Faculté des sciences médicales et paramédicales
Aix*Marseille Université

Ecole de Maïeutique

Modélisation du plancher pelvien chez MH2

(*Malapa hominin 2*)

Présenté et publiquement soutenu

Le 24 avril 2019

Par

RICARD Laury
Né(e) le 30 décembre 1995

Pour l'obtention du Diplôme d'Etat de Sage-Femme
Année universitaire 2018/2019

Membres du jury :

Mr FREMONDIERE Pierre	Directeur de mémoire
Mr MICHEL Gilles	Sage-femme CHU Hôpital Nord
Mr RIQUET Sébastien	Sage-femme enseignant

AIX MARSEILLE UNIVERSITE

Ecole de Maïeutique

Modélisation du plancher pelvien chez MH2

(*Malapa hominin 2*)

RICARD Laury
Né(e) le 30 décembre 1995

Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'état de Sage-Femme

Année universitaire 2018-2019

Validation 1ère session 2019 : oui ☐ non ☐

Mention : Félicitations du Jury ☐
Très bien ☐
Bien ☐
Assez bien ☐
Passable ☐

Validation 2ème session 2019 : oui ☐ non ☐
Mention :

Visa et tampon de l'école

Remerciements

Je remercie,

Pierre Frémondière mon directeur de mémoire, qui m'a proposé cette question de recherche, et m'a accompagnée tout au long de ce travail, a su répondre à mes questionnements, et m'accorder du temps lors de l'élaboration de ce mémoire.

Lionel Thollon, chercheur au sein du laboratoire de biomécanique appliquée, pour le temps précieux qu'il m'a accordé, sa patience lors des différentes simulations ; ainsi que ses nombreux conseils sans lesquels ce travail n'aurait pas abouti.

L'équipe du laboratoire d'anthropologie ADES, qui m'a accueillie en stage pendant 8 semaines afin que je puisse avancer dans mes travaux de modélisation.

Les étudiants et doctorants en stage à mes côtés au laboratoire pour leur aide précieuse dans la manipulation des logiciels et leurs conseils avisés.

Sommaire

Introduction 1
Matériel et méthodes 5
Résultats 12
Analyse et Discussion 16
Conclusion 20
Références 21
Glossaire 24
Annexes 25

Introduction

L'évolution humaine comporte de grands processus tels que l'acquisition de la bipédie(1,2), l'accroissement du volume du cerveau chez l'adulte(3), les grandes modifications du système masticateur(4). Parmi ces modifications, l'obstétrique joue un grand rôle car elle se situe au carrefour des modifications liées à la bipédie (réduction des diamètres séparant la jonction sacro-iliaque de la hanche) et de l'accroissement du volume du crâne (qui se traduit par une augmentation du volume du pôle céphalique à la naissance).

De nombreuses études ont tenté de comprendre l'évolution de l'accouchement, ces études s'intéressaient aux Australopithèques(5–7), aux premiers représentants du genre *Homo*(8), ou aux Néandertaliens(9,10).

Dans le registre de la paléoanthropologie, seuls les restes osseux sont accessibles. Les études portant sur les trois groupes fossiles évoqués ci-dessus sont basées sur la reconstruction pelvienne. Ces reconstructions sont basées sur des fragments pelviens, parfois sans sacrum(9,10), qui peuvent être déformés. Les reconstructions obtenues doivent donc toujours être considérées avec prudence, puisqu'elles peuvent être légèrement différentes d'une équipe à l'autre(11).

Parmi l'ensemble des travaux qui portent sur la paléo-obstétrique (l'étude de l'accouchement à des époques très anciennes), aucune ne porte concrètement sur l'analyse des tissus mous (muscles, ligaments, périnée). Seul Chêne et al.(12) s'interrogent sur le risque de prolapsus chez l'Australopithèques Lucy, mais leur travail se base là encore seulement sur les données pelvimétriques.

Le plancher pelvien est l'ensemble des structures musculo-aponévrotiques fermant en bas le petit bassin. (13) Il comprend donc les muscles qui composent le périnée et intéressés lors de l'accouchement (Fig. 1).

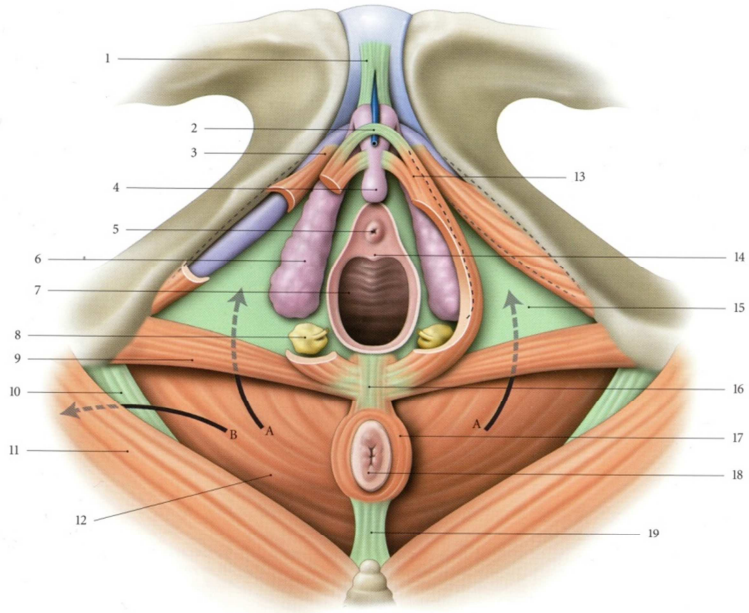


FIG. 15.11. Périnée féminin : topographie, muscles (vue inférieure)

A, B. fosse ischio-rectale (A vers son récessus ant., B vers son récessus post.)

1. lig. suspenseur du clitoris
2. m. compresseur de la v. dorsale du clitoris
3. corps caverneux
4. gland du clitoris
5. ostium externe de l'urètre
6. bulbe vestibulaire
7. vagin
8. glande vestibulaire majeure
9. m. transverse superficiel
10. lig. sacro-tubéral
11. m. grand fessier
12. m. élévateur de l'anus
13. m. bulbo-spongieux
14. carina urétrale du vagin
15. fascia inf. du diaphragme uro-génital (membrane périnéale)
16. corps périnéal
17. m. sphincter externe de l'anus
18. anus
19. corps ano-coccygien

Fig 1 : Périnée féminin : topographie, muscles (issu de Kamina, Anatomie clinique, Tome 4, 2008) (14)

MH2 (*Malapa hominin* 2) est supposée être une femelle Australopithèque du genre *Australopithecus sediba*, datant du Paléolithique, plus précisément du Pleistocène.

Cet individu possède des caractéristiques anatomiques particulières le plaçant à un maillon charnière de l'évolution, marquant la transition probable du genre *Australopithecus* vers le genre *Homo*. En effet, *Australopithecus sediba* possède une mosaïque de caractères à la fois archaïques et modernes. (15)

Berger et al. supposent qu'*A. sediba,* l'espèce à laquelle MH2 est supposé appartenir*,* présentait des caractères communs avec les représentants du genre *Homo* mais aussi certains traits communs aux *Australopithèques* notamment au niveau du crâne. (16).

Kibii a proposé une reconstitution d'un bassin osseux (Fig. 2) d'*Australopithecus sediba* à partir de fragments de bassins de deux individus, dont MH2, datés d'il y a 1,95 à 1,78 millions d'années. Dans ses travaux, ce dernier a montré que le pelvis d'*Australopithecus sediba* partageait de nombreuses caractéristiques communes avec celui des individus du genre *Homo.* (17).



Fig. 2 : Reconstruction du pelvis d'MH2 proposée par Kibii (en blanc les parties reconstruites). (Issu de Kibii et al., 2009)

La place charnière d'*A. sediba* dans l'évolution, à la transition probable entre deux grands groupes d'individus que sont les Australopithèques et les Hommes modernes, fait donc de ce dernier un sujet d'étude éminemment intéressant.

Deux hypothèses paléo-obstétricales existent concernant les Australopithèques : pour certains auteurs les Australopithèques accoucheraient sans qu'il y ait une rotation intra-pelvienne de la tête fœtale. Selon eux les Australopithèques accoucheraient en présentation céphalique transverse.(6) Pour d'autres, les mécanismes obstétricaux chez les Australopithèques seraient très proches de ceux décrits chez l'Homme moderne (rotation intra-pelvienne et flexion de la tête fœtale).(5) Ces hypothèses se basent sur la forme du bassin et supposent que le fœtus s'engage dans chaque détroit obstétrical selon le plus grand diamètre de ces détroits, comme le suggère la loi de Joulin décrite en 1864(18). Dans ce dernier cas, l'accouchement avec une rotation pelvienne serait apparu avec le genre *Australopithèques* entre 4 et 2 millions d'années.

L'émergence de la rotation intra-pelvienne, qui est supposée être une caractéristique obstétricale propre à l'Homme moderne, mais non retrouvée chez les primates non-humains(19), est également l'objet d'un débat.

Car, comme dit précédemment, certains supposent qu'elle apparaît avec les Australopithèques(5), d'autres avec le genre *Homo*(3), d'autres encore, avec les représentants du Pléistocène moyen et supérieur(10).

Les études réalisées jusqu'alors ont observé ce que la nature des fossiles des hominidés pouvait offrir : la structure osseuse. Or, l'accouchement ne peut pas se résumer à la seule étude des données pelviennes(20). L'originalité de ce travail sera, premièrement, de considérer les tissus mous à l'aide d'un modèle numérique appelé modèle en « élément-finis » ; mais aussi, d'utiliser la simulation numérique pour simuler une phase d'expulsion d'un accouchement d'Australopithèque afin d'observer le comportement biomécanique du périnée.

La question de recherche est la suivante : « *Quelle était la configuration anatomique du plancher pelvien chez MH2, et quelles sont les conséquences obstétricales de cette configuration ?* »

L'objectif principal de ce mémoire est de modéliser le plancher pelvien chez MH2 à partir du modèle de bassin fossile existant.

L'objectif secondaire est d'explorer l'impact anatomique de l'accouchement sur le plancher pelvien d'MH2 par des simulations informatiques d'accouchement.

Matériel et méthode

1. Modélisation du périnée

a. Superposition des modèles

Pour cette étude il a été fait le choix d'un périnée type « Homme moderne » du fait des nombreux caractères communs entre *Australopithecus sediba* et l'Homme moderne. En effet, la forme du bassin des Australopithèques, et particulièrement MH2, se rapproche plus de celle des Hommes modernes que des autres primates. Ce choix signifie que les insertions musculaires du plancher pelvien ont été choisies selon une configuration humaine plutôt qu'une configuration d'un autre primate.

Pour satisfaire le premier objectif de ce travail, qui était de modéliser un plancher pelvien de l'Australopithèque MH2, un modèle de plancher pelvien humain actuel, fourni par Michel Behr, chercheur au sein du laboratoire de biomécanique appliquée, a été utilisé. Ce plancher pelvien a ensuite été déformé de manière à l'adapter le mieux possible à la reconstruction pelvienne d'MH2, fournie par Martin Häusler de l'institut de médecine évolutive de Zurich. La modélisation du périnée a pu être effectuée l'aide du logiciel Avizo 7®.

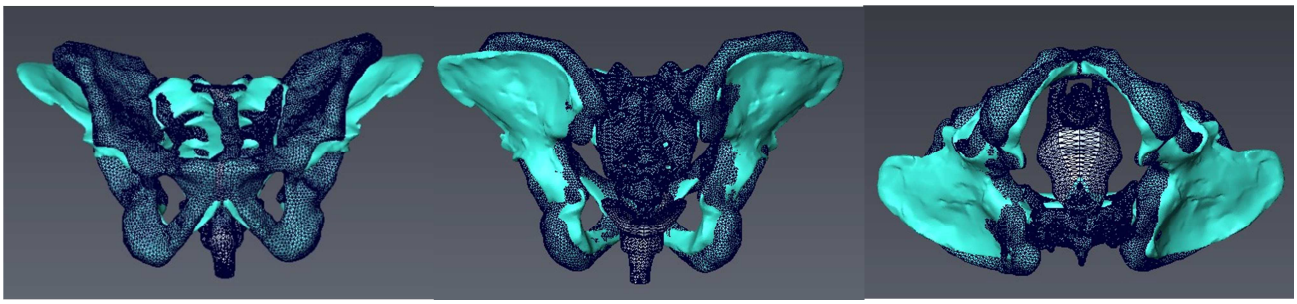
En simulation numérique, on entend par maillage la structure anatomique « en fil de fer » ou en « filet de pêche ». Elle ne correspond qu'à la géométrie de la structure. Les unités ou mailles de ce « filet de pêche » sont appelées éléments, ici ils ont une forme triangulaire. Les trois extrémités du triangle sont appelées « nœud ». Le modèle correspond au maillage dans lequel seront introduites des propriétés biomécaniques pour « donner vie au maillage ». Cette étape où la géométrie acquiert des propriétés est appelée « mise en données » et est indispensable à la réalisation, *in fine*, de la simulation.

Sur le maillage de périnée humain étaient présents le muscle élévateur de l'anus ou levator ani (LA) avec ses faisceaux pubo-rectal et pubo-coccygien ; ainsi que le côlon et le rectum.

Pour procéder à la modélisation du périnée, les deux modèles de bassin osseux ont été superposés afin d'adapter au mieux le périnée humain sur le bassin osseux de MH2.

Pour se faire, ces deux bassins ont été mis à la même échelle, dans le même axe, et le même plan. (Annexe I a)

Il a été choisi de superposer les deux modèles de manière à rapprocher le plus possibles les 3 points de chaque modèle: la symphyse pubienne, les branches ischio-pubiennes, et, l'épine ischiatique droite. La figure 3 présente une vue de face, postérieure et inférieure les deux maillages (Fig. 1 A, B, C).



A B C

Fig.3 : Vue de face (A), postérieure (B) et de inférieure (C) de la superposition des bassins osseux. En maillé le bassin humain, en bleu clair le bassin de MH2.

Une fois superposés, le but était d'isoler le périnée du modèle humain pour l'adapter au modèle de bassin osseux de MH2.

Le cadre colique et le rectum ont étés retirés n'étant pas intéressants pour cette analyse.

Pour compléter le maillage de périnée, les faisceaux pubo-vaginal du muscle élévateur de l'anus et les muscles transverses superficiels ont été ajoutés.

b. Création du faisceau pubo-vaginal du muscle élévateur de l'anus

Il a été nécessaire de détourer le faisceau pubo-rectal du LA afin de créer un muscle pubo-vaginal. Pour se faire, tous les éléments qui n'étaient pas du pubo-rectal ont été sélectionnés, puis effacés du modèle. Cela a permis d'isoler ce faisceau (Fig. 4) qui a ensuite été copié et rajouté au modèle pour créer un faisceau pubo-vaginal.

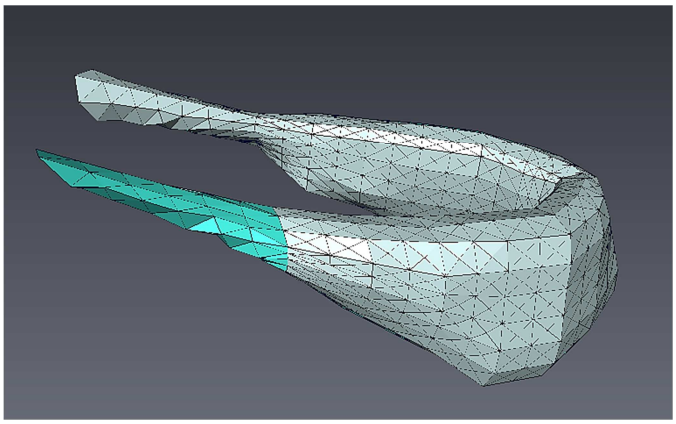


Fig. 4 :Faisceau pubo-rectal du LA isolé

Une réduction et une rotation de l'élément isolé ont permis l'insertion artificielle de ce nouveau muscle à la face postérieure de la symphyse pubienne. (Annexe I b)

c. Création de muscles transverses superficiels (MTS)

Pour créer un muscle transverse superficiel, il a fallu étirer des éléments latéraux du faisceau pubo-rectal du muscle élévateur de l'anus et ainsi créer une nouvelle surface (Fig. 5 et Fig. 6) Les éléments ont été choisis par leur position, en avant du rectum, point d'insertion proximal du MTS au niveau du centre tendineux du périnée (CTP), non représenté sur notre modèle. En étirant ces quatre éléments, de part et d'autre du faisceau pubo-rectal du LA, jusqu'aux tubérosités ischiatiques (TI), point d'insertion du muscle transverse superficiel, les deux nouveaux muscles ont pu être rajoutés au modèle (Fig. 7).

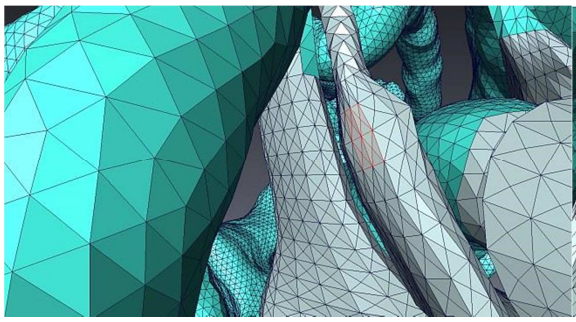


Fig. 5 : Eléments à étirer (en rouge)

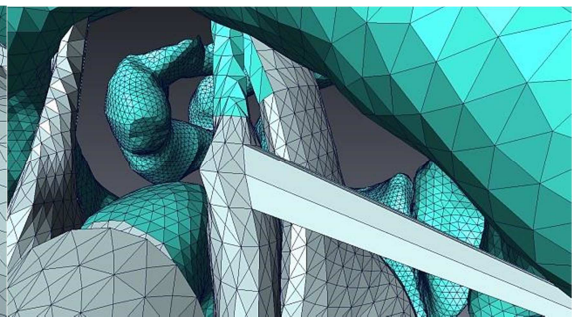


Fig. 6 : Eléments une fois étirés (M. transverse superficiel)

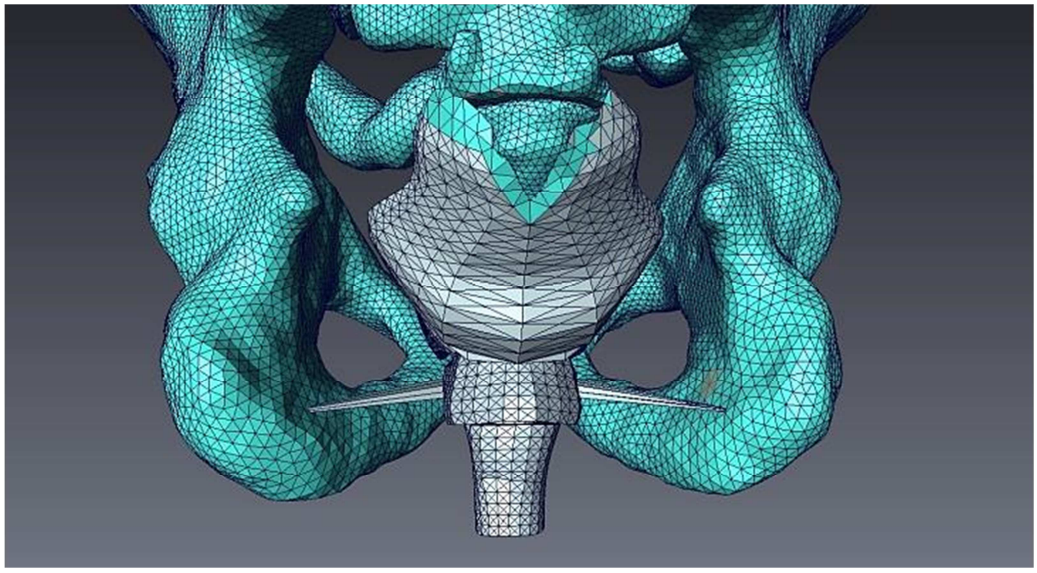


Fig. 7 : Muscles transverses superficiels créés sur le modèle de bassin humain.

d. Adaptation au modèle de bassin osseux de MH2

Afin de diminuer l'écart entre le sacrum de MH2 et l'insertion sacro-coccygienne du muscle ilio-coccygien sur le périnée en configuration humaine, une rotation du sacrum de 7.03 mm a été effectuée, selon l'axe passant entre les surfaces auriculaires, entraînant une bascule en avant de la 5ème vertèbre sacrée de 7.03mm. Physiologiquement chez l'Homme moderne, le sacrum est capable d'effectuer un mouvement de nutation ou contre-nutation entraînant au maximum un « allongement » du diamètre antéro-postérieur du détroit inférieur de 2cm (21). Comme la laxité ligamentaire au niveau de la jonction sacro-iliaque sera prise en compte dans nos simulations, la légère bascule du sacrum est alors acceptable.

Les MTS du périnée humain s'inséraient au niveau des tubérosités ischiatiques. Afin de respecter ces insertions, il a été nécessaire de reculer les faisceaux des MTS sur le bassin de MH2.

2. Modélisation de l'accouchement par simulation virtuelle

a. Mise en données

Cette étape de mise en données a été réalisée avec l'aide de Lionel Thollon du laboratoire de biomécanique appliquée.

A l'aide du logiciel Hypermesh®, il a été possible de copier le coccyx du modèle humain afin de l'adapter sur le modèle de bassin osseux de MH2. Pour ce faire, le coccyx humain a été réduit de 40% et a subi une rotation. Les éléments saillants du bord du coccyx humain ont été retirés afin de créer un ensemble plus homogène.

Les éléments musculaires ont ensuite été « rattachés » à un corps rigide afin d'unir virtuellement les muscles périnéaux et le bassin osseux (os coxal, sacrum et coccyx). Le corps rigide est ici le bassin osseux, il ne peut se déformer, ni se déplacer, à l'exception des jonctions sacro-iliaques. Comme dit précédemment, cette liberté accordée à la jonction sacro-iliaque permet d'imiter le mouvement de nutation et de contre-nutation possible pendant l'accouchement. Plus précisément, ont été ajoutés des nœuds avec les mêmes coordonnées que des points du sacrum. Une fois les deux nouveaux nœuds créés, ils ont été intégrés dans le corps rigide. A partir de ces nœuds, des ressorts ont été construits, auxquels un degré de liberté a été appliqué pour permettre une articulation bassin-sacrum.

Puisque le corps rigide ne peut pas se déplacer, ni s'aplatir, il n'est pas nécessaire de le « remplir » d'éléments, ces maillages sont donc creux. En revanche, le muscle peut s'étirer, se déplacer. Dans ce cas, il faut « remplir » le maillage d'élément, c'est ce qu'on appelle la création volumique.

La création volumique a pu être effectuée avec le logiciel Tetramesh®. Les muscles du modèle de périnée ont étés remaillés afin d'avoir un maillage plus détaillé pour se rapprocher au mieux du maillage du bassin qui lui, était très précis.

Le muscle pubo-rectal a été remaillé avec une taille d'élément de 1mm. Et le muscle pubo-vaginal avec une taille d'élément de 1.5mm.

Les éléments devaient respecter un angle minimum de 20° et maximum de 120°. Ces contraintes permettent d'optimiser la simulation.

Il a ensuite été nécessaire de remodeler individuellement les éléments qui étaient trop gros afin d'avoir un maillage le plus homogène possible.

Pour les simulations d'accouchement, le logiciel Hypercrash® a été utilisé.

Le crâne fœtal utilisé a été celui obtenu lors d'un précédent travail.(22) Il s'agit d'un maillage de crâne hypothétique de nouveau-né australopithèque (Fig. 8).

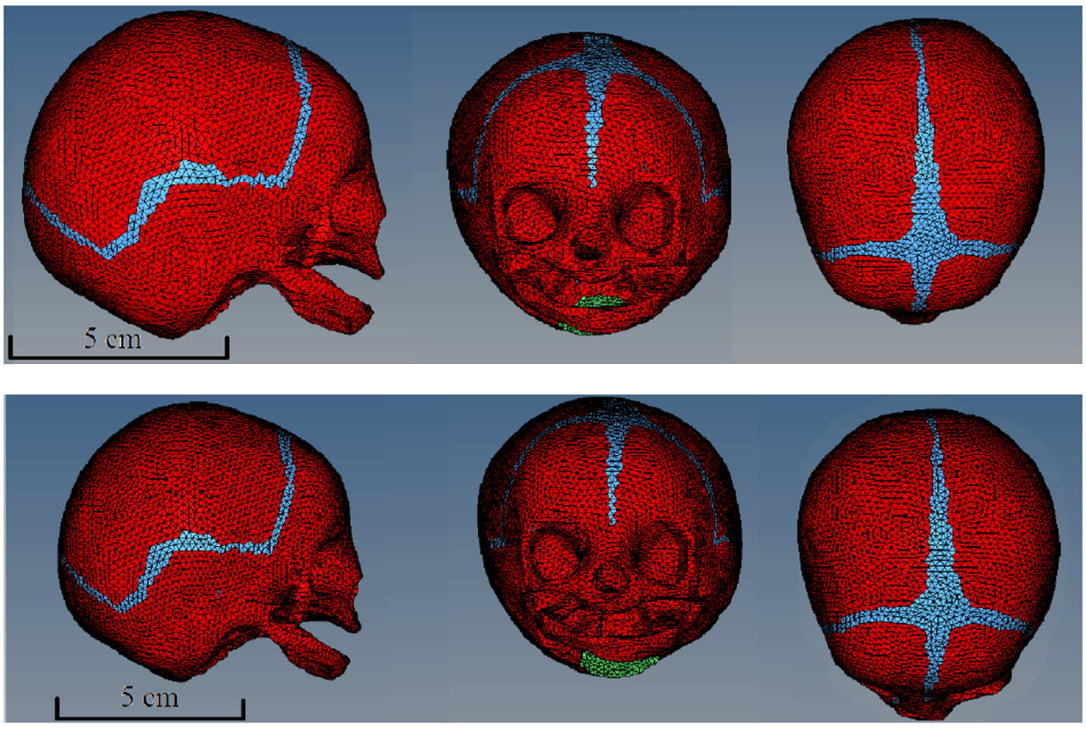


Fig. 8 : Crâne fœtal obtenu par maillage à partir des dimensions de Taung 1 (issu de Frémondière, 2015). Estimation minimale en haut, et maximale en bas.

La tête fœtale a été ensuite placée dans le bassin osseux en position occipito-pubienne fléchie. (Fig 9).

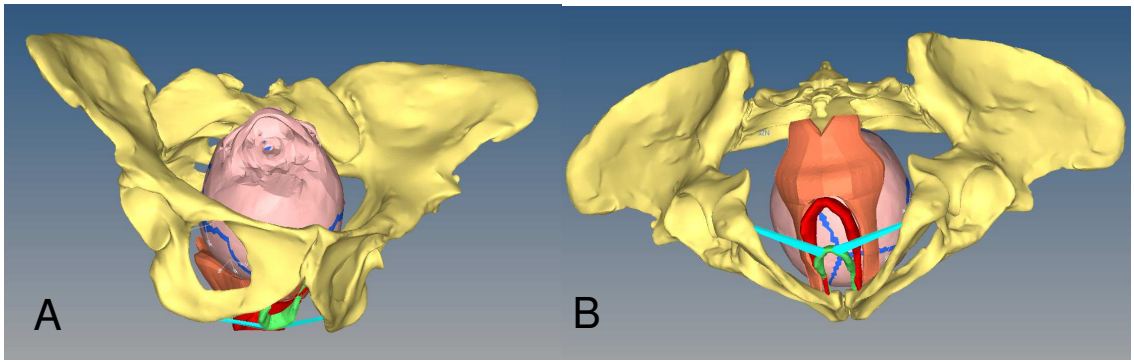


Fig. 9 : Modélisation finale, en jaune le bassin osseux de MH2, en orange le faisceau pubo-coccygien du LA, en rouge le faisceau pubo-rectal, en vert le faisceau pubo-vaginal, et en bleu les MTS, et, en rose le crâne fœtal. (A : vue latérale ; B : vue inférieure).

Pour terminer la phase de mise en données, les propriétés biomécaniques issues de la littérature (22,23) suivantes ont été utilisées :

- Pour le crâne les paramètres utilisés étaient les suivants :
  - Densité 2.1g/cm3
  - Module de Young 3800MPa (Méga Pascal)
  - Coefficient de Poisson 0.28

- Pour les fontanelles les paramètres utilisés étaient les mêmes sauf pour le module de Young qui était de 200MPa.

- Pour les muscles, les données utilisées étaient les suivantes :
  - Densité de 1.056g/cm^3
  - Module de Young de 10^7 Pa (10 MPa)
  - Coefficient de Poisson de 0.3

Résultats

Dans cette partie résultat, vont être présentées dans l'ordre chronologique les différentes simulations. Dans un premier temps, des simulations non « réalistes » ont été obtenues, il a donc été nécessaire de modifier les paramètres afin de guider les simulations ultérieures vers un résultat plus cohérent. Dans un deuxième temps, sera présentée la simulation, parmi toutes celles réalisées, qui semble la plus cohérente afin de déduire l'hypothèse paléo-obstétricale la plus intéressante issue de notre modèle de plancher pelvien d'MH2.

1. Résultats globaux issus des simulations

Parmi les simulations réalisées, un grand nombre n'étaient pas réalistes d'un point de vue anatomique. Au total 9 simulations ont été lancées. Certaines simulations entraînaient une bascule du muscle releveur de l'anus vers l'avant, d'autres simulations montraient une dystocie des parties molles. Nous avons donc choisi de nouveaux paramètres, présentés chronologiquement dans la figure 10, afin de rendre les simulations d'une part, compatibles avec un franchissement du pôle céphalique à travers le détroit inférieur, et d'autre part, sans bascule des muscles périnéaux en avant.

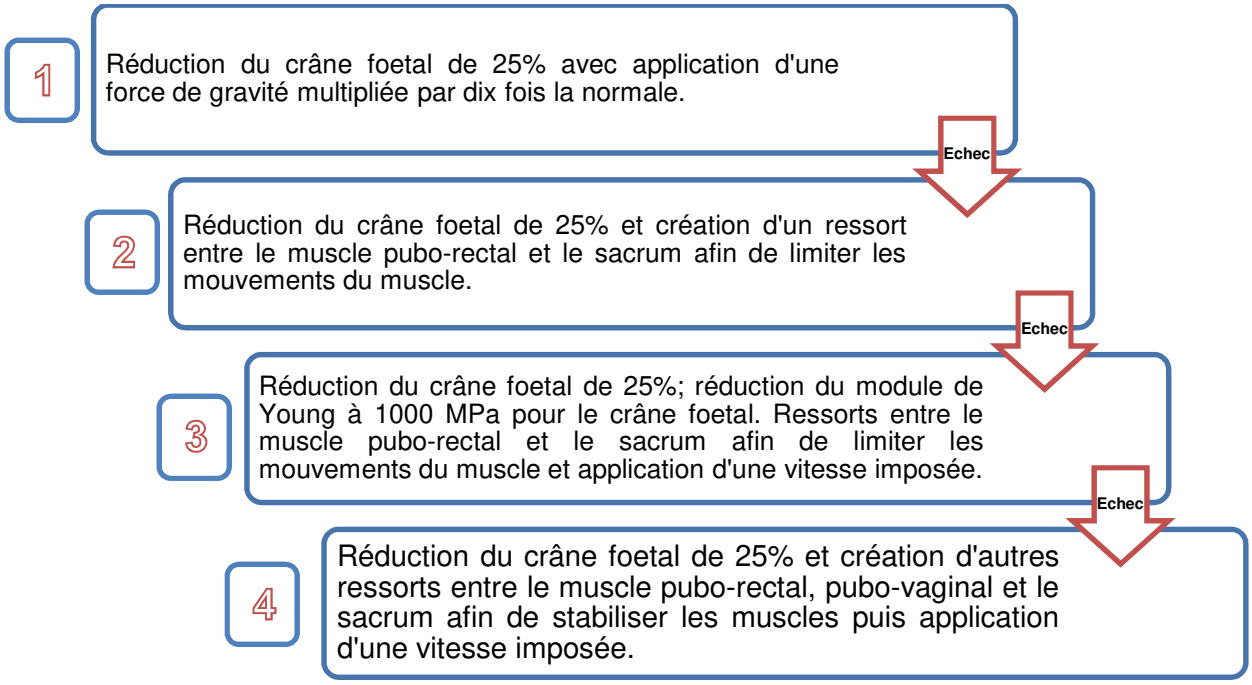


Fig. 10 : Cheminement des simulations secondaires pour arriver à un accouchement réaliste

Sur les premières simulations lancées, aucune n'a pu aboutir à un accouchement. La première décision a donc été de réduire le crâne fœtal.

Une fois le crâne fœtal réduit, une dystocie des parties molles était toujours observée, nous avons donc décidé d'augmenter la gravité appliquée sur le crâne, mimant une augmentation de l'intensité de la contraction utérine. Cette fois-ci une bascule des muscles du plancher pelvien, en avant, était observée.

Afin d'éviter cette bascule des muscles en avant, un ressort a été créé, permettant de mimer la tension postérieure entre le muscle pubo-vaginal et le sacrum. Les simulations suivantes ne permettaient pas le passage du crâne fœtal à travers le plancher pelvien et le détroit inférieur.

Par la suite, le module de Young du crâne fœtal a été réduit, rendant ainsi le crâne plus « malléable » à la déformation, et une vitesse a été imposée au crâne fœtal afin de forcer son passage.

Tous ces paramètres n'ayant aucun effet, la bascule des muscles du plancher pelvien étant toujours observée, de multiple ressorts ont été fixés entre le muscle pubo-vaginal et pubo-rectal et le sacrum. Ces ressorts ayant pour but d'assurer une « solidarité » du plancher pelvien dans son ensemble. Ces différents paramètres n'ont pas permis d'aboutir à un franchissement du périnée par le pôle céphalique.

Pour tous les calculs lancés, les contraintes les plus fortes étaient principalement au niveau des attaches pubiennes des différents muscles. Ainsi que sur les MTS qui étaient grandement étirés.

Seules les heat maps des simulations 3 et 4 avec une contrainte seuil de 1MPa (Méga Pascal) ont montré une forte contrainte au niveau du centre tendineux du périnée (zone d'insertion des MTS sur notre modèle). Cependant, cette tension restait correcte pour une contrainte seuil de 4MPa. (Annexe II : Heat Maps des simulations secondaires).

2. La simulation avec un mouvement « réaliste » des muscles périnéaux

Bien qu'aucune simulation n'ait montré le franchissement de la présentation à travers le détroit inférieur, une simulation montrait néanmoins un déplacement des muscles périnéaux plutôt réaliste. En effet, les muscles s'écartaient au contact du crâne, au lieu de basculer en avant. Cette simulation a été réalisée en utilisant la tête fœtale non réduite, et, en appliquant une force 10 fois plus importante que la gravité.

Les figures 11 et 12 montrent les tensions (en Méga Pascal (Mpa)) appliquées sur les muscles périnéaux. Sur ces figures il est possible de voir que les points de tension les plus forts étaient les accroches pubiennes des faisceaux pubo-vaginal, pubo-rectal mais surtout du pubo-coccygien du LA, atteignant jusqu'à 4 MPa. L'ancrage sacré du faisceau pubo-coccygien du LA atteignant quant à elle 2,5 à 3 MPa. Les muscles transverses superficiels étaient également étirés à moins de 2 Mpa.

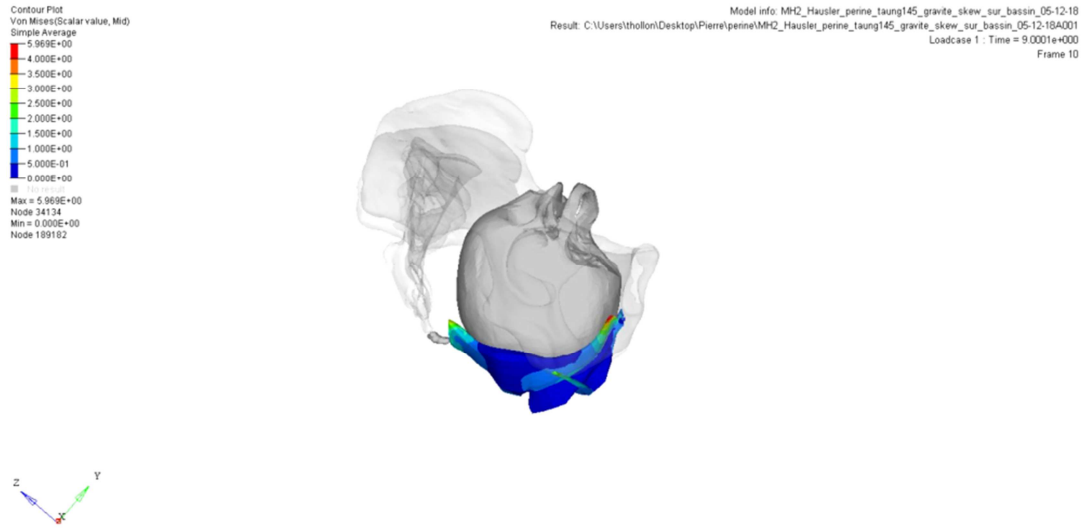


Fig. 11 : Heat Map avec une contrainte seuil de 4 MPa

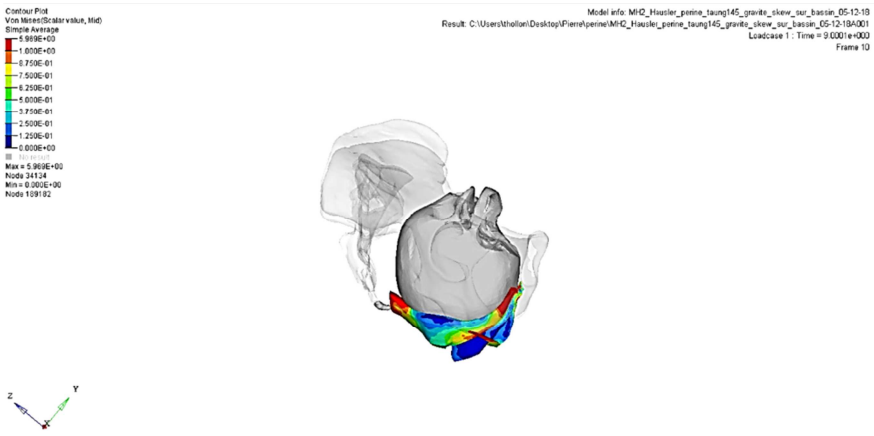


Fig. 12 : Heat Map avec une contrainte seuil de 1 MPa

Analyse et discussion

Les résultats issus de la simulation réaliste montrent des contraintes sur le plancher pelvien allant jusqu'à 4 Mpa.

Dans une étude de Parente sur l'influence des propriétés biomécaniques des matériaux sur le comportement des muscles du plancher pelvien lors d'un accouchement par voie basse (24), il a été montré que la contrainte maximale sur le périnée lors des différentes phases de l'accouchement variait entre 0.5 MPa et 3.5 MPa.

Aux vues des résultats de cette simulation il est possible de dire que les contraintes subies par les muscles précédemment cités ne permettaient pas un accouchement physiologique sans des déchirures de ces derniers.

Les résultats de la simulation avec une déformation réaliste des muscles périnéaux ont permis de mettre au jour différentes hypothèses :

- Soit la tête fœtale des *Australopithecus sediba* était plus petite que ce que les études menées jusqu'alors laissaient penser.
- Soit nos propriétés appliquées au périnée ne sont pas « bonnes », et les *Autralopithèques* avaient une configuration périnéale et une élasticité leur permettant d'accoucher de fœtus plus grands. Les périnées pouvaient être plus souples que ce qui a pu être testé dans cette étude.
- Soit les Australopithèques accouchaient au prix de déchirures périnéales majeures, notamment localisées sur l'insertion pubienne des muscles du plancher pelvien.

Si la tête fœtale était en effet plus petite que ce que les études laissaient penser, cela engendre des conséquences au niveau anthropologique.

En effet, si les nouveau-nés naissaient avec des crânes plus petits, le ratio entre la taille du crâne du nouveau-né et la taille du crâne adulte était également plus petit. Ce ratio est de 42% chez le Chimpanzé, tandis qu'il est de 25 % chez l'Homme moderne. L'Homme moderne, contrairement au Chimpanzé, donne naissance à un nouveau-né plutôt immature qui suit une croissance *ex-utero* à l'image de la croissance *in utero*, consommatrice en énergie et demandant un investissement parental important(25).

Si la taille du crâne était plus petite, et, par conséquent, le poids du cerveau plus léger que 145 grammes, cela signifie que le ratio était plus proche de celui humain de 25%. Dans ce cas, les Australopithèques avaient déjà l'expérience d'un investissement parental important lié à la prise en charge d'un nouveau-né immature.

Si les périnées des Australopithèques étaient plus souples, des conséquences sur le prolapsus, comme suggéré par Chene *et al.*(12) auraient pu être observées.

Selon les résultats de cette étude, les Australopithèques accouchaient au prix de lésions périnéales importantes. Cela ouvre des perspectives paléo-obstétricales intéressantes jamais évoquées dans la littérature. Ces lésions périnéales ont-elles eu des conséquences sur la mortalité ou la morbidité de ces Australopithèques ? Les déchirures périnéales peuvent être à l'origine d'hémorragies potentiellement graves si elles sont importantes et si l'on imagine qu'elles ne sont pas prise en charge. La gravité sur l'accouchée peut être majorée si ces déchirures sont compliquées par des infections périnéales. Ces complications étaient-elles communes chez les Australopithèques ? Cette hypothèse amène à reconsidérer la stratégie reproductrice des Australopithèques dans son ensemble.

Ce travail offre de nombreuses perspectives pour de futurs travaux :

Dans ce mémoire, nous avons utilisé les paramètres biomécaniques d'un muscle fémoral, il serait intéressant de changer ces propriétés afin de voir comment réagirait un périnée plus souple lors des modélisations d'accouchement. Chen a estimé l'élasticité du périnée par échographie dans une étude chez des femmes nullipares (26). Son étude montre un module de Young beaucoup plus faible (28 kPa) que celui utilisé lors de nos modélisations.

Il serait intéressant de conduire d'autres simulations en abaissant le module de Young à cette valeur, tout en gardant les autres propriétés biomécaniques utilisées dans notre étude (densité, et coefficient de Poisson). Ainsi, il serait possible de voir les contraintes que subirait un périnée plus élastique et si cela permettrait le passage du crâne fœtal.

Dans les simulations secondaires, il a été pris le parti d'emblée de réduire la taille de la tête fœtale, cela amène à faire d'emblée une hypothèse de petit crâne fœtal chez les Australopithèques, suggérant un ratio taille du crâne à la naissance/taille du crâne adulte plus proche de l'Homme.

La création de ressorts entre le faisceau pubo-rectal du LA et le sacrum puis, plus tard, entre le faisceau pubo-vaginal du LA et le sacrum a permis de stabiliser ces derniers mais seulement par des points d'ancrage postérieurs. Il serait judicieux dans des simulations futures de créer un modèle plus complet avec une aponévrose fermant en bas le périnée permettant de limiter les mouvements musculaires de façon plus physiologique, plus réaliste.

Lors des modélisations d'accouchement, seul un crâne fœtal a pu être utilisé, ne disposant pas de matériel corporel fossile d'individus juvéniles Australopithèques. Afin de rendre les simulations plus réalistes encore, il pourrait être proposé de rajouter un corps à ce dernier dans le but de limiter les rotations de la tête et rendre plus cohérente la mécanique obstétricale.

Il pourrait être envisagé de faire ces simulations sur d'autres bassins Australopithèques comme celui de Lucy, afin de voir si ces simulations mèneraient à des résultats identiques.

Conclusion

Dans cette étude, il a été possible de proposer une modélisation type Homme moderne du plancher pelvien chez MH2.

Le premier objectif, qui consistait à créer un plancher pelvien pour MH2 a été atteint.

Le second objectif, qui consistait à explorer, à l'aide de la simulation, l'impact anatomique de l'accouchement sur le plancher pelvien d'MH2, a été partiellement atteint. Ceci montre la complexité de la modélisation des phénomènes biologiques par la simulation virtuelle. Ces simulations étant chronophages, il est obligatoire d'imposer des paramètres avant de constater qu'ils ne permettent pas d'obtenir un résultat physiologiquement réaliste. Une simulation a permis cependant de discuter de nouvelles hypothèses obstétricales chez les Australopithèques. Les simulations d'accouchements réalisées ont pu mettre au jour des contraintes périnéales importantes ne permettant pas, chez *Australopithecus sediba*, un accouchement physiologique et non traumatique.

Cette étude a permis de montrer que l'hypothèse la plus probable jusqu'ici proposée de taille de crâne fœtal impliquait un accouchement avec des déchirures périnéales importantes.

Ce mémoire a permis d'ouvrir de nouvelles perspectives sur l'accouchement des *Australopithèques sediba*, et de suggérer de nouvelles pistes qui restent encore à explorer (crâne fœtal plus petit, périnée plus élastique, …).

Références

1. Marchal F. Croissance et variabilité du bassin chez l'homme actuel. Comparaison avec les os coxaux d'Homo erectus. [Mémoire de DEA]. Museum National d'Histoire Naturelle; 1992.

2. Marchal F. L'os coxal des hominides fossiles. Université de la Méditerranée Aix-Marseille II; 1997.

3. Martin RD (Robert D). Human brain evolution in an ecological context (James Arthur lecture on the evolution of the human brain, no. 52, 1982). New York, NY :American Museum of Natural History.; 1983

4. Emes Y, Aybar B, Yalcin S. On The Evolution of Human Jaws and Teeth: A Review. Bulletin of the International association for paleodontology. 21 juin 2011;5(1):37-47.

5. Berge C, Orban-Segebarth R, Schmid P. Obstetrical interpretation of the australopithecine pelvic cavity. Journal of Human Evolution. 1 nov 1984;13(7):573-87.

6. Tague RG, Lovejoy CO. The obstetric pelvis of A.L. 288-1 (Lucy). Journal of Human Evolution. 1 mai 1986;15(4):237-55.

7. Häusler M, Schmid P. Comparison of the pelves of Sts 14 and AL288-1: implications for birth and sexual dimorphism in australopithecines. Journal of Human Evolution. 1 oct 1995;29(4):363-83.

8. Simpson SW, Quade J, Levin NE, Butler R, Dupont-Nivet G, Everett M, et al. A Female Homo erectus Pelvis from Gona, Ethiopia. Science. 14 nov 2008;322(5904):1089-92.

9. Weaver TD, Hublin J-J. Neandertal birth canal shape and the evolution of human childbirth. PNAS. 19 mai 2009;106(20):8151-6.

10. León MSP de, Golovanova L, Doronichev V, Romanova G, Akazawa T, Kondo O, et al. Neanderthal brain size at birth provides insights into the evolution of human life history. PNAS. 16 sept 2008;105(37):13764-8.

11. Tague RG, Lovejoy CO. AL 288-1—Lucy or Lucifer: gender confusion in the Pliocene. Journal of Human Evolution. 1 juill 1998;35(1):75-94.

12. Chene G, Lamblin G, Lebail-Carval K, Chabert P, Marès P, Coppens Y, et al. The genital prolapse of Australopithecus Lucy? Int Urogynecol J. 1 juill 2015;26(7):975-80.

13. Yiou R, Costa P, Haab F, Delmas V. Anatomie fonctionnelle du plancher pelvien. Progrès en Urologie. 1 déc 2009;19(13):916-25.

14. Kamina P, Martinet C, Gouazé A. Anatomie clinique. Tome 4. Vol. 4. Paris: Maloine; 2008.

15. Morris A. On human evolution, Australopithecus sediba and nation building. South African Journal of Science. janv 2011;107(11-12):01-3.

16. Berger LR, Ruiter DJ de, Churchill SE, Schmid P, Carlson KJ, Dirks PHGM, et al. Australopithecus sediba: A New Species of Homo-Like Australopith from South Africa. Science. 9 avr 2010;328(5975):195-204.

17. Kibii JM, Churchill SE, Schmid P, Carlson KJ, Reed ND, Ruiter DJ de, et al. A Partial Pelvis of Australopithecus sediba. Science. 9 sept 2011;333(6048):1407-11.

18. Joulin D. Anatomie et physiologie comparée du bassin des Mammifères. Archives générales de médecine, 1864; 29-46.

19. Rosenberg K, Trevathan W. Birth, obstetrics and human evolution. BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology. 2002;109(11):1199-206.

20. Ferguson JE, Newberry YG, DeAngelis GA, Finnerty JJ, Agarwal S, Turkheimer E. The fetal-pelvic index has minimal utility in predicting fetal-

pelvic disproportion. American Journal of Obstetrics and Gynecology. 1 nov 1998;179(5):1186-92.

21. Delamer B, Peter J. Prise en considération de la nutation et de la contre-nutation en gymnastique prépartum. Annales de kinesithérapie. 1994;21:217-22.

22. Fremondière P. L'évolution de l'accouchement dans la lignée humaine. Estimation de la contrainte fœto-pelvienne par deux méthodes complémentaires : la simulation numérique de l'accouchement et l'analyse discriminante des modalités d'accouchement au sein d'un échantillon obstétrical. Aix-Marseille; 2015.

23. Mendes S. The development of an improved finite element muscle model and investigation of the pre-loading effects of active muscle on the femur during frontal crashes. Worcester polytechnic institute; 2010.

24. Parente MPL, Natal Jorge RM, Mascarenhas T, Fernandes AA, Martins JAC. The influence of the material properties on the biomechanical behavior of the pelvic floor muscles during vaginal delivery. Journal of Biomechanics. 19 juin 2009;42(9):1301-6.

25. Coqueugniot H., Braga J. La croissance des hominidés d'âge Plio-Pléistocène. In : Dutour O., Hublin J.-J., Vandermeersch B., (Eds), Origine et évolution des populations humaines, Éditions du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques. 2005; 56-65.

26. Chen L, Low LK, DeLancey JO, Ashton-Miller JA. In vivo estimation of perineal body properties using ultrasound quasistatic elastography in nulliparous women. Journal of Biomechanics. juin 2015;48(9):1575-9.

Glossaire

A. sediba : Australopithecus sediba

CTP : centre tendineux du périnée

LA : muscle élévateur de l'anus, ou, levator ani

MH2 : Malapa hominin 2

MTS : Muscle transverse superficiel

TI : tubérosité ischiatique

Annexe I : Données utilisées pour les mises à l'échelle sur Avizo 7 ®

Annexe I a : Données utilisées lors de l'adaptation du pelvis et périnée humain au pelvis osseux de MH2.

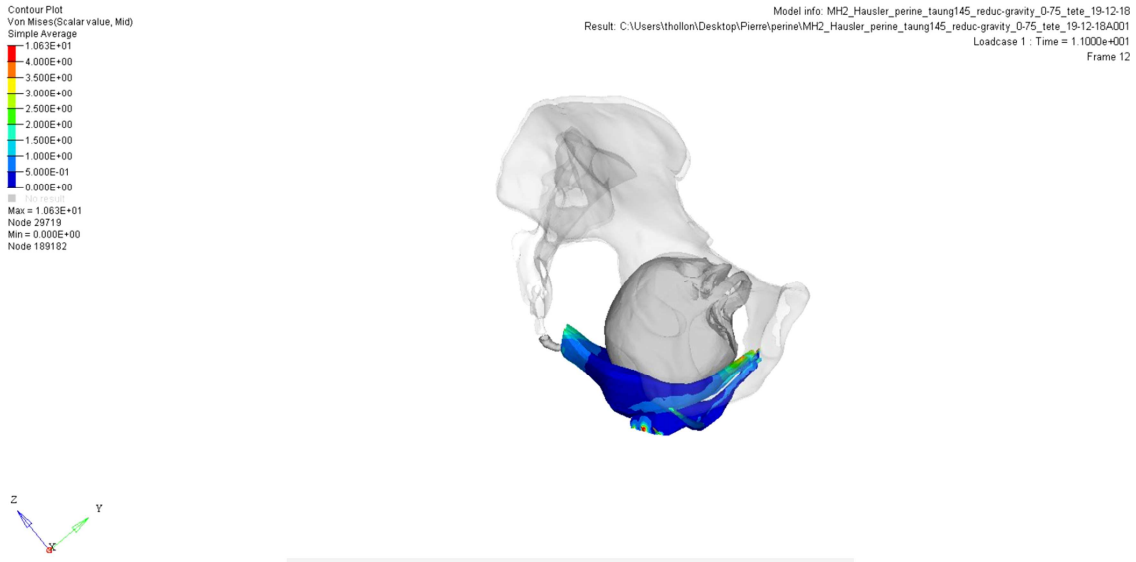
Axe x	Axe y	Axe z
Translation		
-1.916.52	-212.42	856.321
Rotation		
180.316 degrés		
-0.000471686	0.993446	-0.114306
Scale factor		
900	754	781

Annexe I b : Données utilisées pour la création du faisceau pubo-vaginal du LA (à partir du faisceau pubo-rectal).

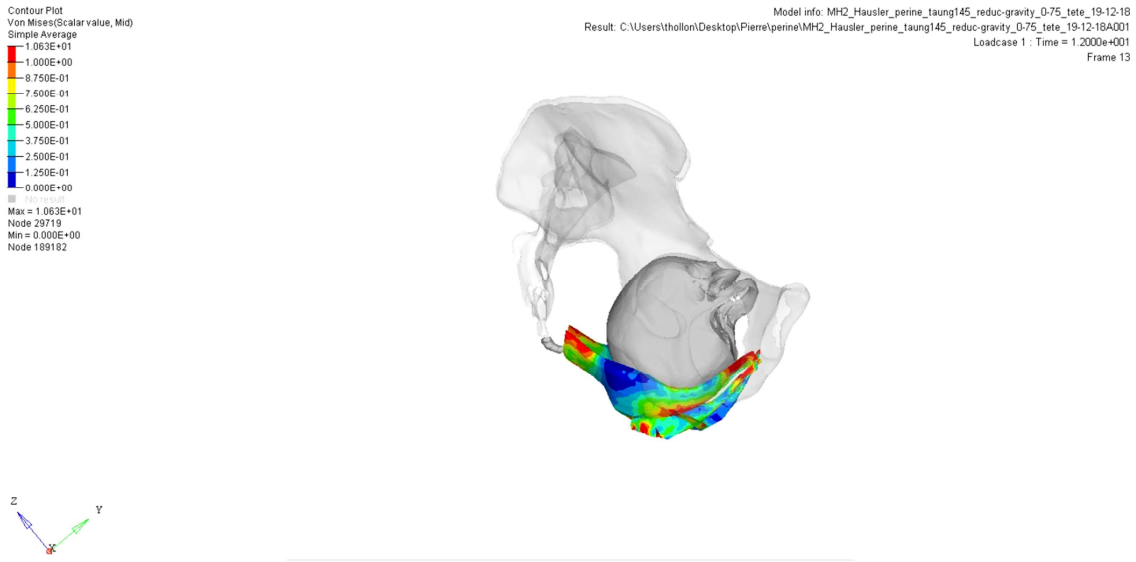
Axe x	Axe y	Axe z
Rotation		
22.5 degrés		
-1	0	0
Scale factor		
0.7	0.65	0.5

Annexe II : Heat maps des simulations secondaires

<u>Simulation 1</u> : Réduction du crâne fœtal de 25% avec application d'une force de gravité multipliée par dix fois la normale.

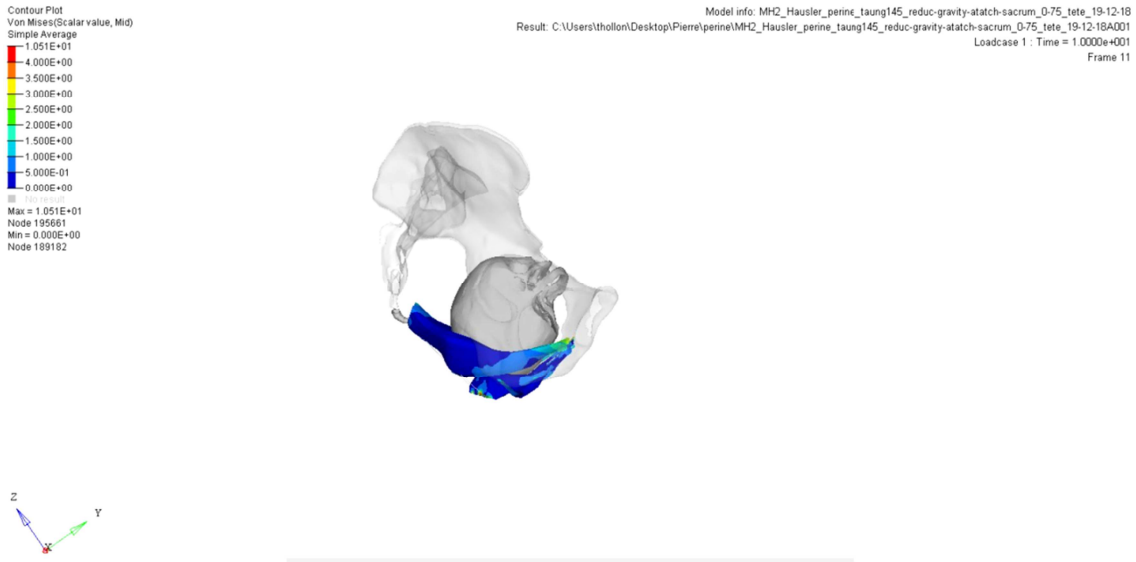


<u>Simulation 1</u> : contrainte seuil à 4 MPa

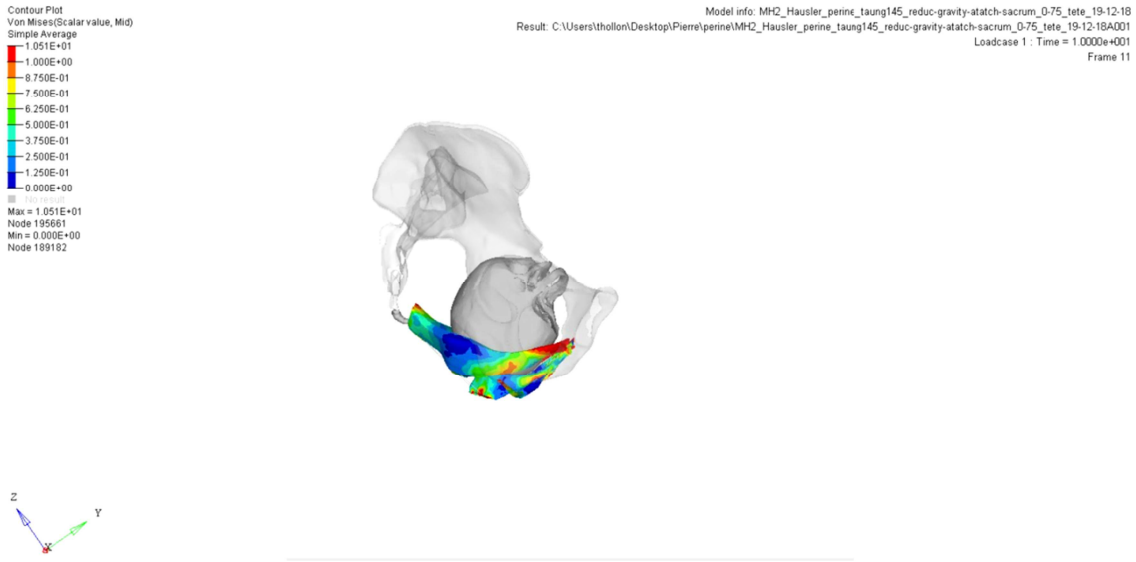


<u>Simulation 1</u> : contrainte seuil à 1 MPa

<u>Simulation 2</u> : Réduction du crâne fœtal de 25% et création d'un ressort entre le muscle pubo-rectal et le sacrum afin de limiter les mouvements du muscle

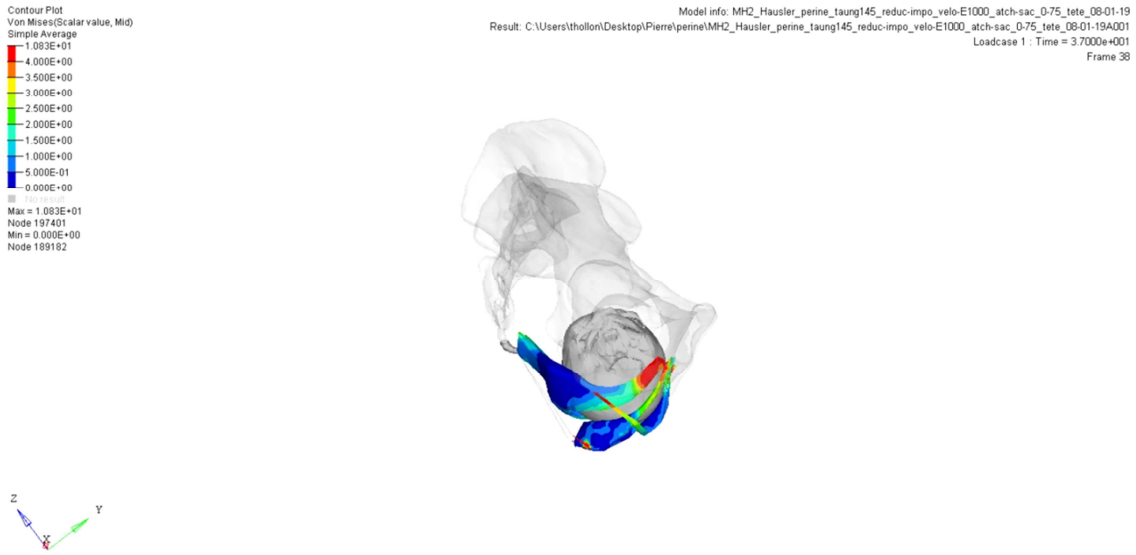


<u>Simulation 2</u> : contrainte seuil à 4MPa

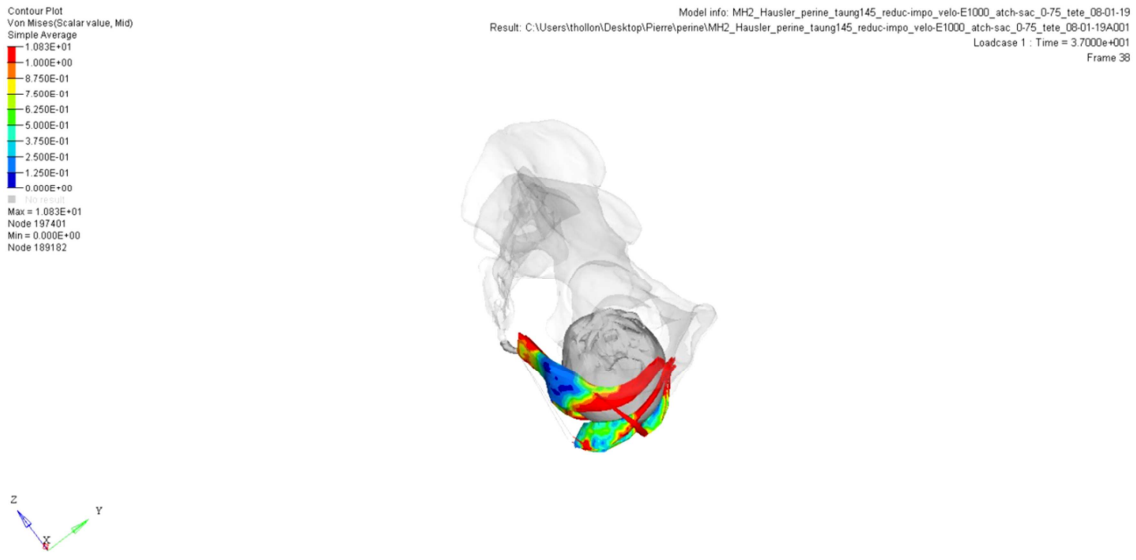


<u>Simulation 2</u> : contrainte seuil à 1 MPa

<u>Simulation 3</u> : Réduction du crâne fœtal de 25%; réduction du module de Young à 1000 MPa pour le crâne fœtal. Ressorts entre le muscle pubo-rectal et le sacrum afin de limiter les mouvements du muscle et application d'une vitesse imposée.

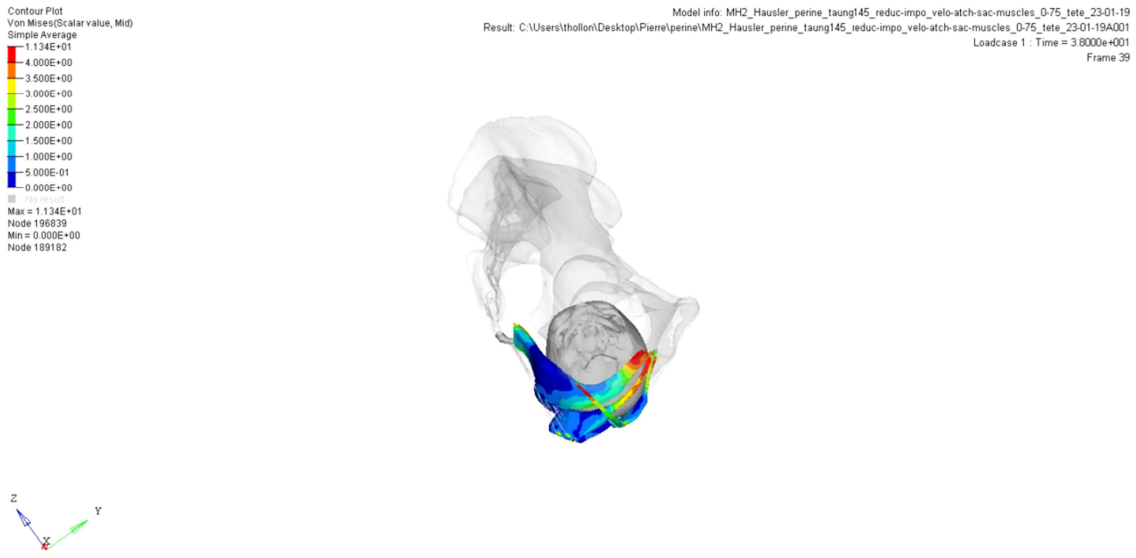


<u>Simulation 3</u> : contrainte seuil à 4 MPa

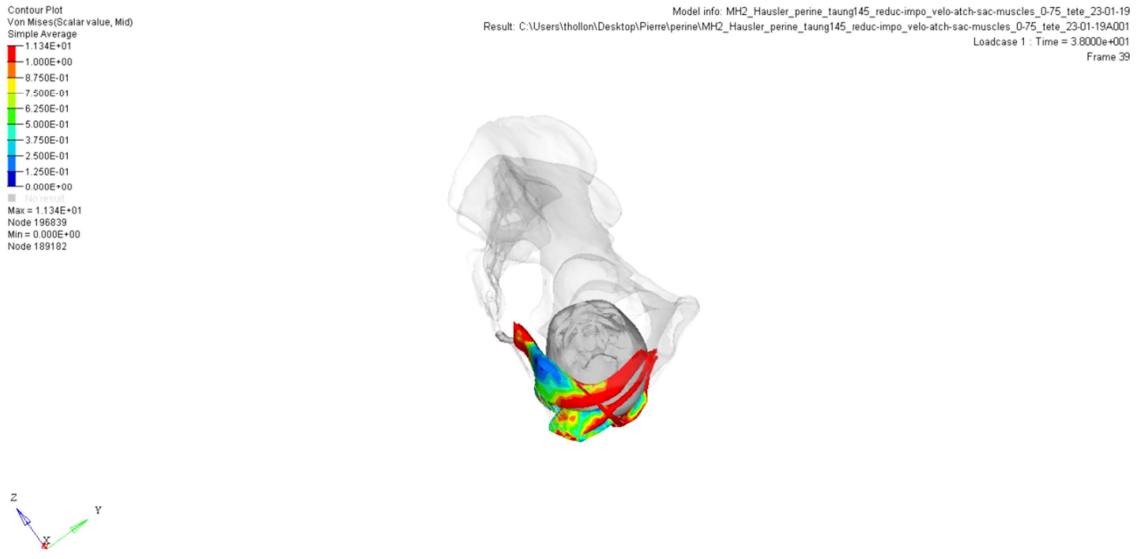


<u>Simulation 3</u> : contrainte seuil à 1 MPa

<u>Simulation 4</u> : Réduction du crâne fœtal de 25% et création d'autres ressorts entre le muscle pubo-rectal et le sacrum ainsi qu'entre le muscle pubo-vaginal et le sacrum afin de stabiliser les muscles puis application d'une vitesse imposée.



<u>Simulation 4</u> : contrainte seuil à 4 MPa



<u>Simulation 4</u> : contrainte seuil à 1 MPa

Résumé

Introduction : MH2 (Malapa hominin 2) est supposée être une femelle Australopithèque du genre *Australopithecus sediba*. MH2 possède une mosaïque de caractères à la fois archaïques et modernes permettant de le situer à la transition probable entre le grand groupe des Australopithèques et celui des Hommes modernes. Le plancher pelvien est l'ensemble des structures musculo-aponévrotiques fermant en bas le petit bassin. **Objectifs** : Modéliser le plancher pelvien chez MH2 à partir du modèle de bassin fossile existant. Explorer l'impact anatomique de l'accouchement sur le plancher pelvien d'MH2 par des simulations numériques d'accouchement. **Matériel et méthode** : La modélisation du plancher pelvien a été effectuée à partir d'un modèle de périnée humain obtenu par imagerie, en utilisant le logiciel Avizo 7®. Ont ensuite été réalisées des simulations d'accouchement en utilisant un modèle de crâne fœtal (obtenu à partir des mesures de Taung 1). Ces dernières ont été menées à l'aide du logiciel Hypercrash®. **Résultats** : Les résultats des différentes simulations ont permis de mettre en évidence que les points de tension les plus forts étaient les accroches pubiennes des différents faisceaux du levator ani, ainsi que les muscles transverses superficiels. La tête fœtale n'a pu franchir le périnée dans aucune des simulations. **Conclusion** : Les simulations ont permis de mettre au jour des contraintes périnéales importantes ne permettant pas, chez *Australopithecus sediba*, un accouchement physiologique et non traumatique. Cette étude permet de ré-envisager la taille la plus probable du crâne fœtal chez *A. sediba*, et/ou une souplesse plus importante du périnée chez ces Australopithèques. **Mots-clés** : MH2, *Australopithecus sediba*, modélisation, périnée, plancher pelvien, accouchement.

Abstract

Introduction : MH2 (Malapa hominin 2) is believed to be an Australopithecus female of the *Australopithecus sediba* genus. MH2 has a mosaic of both archaic and modern characters that may situate it at the likely transition between the large group of Australopithecus and that of modern Humans. The pelvic floor is the set of musculo-aponeurotic structures closing down the pelvis. **Objectives** : Model the pelvic floor of MH2 from the existing fossil pelvis model. Explore the anatomical impact of delivery on MH2's pelvic floor by digital delivery simulations. **Method** : Pelvic floor modeling was performed using an imagery-derived human pelvic floor model using Avizo 7® software. Delivery simulations were then performed using a fetal skull model (obtained from Taung 1 measurements). These were conducted using Hypercrash® software. **Results** : The results of the various simulations shown that the highest points of tension were the pubic hooks of the various bundles of the levator ani, as well as the superficial transverse muscles. The fetal head couldn't go through the pelvic floor in any of the simulations. **Conclusion** : The simulations revealed important perineal stresses that may not allow a physiological and not traumatic delivery for the *Australopithecus sediba*. This study makes it possible to re-consider the most probable size of the fetal skull in *A. sediba*, and / or a greater flexibility of the pelvic floor in these Australopithecus.

Keywords : MH2, Australopithecus sediba, modelization, pelvic floor, delivery