données expérimentales
Roth	2007-2009	3 ans		25 accidents de voiture	Crâne Sutures Cerveau Liquide céphalo	Radioss	69 324 éléments solides, 9187 éléments coques Crâne en éléments coques	- élasticité du crâne évalué par la technique de facteur d'échelle - nombre de cas d'accidents à augmenter pour une étude plus

					rachidien		représentative	
					Membranes (falx et tentorium)			
					Cuir chevelu			
					Face			
Roth	2011	17 jours		Accident	Cuir chevelu	Radioss	30 000 éléments solides	- comportement non linéaire du cerveau non pris en compte
				Modèle éléments finis de la tête du nouveau-né, avec validation par rapport aux données expérimentales.	Crâne		3700 éléments coques	
					Sutures			
					Méninges			
					Liquide céphalo rachidien			
					Cerveau			
Li	2011/2013	0 à 3 mois	11 tomodensitométries	Etude des forces s'exerçant sur le crâne d'un enfant	Cuir chevelu	LS-Dyna	50 404	- peu de sujets étudiés
					Crâne		Crâne en éléments coques	- utilisation des mêmes propriétés mécaniques pour les enfants de 0 à 3 mois
					Sutures			
					Dure mère			
					Liquide céphalo			

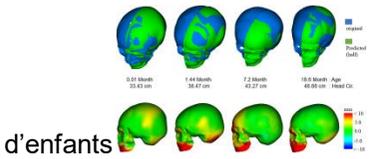
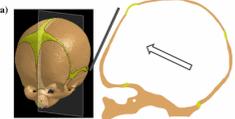
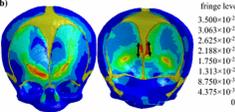
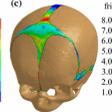
					rachidien			
					Cerveau			
Li	2015	0 à 3 mois	56 tomographies d'enfants	Modèles statistiques de crâne d'enfants de 0 à 3 mois.	Cuir chevelu Crâne Sutures Dure mère Liquide céphalo rachidien Cerveau	LS-Dyna	50 404	-points de repères sélectionnés de manière manuelle -nécessite d'être validé par un plus grand nombre d'échantillons -pas de prise en compte des propriétés mécaniques (modules de Young, densité)
								
Li	2017	0, 5 et 9 mois	(a)  (b)  (c) 	Ajout de propriétés non linéaires. Simulation d'impact et de compression sur la tête. 1 ^{ère} fois que des propriétés non linéaires sont attribuées	Cuir chevelu Crâne Sutures Dure mère Liquide céphalorachidien Cerveau	LS-Dyna	5,3 millions pour l'enfant de 9 mois	-à compléter avec d'autres études

Tableau 6 Résumé des différents modèles éléments finis de l'extrémité céphalique chez l'enfant.

Vu, Le Président du Jury,

Date, Signature :

Vu, la Directrice de l'UFR des Sciences Odontologiques,

Date, Signature :

Vu, le Président de l'Université de Bordeaux,

Date, Signature :

Collège des Sciences de la Santé

UFR des Sciences Odontologiques

Serment

En présence de mes Maîtres et de mes condisciples, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de l'art dentaire.

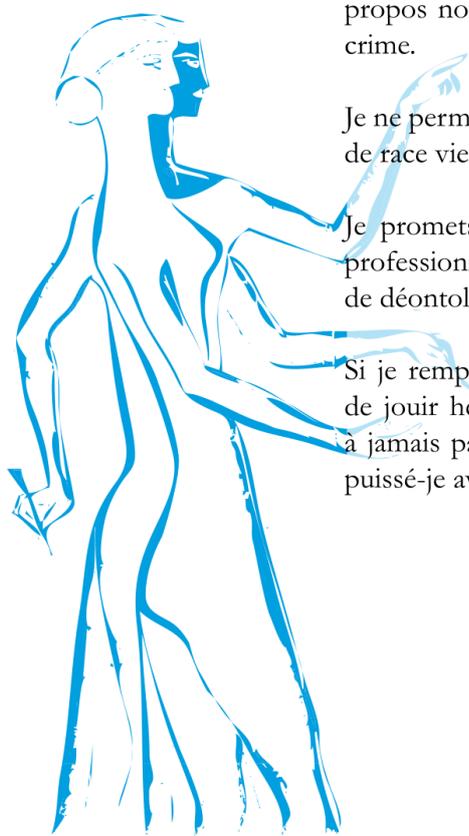
Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un honoraire au-dessus de mon travail. Ma langue taira les secrets qui me seront confiés. Admis à l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe.

Mes connaissances et mon état ne serviront ni à diffuser des propos non avérés, ni à corrompre les mœurs, ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des conditions de croyance, de nation et de race viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Je promets et je jure de conformer strictement ma conduite professionnelle aux principes et aux règles prescrites par le code de déontologie.

Si je remplis ce serment sans l'enfreindre, qu'il me soit donné de jouir heureusement de la vie et de ma profession, honorée à jamais parmi les hommes. Si je le viole et que je me parjure, puissé-je avoir un sort contraire.



Titre : Modélisation par éléments finis d'un crâne d'enfant dans le cadre de la maltraitance. Utilisation conjointe et limites de logiciels open-source.

Résumé : [2000 caractères maximum, espaces compris, soit 200 à 250 mots]

De nos jours, face à un traumatisme sur un crâne d'enfant, il reste difficile de réaliser un diagnostic différentiel étiologique entre accident et acte de malveillance. Grâce aux progrès des outils numériques, des études sur la modélisation et l'analyse par éléments finis d'une tête d'enfant se sont développées et constituent une aide complémentaire importante pour différencier et prévoir quel type de blessure peut survenir sur les crânes d'enfants. Néanmoins, cette méthode reste complexe et nécessite des logiciels spécialisés. Nous avons, au cours de cette étude expérimentale, réalisé un modèle d'un crâne d'enfant de 6 mois compatible de manière biomécanique à une analyse par éléments finis à partir d'images tomodensitométriques. L'objectif de cette thèse était d'évaluer la faisabilité de cette modélisation grâce à des logiciels gratuits. Leur utilisation à chaque étape de modélisation (segmentation, amélioration surfacique et retopologie) a permis de mettre en évidence les difficultés rencontrées et d'apporter des solutions dans l'optique de les dépasser. Ainsi, une méthodologie de création de modèle éléments finis a été proposée et le modèle obtenu pourra, une fois validé, être utilisé dans des travaux complémentaires pour simuler des scénarios et les comparer aux données cliniques d'enfants présentant des lésions consécutives à des actes de maltraitance avérées.

Mots clés : Modèle éléments finis, crâne enfant, maltraitance infantile.

Title : Finite element modelling of infant skull in the context of child abuse. Use and limits of open-source softwares.

Abstract : [2000 caractères maximum]

Nowadays, it is still a challenge to identify if a pediatric head trauma is the result of an accident or a child abuse. Thanks to the development of new digital tools, studies about finite element models and their analysis have been developed and constitute a valuable tool to predict the type of fractures than can occur on an infant skull. Nevertheless, this method is still complex and require specialized softwares. In this experimental study, we created a 6-month-old pediatric head finite element model using CT scans. The aim of this study was to evaluate the feasibility of a biofidelic finite element models construction and its analysis with free softwares. Then, it was possible to highlight the difficulties experienced in each step of modelling (segmentation, surface improvement and retopology) in order to find solutions to overcome them. Thus, we proposed a finite element model protocol. Once validated, it can be used to simulate cases and to compare them with clinical data of head traumas caused by child abuse.

Keywords : Finite element model, child skull, child abuse.
