Université de la Méditerranée Aix-Marseille II

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur

de

L'Université de la Méditerranée

Spécialité : Sciences du Mouvement Humain

Option : Biomécanique

Présentée et soutenue publiquement le 31 Janvier 2012 par

Jean BREAUD

Traumatismes de l'urètre postérieur associés aux traumatismes du bassin chez l'adolescent en traumatologie routière. Conception d'un modèle numérique éléments finis de la région pelvienne et applications cliniques

Directeur de Thèse : Pr. Christian BRUNET

Co-encadrement de la thèse : Lionel THOLLON

Jury

Patrick BAQUE, Professeur, Faculté de Médecine de Nice (Examinateur)

David MITTON, Directeur de Recherche, LBMC IFSTTAR-UCBL, Lyon (Rapporteur)

Jean-Michel GUYS, Professeur, Hôpital Timone Enfant, Marseille (Rapporteur)

Yannick TILLIER, Docteur, CEMEF – MINES-ParisTech (Examinateur)

Lionel THOLLON, Docteur, LBA IFSTTAR, Marseille (Examinateur)

Remerciements

Je souhaiterai remercier pour ce travail effectué toute l'équipe du Laboratoire de Biomécanique Appliquée, en la personne du Pr Christian Brunet qui a bien voulu m'accueillir au sein de son laboratoire de recherche et accepter la direction de ce travail de recherche.

Je souhaiterai tout particulièrement remercier le Dr Lionel Thollon qui a su me guider dans la conception de ce modèle et l'organisation de ce travail avec grande sympathie et grand professionnalisme. Son implication et ses connaissances m'ont été d'une très grande utilité et ce travail est le fruit d'une collaboration fructueuse.

Je souhaiterai remercier les Dr Yannick TELLIER et David MITTON qui ont bien voulu me faire l'honneur de participer à ce jury de Thèse en apportant leur vision scientifique sur ce travail de recherche à l'interface entre la biomécanique et la traumatologie humaine.

Je souhaiterai remercier le Pr Patrick Baqué qui a su me guider dans le recueil des connaissances anatomiques indispensables à l'élaboration de ce modèle et qui me fait l'honneur de présider ce jury. Qu'il trouve en ce travail l'expression de tout mon respect.

Je souhaite enfin remercier tout particulièrement le Pr Jean-Michel Guys qui a été à l'origine de ces travaux de recherche et qui a su me sensibiliser à l'importance de la recherche dans la pratique clinique quotidienne en chirurgie pédiatrie lors de mon clinicat dans son service. Je vous remercie de m'avoir ainsi éveillé à la recherche biomédicale tout en gardant un œil de clinicien. Trouvez en ce travail l'expression de mes plus vifs remerciements.

Je souhaite remercier toute l'équipe (fort sympathique et compétente) du Laboratoire de Biomécanique Appliquée qui a eu la gentillesse de m'accueillir et de me sensibiliser aux modèles numériques.

Pages liminaires

Résumé

La population adulte jeune masculine est une population très concernée par les accidents de la voie publique en 2 roues. Ce type d'accident peut engendrer des traumatismes de l'urètre postérieur synchrones de traumatismes du bassin.
Les traumatismes de l'urètre postérieurs sont des lésions graves responsables d'une morbidité élevée à court et long terme.
Les patients présentant ce type de traumatisme de la voie publique sont le plus souvent des patients polytraumatisés justifiant d'une prise en charge en réanimation.
La problématique des traumatismes de l'urètre postérieur repose sur leur méconnaissance diagnostique fréquente à la phase initiale du traumatisme et le risque d'aggravation de ceux-ci par un geste de cathétérisme urétral.
A ce jour peu d'éléments anatomo-cliniques permettent d'établir une corrélation entre la survenue d'un traumatisme de l'anneau pelvien et le risque d'apparition d'une lésion de l'urètre postérieur associée, à fortiori avant la constatation d'une lésion osseuse radiologique.

Méthode : En se basant sur l'expérience en modélisation en accidentologie routière, un modèle numérique éléments finis de 255000 éléments a été conçu. Ce modèle a été élaboré à partir d'un scanner d'adolescent. Les structures anatomiques concernées dans les traumatismes de l'urètre et de l'anneau pelvien ont été isolées, puis mises en trois dimensions et dotées de propriétés biomécaniques. Le modèle a été vérifié selon les expérimentations disponibles sur les traumatismes de l'anneau pelvien.
Résultats : la mise en application du modèle a été réalisée en recréant 3 situations traumatiques (impact latéral, impact antéro-postérieur et impact postéro-latéral) sur l'anneau pelvien. Les étirements engendrés entre la portion prostatique et membraneuse de l'urètre ainsi que leur chronologie de survenue ont été étudiés. Dans chacune des situations un étirement de l'urètre postérieur avant même la constatation d'une fracture osseuse a été identifié, en rapport avec un déplacement asynchrone entre la membrane périnéale et le bloc prostatique.

Conclusion : l'application du modèle nous a permis une analyse précise de l'association lésionnelle entre traumatisme de l'anneau pelvien et les lésions de l'urètre postérieur, et de visualiser des déplacements de l'urètre postérieur. Ces conclusions incitent à la plus grande prudence dans la prise en charge des patients justifiant d'un geste de cathétérisme urétral en cas de traumatisme du bassin.

Title

Posterior urethral injuries associated with motorcycle pelvic injuries in adolescent. Computerized finite element model of pelvic and urethra and medical applications.

Abstract

Adolescent males involved in motorcycle accidents are particularly at risk for pelvic injuries. This traumatic situation may provoke a posterior urethral injury. Posterior urethral injuries remain problematic because their diagnosis may be missed, and during the initial treatment response the urethral injury can be worsened by urethral catheterization. Few anatomical and clinical tools exist that establish a correlation between injuries and fractures of the pelvic ring and the risk of posterior urethral injury, for instance prior to the appearance of a bony fracture.

Method : Based on experience with traffic accident modelling, a computerized finite element model was conceived integrating the specific anatomic structures concerned. This model was extrapolated from a CAT scan of a 14 years old boy. The anatomic structures concerned in urethral and pelvic ring trauma where isolated, placed in 3D and given biomechanical properties. The model was verified according to available experiments on pelvic ring trauma.

Results :To apply the model, we recreated three impact mechanisms on the pelvic ring. Stretching between the prostatic and membranous portions of the urethra (before and after visualization of a pelvic fracture) as well as timing of injury were studied.

We analyzed lateral impact, antero-posterior impact and a real car-motorcycle accident situation (postero-lateral impact).

In all the three situations, a stretching of the posterior urethra was identified prior to bony fracture visualization.

Conclusion : The model's application allowed us to analyze precisely the link between trauma of the pelvic ring and lesions of the posterior urethra and to identify an urethra stretching prior to visualization of a pelvic fracture. These elements should help to establish guidelines for urethral catheterism in male adolescent in case of pelvic trauma even without no bony fracture in order to prevent iatrogenic worsening of a misdiagnosed posterior urethral traumatism.

Mots clefs

Urètre, bassin, traumatisme, adolescent, modèle numérique

Key words

Urethra , adolescent, pevis, trauma, computerized model

Laboratoire d'accueil

Laboratoire de Biomécanique Appliquée – IFSTTAR

Aix-Marseille Université, IFSTTAR, Université de la Méditerranée, LBA, F-13916 Marseille

Faculté de Médecine – Secteur Nord, Boulevard P. Dramard 13916 Marseille Cedex 20, France

Table des matières

Remerciements 2
Pages liminaires 3
Résumé 3
Title 4
Abstract 4
Mots clefs 5
Key words 5
Laboratoire d'accueil 5
Introduction 8
Partie I : Existant 11
1. Données anatomiques 11
1.1 Anatomie du bassin 11
1.2 Appareil musculo-ligamentaire de la région périnéale 14
1.3 L'appareil urinaire et génital (urètre/prostate) 17
1.4 Autres structures du pelvis masculin impliquées dans le modèle réalisé 21
1.5 Conclusion sur les données anatomique 22
2. Les traumatismes du bassin et de l'urètre 23
2.1 Généralités 23
2.2 Traumatismes du bassin 24
2.3 Les traumatismes de l'urètre postérieur 31
3. Modèles numériques existants 40
3.1 Modèles à visée anatomique 40
3.2 Modèles dynamiques 45
3.3 Conclusions sur les modèles existants 47
Partie II : Modèle. Conception 49
1. Sujet choisi 49
2. Technique d'acquisition de la géométrie et génération du maillage 49
2.1 Géométrie 49
2.2 Génération du maillage 51
3. Mise en donnée 53
3.1 Définition d'un type d'élément pour chaque structure 53

3.2 Loi matériau 53
3.3 Définition des interfaces 55
3.4 Définition des conditions limites et initiales 56
4. Conclusion sur la génération du modèle 56
Partie III : le modèle réalisé : présentation – validation – mise en application 57
1. Présentation du modèle 57
2. Validation du modèle 59
2.1 Vérification des données anatomiques 60
2.2 Vérification du comportement du modèle 60
3. Mise en application du modèle 62
3.1 Impact latéral 62
3.2 Impact antéro-postérieur 65
3.3 Impact scooter-voiture (impact postéro-latéral) 69
3.4 Conclusion sur les trois mécanismes lésionnels 71
Discussion et conclusion 73
Annexes 79
Références 81

Introduction

Parmi les accidents de la voie publique, les accidents en deux roues représentent une cause prédominante de traumatismes sévères. Leur mortalité est rapportée dans 29 % des cas, et leur niveau de risque de décès est 17 fois supérieur à un accident en voiture [1] .

Ils touchent particulièrement la population adolescente et adulte jeune[2], comme en témoigne les statistiques nationales de la sécurité routière[1] qui identifient un risque d'accident à cyclomoteur et scooter culminant dans la tranche d'âge 14 – 17 ans. Plusieurs facteurs expliquent la vulnérabilité de cette tranche d'âge, tels que l'inexpérience des conducteurs[3] la nature du scooter utilisé (50 % accidentés ou débridés, 29 % non conforme) et le manque de matériel de protection (casques…) portés par le conducteur[1].

Les accidents de la voie publique en 2 roues entrainent dans 27 % des cas des traumatismes de l'anneau pelvien (traumatismes du bassin)[4]. Les traumatismes du bassin sont dans 9.5 % des cas des lésions sévères[5], associés dans 16.5 % des cas à des lésions d'autres organes abdomino-pelviens[6]. Compte tenu des rapports anatomiques étroits entre la symphyse pubienne et les voies urinaires, les traumatismes du bassin peuvent entrainer des lésions potentiellement sévères de l'urètre postérieur [7] et/ou de la vessie décrites dans 5 à 25 % des cas selon la gravité du traumatisme du bassin. Ces lésions présentent une morbidité très élevée et peuvent nécessiter une prise en charge complexe médico-chirurgicale prolongée (récidive de sténose urétrale, troubles mictionnels voir urétroplastie ou dérivation urinaire définitive)[8] .

Dans ce contexte, le patient victime d'un traumatisme du bassin par accident de la voie publique justifie d'une prise en charge initiale en urgence en réanimation[9].

A la phase initiale de la prise en charge de ce type de patient, l'urgence vitale est représentée par le choc hémorragique et/ou l'instabilité hémodynamique[6]. Le bilan lésionnel du patient est alors centré sur les lésions hémorragiques (fracture du bassin, contusion abdominale avec lésion d'organe plein, contusion thoracique, fractures du fémur) plutôt que vers des lésions ne mettant pas en jeu le pronostic vital ou peu parlantes sur le plan clinique.

C'est le cas des traumatismes de l'urètre postérieur dont la symptomatologie clinique (urétrorragie inconstante, hématome périnéal..) est peu parlante [7].

La prise en charge d'un patient en choc hémorragique (phase de déchoquage) justifie d'une mise en condition du patient bien codifiée [6] (abord vasculaire central, *monitoring* tensionnel, suivi horaire de la diurèse, libération des voies aériennes supérieures).

Le suivi de la diurèse du patient est habituellement assuré de première intention par la pose d'une sonde vésicale trans-urétrale. En cas de lésion de l'urètre passé inaperçue, ce geste est susceptible d'aggraver une fragilisation et/ou une lésion urétrale pré-existante, par la constitution d'un faux-trajet, voir en complétant une rupture urétrale partielle de l'urètre postérieur[10].

A ce jour, les connaissances sur l'association entre traumatisme de l'urètre postérieur et traumatisme du bassin reposent sur l'analyse de situations cliniques et/ou de données cadavériques chez des patients adultes [7,9]. Ces études ont permis d'établir des relations entre le type de fracture du cadre osseux constaté dans les suites d'un traumatisme du bassin, et le mécanisme d'apparition d'une lésion urétrale. Toutefois, aucune d'entre-elles ne permettent d'appréhender le type et le risque de lésions urétrales survenant avant l'apparition d'une fracture du cadre osseux.

Dans le domaine de l'accidentologie, l'étude des mécanismes lésionnels et des conséquences chez le patient repose sur des expérimentations mécaniques (crash-tests[11]). Dans certaines situations précises, ou lorsqu'une expérimentation mécanique est irréalisable, la modélisation numérique présente un intérêt majeur, reposant sur une reconstitution précise de l'anatomie et des propriétés biomécaniques des tissus vivants en autorisant une simulation de nombreux mécanismes lésionnels et une analyse du rapport entre les éléments anatomiques[12]. Dans d'autres situations pathologiques et/ou d'accidentologie très précises[13], les différents travaux réalisés sur la modélisation numérique ont permis d'acquérir une meilleure compréhension des mécanismes lésionnels.

Ainsi, le but de notre travail a été d'élaborer un modèle numérique « éléments finis » du pelvis ostéo-ligamentaire et uro-génital masculin d'adolescent et de simuler trois situations traumatiques.

L'objectif principal étant d'accroitre les connaissances sur l'association lésionnelle entre traumatismes du bassin et de l'urètre postérieur chez l'adolescent de sexe masculin.

L'objectif secondaire est d'évaluer les déplacements de l'urètre postérieur avant la survenue d'une fracture du cadre osseux.

Enfin, en se basant sur les résultats de la mise en application du modèle, une conduite à tenir en cas de traumatisme du bassin chez l'adolescent sera proposée.

La première partie de ce travail constitue le recueil des données existantes qui ont été nécessaires à l'élaboration du modèle. Nous présentons les données anatomiques des structures du périnée antérieur, les connaissances actuelles en traumatologie du bassin et

de l’urètre et les différents modèles numériques disponibles ainsi que leurs applications potentielles dans notre problématique.

La seconde partie de ce travail présente la méthodologie utilisée pour la conception du modèle numérique.

Une description du modèle est présentée et les 3 mises en applications réalisées (traumatisme latéral, antéro-postérieur et reconstitution d’un impact entre un scooter et une voiture) sont développées et analysées dans la troisième partie.

Dans la dernière partie, nous analysons les bénéfices, les difficultés rencontrées et les limites du modèle, et élaborons une conduite à tenir pour la prise en charge des patients adolescents victimes d’un traumatisme du bassin en scooter.

Partie I : Existant

1. Données anatomiques

Nous présenterons l'anatomie du cadre osseux, de l'appareil musculo-ligamentaire et des éléments anatomiques autres inclus dans le petit bassin.

1.1 Anatomie du bassin [14]

Le bassin osseux se compose des 2 os iliaques, du sacrum et du coccyx.

1.1.1 Os iliaque

L'os iliaque se divise en 3 parties, le pubis, l'ilion et l'ischion synostosés dans la cavité cotyloïde.

Le pubis (os pubis) se compose d'un corps, de la branche horizontale et de la branche descendante. Ces 2 branches limitent le trou ischio-pubien en avant et en bas.

L'ilion est constitué par le corps et l'aile de l'os iliaque.

L'ischion comprend le corps ou branche descendante et la branche ascendante.

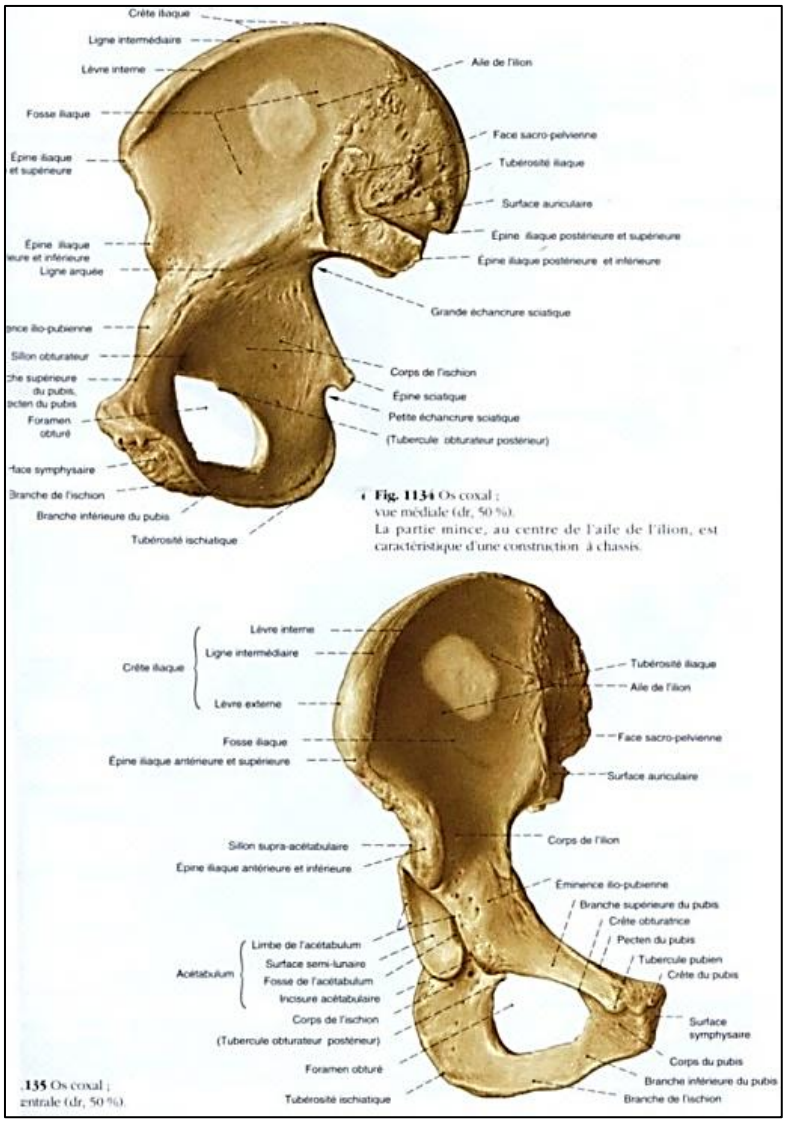


Figure 1 : os coxal [14]

1.1.2 Sacrum

Le sacrum résulte de l'union des cinq vertèbres sacrées et des disques intervertébraux qui les séparent. On lui décrit une face antérieure, concave et une face postérieure convexe. La face supérieure, orientée vers la dernière vertèbre lombaire, est la base du sacrum. L'extrémité inférieure ou sommet du sacrum est appliquée contre le coccyx.

1.1.3 Coccyx

Le coccyx, formé dans la plupart des cas de 3 ou 4 vertèbres fusionnées, n'existe généralement qu'à l'état rudimentaire.

Dans le contexte de notre modélisation le coccyx n'a pas été reconstruit dans notre modèle car il n'intervient pas d'une manière prépondérante dans la biomécanique des traumatismes de l'anneau pelvien.

1.1.4 Union des os qui constituent le bassin

La symphyse pubienne :

Les 2 os iliaques sont unis au niveau de la symphyse pubienne par un fibrocartilage à revêtement hyalin, le ligament inter-pubien. Vers le haut et vers le bas, l'union est renforcée par le ligament périphérique supérieur et le ligament arqué sous-pubien.

Articulation sacro-iliaque

Les surfaces articulaires sont constituées par la surface articulaire de l'os iliaque et la surface articulaire du sacrum. L'une et l'autre sont revêtues de fibrocartilage. Une capsule articulaire très rigide enveloppe l'articulation, pratiquement immobile.

Cette capsule articulaire est renforcée par plusieurs ligaments (sacro-iliaque antérieur, sacro-iliaque interosseux, sacro-iliaque postérieur).

Ligaments au niveau du bassin

La membrane obturatrice ferme le trou ischio-pubien tout en ménageant une petite ouverture, le canal sous-pubien pour le passage des vaisseaux et du nerf obturateurs.

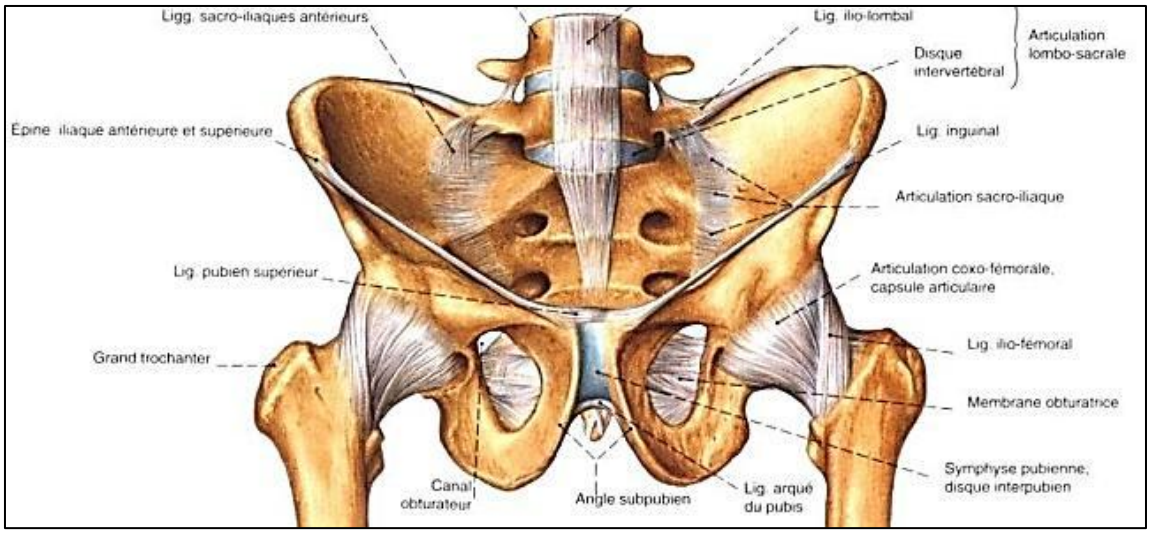
Le grand et petit ligament sacro-sciatique sont tendus en éventail entre le bord latéral du sacrum et le coccyx et la tubérosité ischiatique et l'épine sciatique.

L'arcade crurale qui représente le bord inférieur de l'aponévrose du grand oblique de l'abdomen est tendue entre l'épine iliaque antéro-supérieure et l'épine du pubis.

Dans notre modèle, le cadre osseux et ligamentaire a été considéré comme un ensemble. En ce sens les structures ligamentaires n'ont pas été spécifiquement reconstruites en dehors de la symphyse pubienne. Les propriétés biomécaniques et le comportement du modèle a été validé par une comparaison avec les expérimentations et les modèles numériques connus (cf validation du modèle).

L'articulation sacro-iliaque a été reconstruite sous forme d'une interface compte tenu de ses propriétés biomécaniques.

Figure 2 : appareil ligamentaire au niveau du bassin osseux [14]



1.2 Appareil musculo-ligamentaire de la région périnéale

Le périnée est une zone anatomique riche en éléments musculo-ligamentaires, dont le rôle dans la statique mais aussi dans la continence (urinaire et fécale) est majeur.

1.2.1 Muscles du plancher pelvien

2 groupes musculaires sont présents dans cette région anatomique : les muscles du diaphragme pelvien, et les muscles du diaphragme uro-génital.

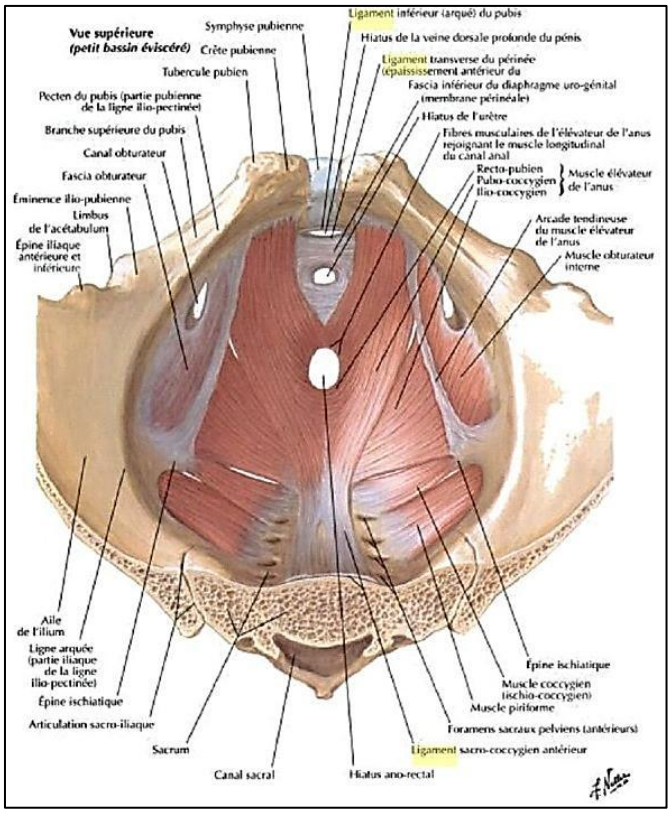
Le diaphragme pelvien

Il est composé du muscle releveur de l'anus et du muscle coccygien.

- le muscle releveur de l'anus naît par 2 lames de part et d'autre de la paroi interne du petit bassin. Le tendon d'origine de chacune de ces lames, l'arc tendineux, s'étend ainsi depuis la symphyse pubienne jusqu'à l'épine sciatique en croisant le fascia du muscle obturateur interne. Il est constitué de trois muscles, le muscle pubo-rectal dont les 2 moitiés cravatent le rectum à sa partie postérieure, et limitent en avant la fente uro-génitale ; le muscle ilio-coccygien qui fait suite vers l'arrière au muscle pubo-rectal et se dirige vers le coccyx et le ligament ano-coccygien ; le muscle pubo-coccygien prend un trajet plus long depuis le pubis jusqu'au coccyx en se plaçant au-dessus des deux autres muscles.

- le muscle coccygien : il continue le muscle releveur de l'anus vers l'arrière. Il se détache de l'épine sciatique et se termine en éventail sur les parties latérales du sacrum et du coccyx.

Figure 3: muscles du diaphragme pelvien (Atlas d'Anatomie Humaine de F. Netter)

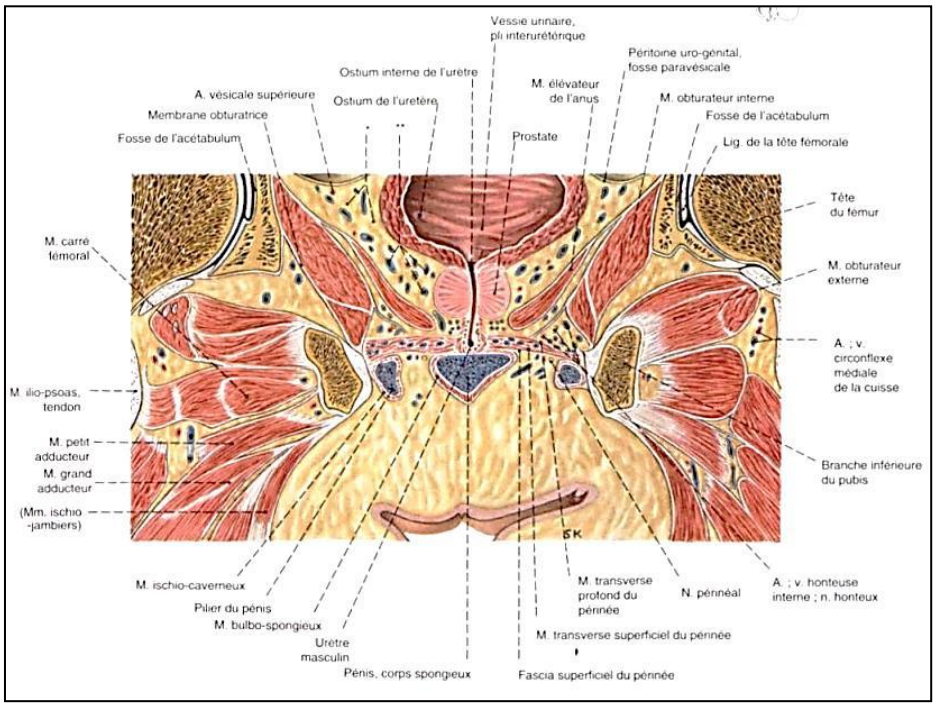


Dans le modèle constitué, l'ensemble de ces contingents musculaires ont été regroupés sous forme de 2 contingents droits et gauche car leur intervention n'est pas prépondérante par rapport aux autres moyens de fixation de l'urètre dans notre problématique. De plus la compte tenu du caractère intriqué de ces différents muscles, il était très difficile de les individualiser sur les coupes de scanner.

Le diaphragme uro-génital

Le diaphragme uro-génital représente un ensemble d'éléments anatomiques qui sépare la région périnéale en 2 parties, sous forme d'un disque compris entre deux fascias (superficiel et profond). Si l'on considère les 2 fascias (superficiel et profond) il représente un ensemble musculo-membraneux difficilement dissociable, qui s'étend entre les branches ischio-pubiennes.

Figure 4 : diaphragme uro-génital (coupe frontale) [14]



Le muscle transverse profond du périnée est une mince nappe musculaire qui se place dans l'angle formé par les deux branches inférieures du pubis. Il est perpendiculaire à la fente urogénitale qu'il ferme en partie vers le bas. Tandis que les fibres postérieures du muscle sont presque transversales, les fibres antérieures entourent l'urètre en lui constituant le sphincter volontaire par des tractus circulaires ou semi-lunaires. Des fibres spiralées remontent vers la prostate.

Le muscle transverse superficiel du périnée peut renforcer le bord postérieur du muscle transverse profond du périnée par des fibres transversales minces, superficielles provenant de la tubérosité ischiatique.

Le ligament triangulaire (ou membrane périnéale) : c'est la limite supérieure de l'espace périnéal profond (= fascia profond). C'est un tissu fibreux solide s'étendant de l'arche pubien jusqu'au branches ischio-pubiennes. Dans le sexe masculin, ce ligament s'affine en antérieur pour former le ligament transverse du périnée laissant le passage à la veine dorsale du pénis. L'angle en dessous de la symphyse n'est fermé que par du tissu fibreux, le ligament transverse du périnée. Entre la symphyse et le ligament transverse passe la veine dorsale profonde du pénis ; entre le ligament et le muscle transverse profond du périnée, l'artère et le nerf dorsal du pénis traversent le diaphragme uro-génital.

Figure 5 : diaphragme uro-génital (partie antérieure) [14]

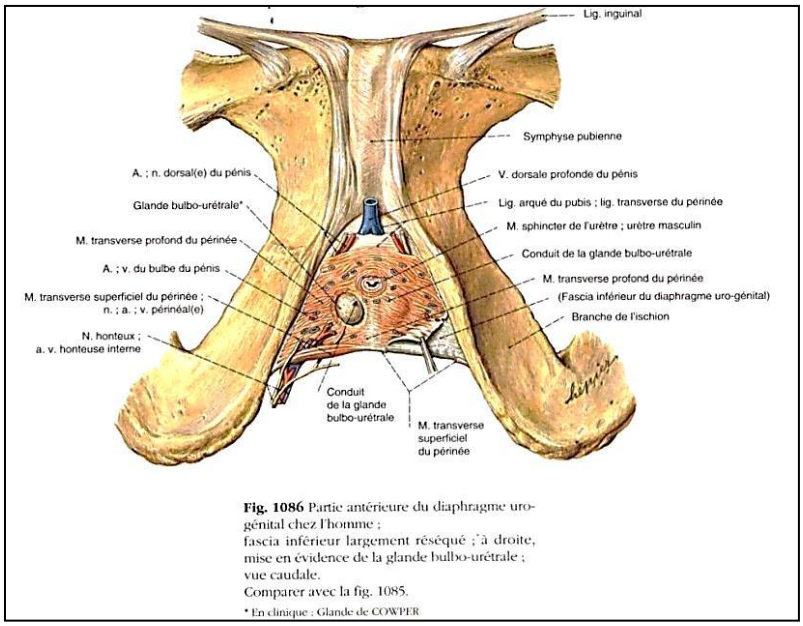


Fig. 1086 Partie antérieure du diaphragme uro-génital chez l'homme ; fascia inférieur largement réséqué ; à droite, mise en évidence de la glande bulbo-urétrale ; vue caudale.
Comparer avec la fig. 1085.
* En clinique : Glande de COWPER

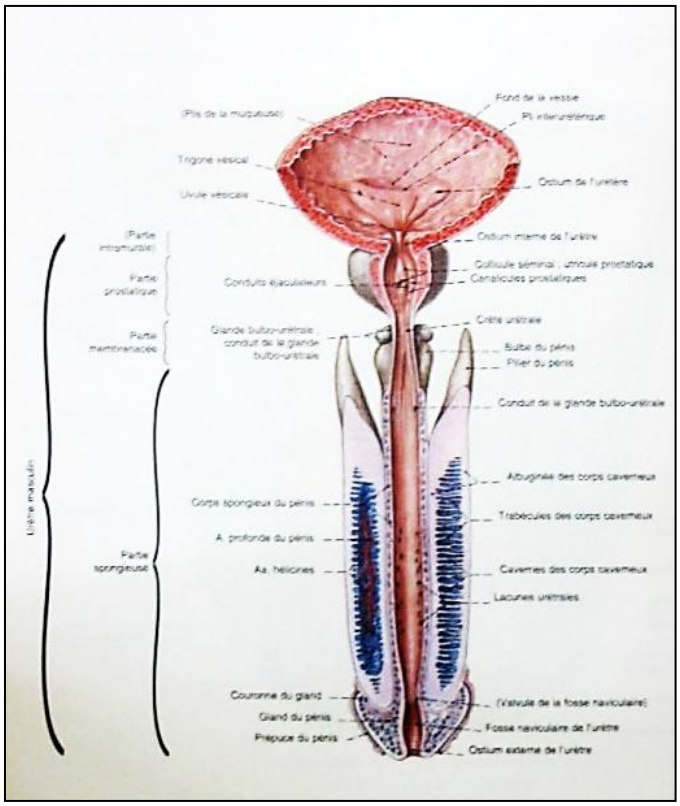
Dans le modèle réalisé l'ensemble des éléments du diaphragme pelvien ont été regroupé sous le terme de membrane périnéale, ménageant le passage de l'urètre membraneux, à propriétés musculo-ligamentaires.

1.3 L'appareil urinaire et génital (urètre/prostate)

1.3.1 L'urètre[14,15]

L'urètre est un tube s'étendant de la vessie au méat balanique, qui est séparé en 2 zones anatomiques distinctes : l'urètre postérieur (formé de l'urètre prostatique et de l'urètre membraneux) et l'urètre antérieur (formé de l'urètre spongieux).

Figure 6 : urètre [14]



L'urètre masculin à une longueur de 20 à 25 cm chez l'adulte. Des rétrécissements alternent avec des portions dilatées. La partie initiale, rétrécie, avec l'ostium interne de l'urètre est contenue à l'intérieur de la paroi vésicale.

La partie prostatique large à une longueur de 25 à 30 mm, un calibre 12 à 15 mm, avec une dilatation à l'union du 1/3 supérieur 2/3 inférieur, le sinus prostatique.

Il traverse la prostate de haut en bas, suivant une direction presque verticale, qui réalise un angle de 15 à 20° avec l'axe de la prostate.

Dans le prolongement de l'uvule vésicale se place le colliculum séminal (véru montanum) fusiforme, d'une longueur de 15 mm et large de 3 mm. Il assure par sa turgescence, l'impossibilité de la miction pendant l'érection ; large et saillant à sa partie moyenne ou corps, il s'effile à ses deux extrémités :

- le corps du veru présente sur la ligne médiane l'orifice de l'utricule prostatique, et, de part et d'autre, les orifices des canaux éjaculateurs ; la saillie du veru détermine sur la paroi postérieure de l'urètre deux gouttières latérales dans lesquelles s'ouvrent les canaux des glandes prostatiques.

- L'extrémité supérieure se prolonge dans le col vésical par deux freins qui encadrent le sommet du trigone, et limitent entre eux la fossette prostatique où s'ouvrent les orifices des glandes périurétrales.

-L'extrémité inférieure se termine par un pli vertical, la crête urétrale qui descend jusqu'à l'urètre membraneux.

Compte tenu de la taille du veru montanum et de sa faible implication dans les traumatismes de l'urètre postérieur, cet élément n'a pas été spécifiquement reconstruit dans notre modèle.

La partie membraneuse de l'urètre est le segment le plus étroit ; elle se place dans le muscle transverse profond du périnée, à 2 cm environ de l'angle du pubis. Sa circonférence mesure 1,2 à 1,5 cm, mais peut être augmentée passivement.

La partie spongieuse commence en dessous du muscle par une portion dilatée, dans laquelle s'abouche de part et d'autre la glande bulbo-urétrale (de Cowper), de la taille d'un pois.

Le gland du pénis contient la fossette naviculaire large, longue de 2 cm, qui se rétrécit vers l'ostium externe de l'urètre (méat urinaire)

Portions fixes / mobiles :

- L'urètre postérieur et la partie périnéale de l'urètre antérieur sont fixes (fixation par les connexions urétrales avec la prostate et le périnée).
- Le reste de l'urètre : segment extrapérinéal de l'urètre membraneux et urètre spongieux sont mobiles.

Nous avons dans notre modèle reconstruit la vessie, prolongée par l'urètre postérieur dans sa portion prostatique (le passage de l'urètre dans la glande prostatique a été ménagé) puis par sa portion libre et enfin par sa portion membraneuse (le passage de l'urètre dans la membrane périnéale a de même été ménagé). L'urètre a été prolongé jusqu'à son entrée dans le corps caverneux et collé à ce niveau au corps caverneux.

Les corps caverneux et le corps spongieux ont été reconstruits même si ils n'interviennent pas dans les mécanismes lésionnels analysés.

Cette limite de reconstruction de l'urètre a été réalisée compte tenu du but de notre problématique qui se limite à l'urètre postérieur et des connaissances actuelles sur la traumatologie du bassin qui situent les lésions et les déplacements entre urètre membraneux et prostatique.

1.3.2 La prostate et la région prostatique [14]

La loge prostatique

La loge prostatique, située au-dessous de la vessie, enferme la prostate, glande génitale qui entoure chez l'homme la portion initiale de l'urètre.

Pratiquement inextensible, elle adhère de façon lâche à la prostate.

Elle est constituée par plusieurs feuillets provenant des différentes aponévroses de la région :

- en avant : la lame pré-prostatique (ligament pubo-prostatique), dédoublement du feuillet supérieur de l'aponévrose périnéale moyenne
- en arrière, l'aponévrose prostato-péritonéale de Denonvilliers, peu résistante
- latéralement : les lames sacro-recto-génito-pubiennes
- en bas : l'aponévrose périnéale moyenne, dont le seul feuillet inférieur est isolable, et plus en dehors, l'entonnoir des muscles releveurs de l'anus
- en haut : le mince feuillet intervésico-prostatique, émané de l'aponévrose pelvienne, sépare incomplètement la loge prostatique de la loge vésicale.

Dans l'ensemble, cette loge est solidement fermée en bas et latéralement, mais elle présente deux points faibles :

Postérieur : l'aponévrose de Denonvilliers la sépare imparfaitement du rectum.

Supérieur : le sphincter lisse de la vessie s'insinue entre l'urètre et la prostate, rendant intime les rapports vésico-prostatiques.

La prostate

Impaire et médiane, la prostate englobe le carrefour des voies urinaires (urètre) et des voies génitales (2 canaux éjaculateurs) :

De la taille d'un marron d'Inde, elle réalise un petit cône aplati à sommet inférieur ; son axe, très oblique en bas et en avant, forme avec la verticale un angle aigu de 25°.

Situation de la prostate dans la région périnéale :
La prostate est située dans la partie antérieure de la cavité pelvienne, entre :

- la symphyse pubienne en avant (distante de 1 à 1,5 cm)
- le rectum pelvien en arrière
- la vessie en haut
- l'aponévrose périnéale moyenne en bas
- l'entonnoir des releveurs de chaque coté

La prostate est partiellement fixe, maintenue en place par son adhérence avec la base de la vessie, la traversée de l'urètre et des voies spermatiques et ses connexions avec les parois de sa loge.

Rapports anatomiques de la prostate

La prostate est traversée par l'urètre prostatique qui est bordée à la périphérie du sphincter lisse de l'urètre. Autour de ce sphincter la prostate se dispose en fer à cheval à concavité antérieure. De plus les voies génitales (canaux éjaculateurs) traversent le parenchyme prostatique.

Autour de la prostate, le sphincter strié de l'urètre n'est un anneau complet qu'au niveau de l'urètre membraneux et du sommet de la prostate ; plus haut, le développement secondaire de la glande l'a fait éclater en arrière, le transformant en une mince lame musculaire pré-prostatique.

Evaluation morphométrique de la prostate humaine

La prostate présente une évolution morphométrique au fil des années. Ainsi plusieurs travaux identifient une augmentation du volume prostatique entre 20 et 50 ans [16-17-18], avec un volume mesuré entre 20 et 30 ans à 23854 +/- 3055 mm3 et un poids estimé à 20 + /- 6 gr entre 21 et 30 ans [17].

Dans le modèle réalisé, la prostate a été considérée comme fixée par les ligaments pubo-prostatiques englobant la prostate reconstruite dans les portions antérieures et latérales. Il n'a pas été possible de distinguer l'aponévrose de Denonvilliers d'une manière spécifique.

De même la définition scannographique a rendu impossible la distinction des glandes de Cooper.

1.4 Autres structures du pelvis masculin impliquées dans le modèle réalisé

1.4.1 : Le rectum [14]

Le rectum, d'une longueur de 15 à 20 cm, a une forme de S. Il suit d'abord la concavité du sacrum puis à la hauteur du coccyx, il se réfléchit vers l'arrière et traverse le périnée.

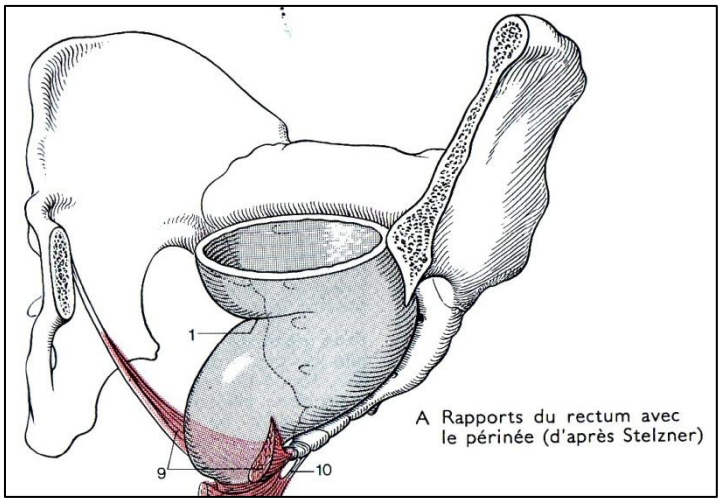
Le tiers supérieur du rectum comporte un segment très dilatable, l'ampoule rectale dont le remplissage provoque les besoins de défécation.

Le rectum est recouvert de péritoine sur ca face antérieure et ses faces latérales, mais pas sur sa face postérieure ; il n'est de ce fait pas un organe péritonéal mais sous-péritonéal. Parmi ses rapports anatomiques, on retrouve :

Des anses d'intestin grêle, la prostate et les vésicules séminales à travers le fascia de Denonvilliers, la vessie et le colon sigmoïde qui repose sur cette dernière.

Le rectum se prolonge par le canal anal en bas, et est entouré d'une atmosphère graisseuse péri-rectale.

Figure 7 : rectum (Atlas d'Anatomie- W Kahle et al.)



1.5 Conclusion sur les données anatomique

Le périnée antérieure est une région complexe associant une structure ostéo-ligamentaire périphérique et potentiellement soumises à de fortes contraintes et des structures internes principalement représentées par les filières uro-génitales et digestives.

La région périnéale est fermée par le diaphragme périnéal, structure musculo-ligamentaire, traversée par la portion membraneuse de l'urètre et fixée au cadre osseux.

La filière urogénitale est centrée sur 2 éléments principaux, le bloc vésico-urétral et la prostate, qui contiennent des portions fixes et mobiles.

La prostate présente principalement des attaches antérieures et latérales sous forme des ligaments pubo-prostatiques, et prolongés en arrière par l'ensemble des muscles du plancher périnéal.

L'urètre dans sa partie traversant la région périnéale est représenté par l'urètre postérieur qui présente deux portions fixes (la portion prostatique et la portion membraneuse).

Entre l'ensemble de ces éléments il existe une atmosphère graisseuse.

Les principaux éléments anatomiques concernés par notre problématique sont donc le cadre osseux, l'urètre postérieur, la prostate, la membrane périnéale et les ligaments pubo-prostatiques.

Le tableau 1 résume par zone anatomique et type de tissus les éléments reconstruits et intégrés dans le modèle

Tableau 1 : liste des éléments reconstruits et correspondance anatomique

Zone anatomique / type de tissu	Eléments reconstruits	Eléments regroupés dans chaque ensemble
Cadre osseux	Os iliaque gauche	Os iliaque
	Os iliaque droit	Os iliaque
	Sacrum	sacrum
Ligaments du pelvis	Symphyse pubienne	Symphyse pubienne
Appareil musculo-ligamentaire du périnée	Muscles pelviens droits et gauche	Muscles releveurs de l'anus Muscles coccygiens
	Membrane périnéale	Muscle transverse profond du périnée Ligament triangulaire (membrane périnéale)
Appareil uro-génital	Urètre	Vessie Urètre postérieur et moyen jusqu'à son entrée dans le corps caverneux
	Prostate	Prostate
	Ligaments pubo-prostatiques	Ligaments pubo-prostatiques
	Spongieux	Corps spongieux
	Caverneux	Corps caverneux droit et gauche
Viscères	Rectum	Rectum
Atmosphère péri-viscérale	Graisse et graisse postérieure	Atmosphère péri-prostatique et péri-rectale latérale et postérieure

2. Les traumatismes du bassin et de l'urètre

2.1 Généralités

Les traumatismes de l'urètre postérieur, qui font l'objet de notre travail sont dans le contexte de traumatologie accidentelle (accident de la route, lésion par écrasement…) la conséquence de traumatismes violents[9].

Ils accompagnent le plus souvent un traumatisme du bassin osseux et doivent systématiquement être recherchés dans ce cas.

Leurs conséquences à long terme sont graves car, d'une part le traumatisme peut ne pas être identifié initialement, d'autre part la cicatrisation de l'urètre est souvent difficile et peut s'aggraver de sténoses irréversibles.

Les patients polytraumatisés par accident de la route se présentent le plus souvent lors de la prise en charge médicale pré-hospitalière en état de choc hémorragique.

Ce tableau d'urgence vitale demeure au premier plan et lors de leur prise en charge en réanimation, ils bénéficient systématiquement d'explorations paracliniques en urgence, ainsi que d'une « mise en condition » qui regroupe le plus souvent la pose d'un accès veineux central, d'un monitoring tensionnel et d'une surveillance de la diurèse par cathétérisme urétral (sonde vésicale).

C'est à cette étape de la prise en charge, dominée par la correction de l'urgence hémodynamique, qu'une lésion urétrale passée inaperçue peut être aggravée par ce cathétérisme urétral.

2.2 Traumatismes du bassin

2.2.1 Présentation générale

Les traumatismes du bassin sont dans 9,5 % des cas des traumatismes sévères à graves (pelvic AIS score de 4 ou +) avec une incidence et une gravité au moins comparable chez l'enfant et l'adulte[5].

Ils sont généralement secondaires à des accidents de la voie publique à cinétique violente ou à des chutes de grande hauteur expliquant ainsi la fréquence des lésions associées, tels rencontrés lors des accidents de véhicules 2 roues (scooter contre voiture), ce qui contribue à leur prévalence dans la population adolescente et adulte jeune.

Le pronostic vital étant le plus souvent engagé, la prise en charge de ces patients constitue un véritable défi[6]. En effet, les objectifs de la prise en charge initiale sont de traiter les défaillances cardio-circulatoires et les détresses ventilatoires aigues en réalisant de façon concomitante un bilan lésionnel le plus précis possible. Ceci permettra un accueil et une prise en charge du patient dans la structure hospitalière la plus adaptée et dans les meilleures conditions au sein d'une équipe multidisciplinaire associant réanimateurs, chirurgiens, radiologues et biologistes.

Ils vont être associé à des lésions extra-osseuses abdomino-pelvienne dans 16,5 % des cas, que ce soit des lésions d'organes pleins (11,2 à 11,6 % selon l'âge), d'organe creux (5,3 % enfants, 3,3 % adultes) ou de lésion du tractus uro-génital dans 5,8 % des cas.

Leur mortalité est élevée (de 8 à 20%, et s'élevant à 50 % pour les traumatismes ouverts) [6] de par la perte sanguine abondante associée aux lésions extra-osseuses ce qui justifie d'une prise en charge agressive sur la plan de la réanimation en cas de traumatisme grave.

2.2.2 Mécanismes lésionnels [19]

Remarque préalable : la fermeture des cartilages de croissance en Y du bassin de l'enfant survient entre 12 à 15 ans. A partir de cette date le bassin de l'enfant se comporte comme celui d'un adulte concernant les traumatismes et conséquences lésionnelles. Les mécanismes lésionnels chez l'adolescent dont les cartilages de croissance sont soudés sont identiques à l'adulte.

Plusieurs mécanismes lésionnels ont été décrits :

Mécanisme en compression latérale

Un impact est responsable d'une compression latérale. Il s'agit du mécanisme le plus fréquent, retrouvé dans 50 % des cas.

Les conséquences sont :
En cas de traumatisme faible et haut situé, une fracture isolée de l'aile iliaque ou du cotyle si le choc se fait sur le grand trochanter.
Pour un impact plus important, il existe une rotation interne de l'hémi-bassin avec une lésion antérieure du cadre obturateur homo ou contro-latérale et une lésion postérieure sur l'aile iliaque (fracture de Malgaigne), la sacro iliaque ou l'aileron sacré (fracture de Voillemier).

Ce type de traumatisme s'observe en cas d'impact latéral pouvant impliquer un motocycliste et une voiture [1]

Mécanisme en compression antéro-postérieure

Ils représentent 25 % des cas.

Lorsque l'impact est limité au pubis on observe une fracture d'un ou des deux cadres obturateurs avec éventuellement une lésion de la symphyse (« open book » fracture).

Si l'impact porte sur les ailes iliaques la lésion de la symphyse est habituelle et les hémi-bassins se déplacent en rotation externe entraînant secondairement une lésion sacro-iliaque.

L'exemple typique est le choc frontal entre deux véhicules (voiture contre voiture ou voiture contre scooter ou moto) qui entraine des lésions le plus souvent bilatérales.

Fractures par cisaillement

Elles représentent 5 % des cas rencontrés.

Elles sont classiquement consécutives aux chutes de grande hauteur et entrainent un déplacement du bassin dans le plan vertical associant des lésions antérieures et postérieures très sévères. Le déplacement est souvent important entrainant une instabilité majeure.

Autres mécanismes

Dans les autres cas (20% des cas) il existe une combinaison de ces trois mécanismes principaux à l'origine de pathologies complexes.

Le cas particulier des lésions par roulement (écrasement par roue de voiture) associe un écrasement et un mouvement de latéralisation. Les lésions sont toujours graves réalisant de véritables dislocations du bassin uni ou bilatérales avec fractures instables multiples et graves lésions viscérales.

2.2.3 Classification des traumatismes du bassin

La classification la plus fréquemment utilisée et admise est la classification de Tile : [20]

Il s'agit d'une classification physiopathologique qui prend en compte le siège, le mécanisme et le degré d'instabilité de la fracture[9].

Il existe 3 type (A,B,C) avec des sous types.

Le type A regroupe les fractures qui n'atteignent pas l'anneau pelvien. Il ne s'agit pas de fractures instables, sauf le sous-type A2 3 qui correspond à une fracture des 4 branches ilio-ischio-pubiennes et qui compte tenu de l'importance des lésions osseuses est une fracture instable.

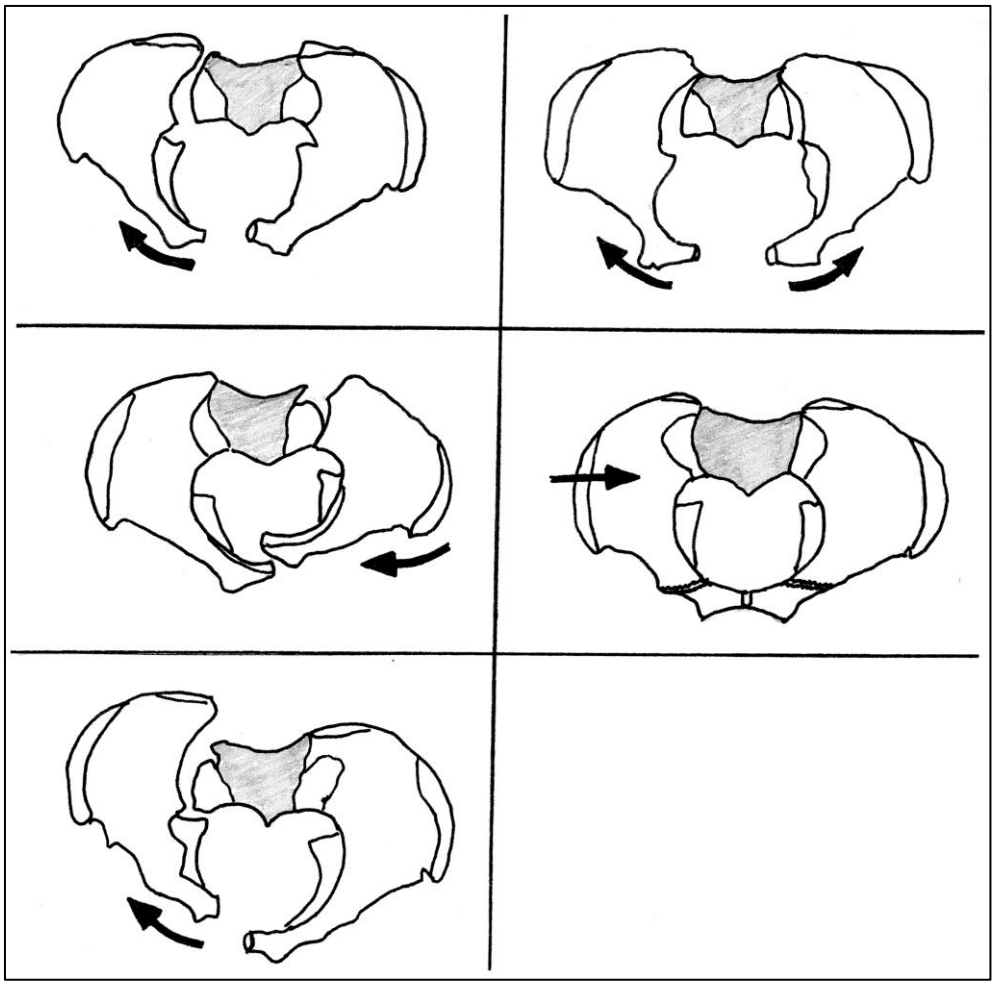
Le type B comprend les fractures avec une instabilité rotatoire ; il comprend les disjonctions symphysaires.

Le type C comprend les fractures avec une instabilité verticale ; il comprend les disjonctions verticales de l'articulation sacro-iliaque.

Tableau 2 : classification de Tile [20]

Type A : Fractures ne touchant pas l'anneau pelvien	**Type B : Instabilité rotatoire**	**Type C : Instabilité verticale**
A1 : fractures avulsions	B1 : lésion unilatérale	C1 : la lésion verticale postérieure est unilatérale
A1.1 de l'épine iliaque antéro-supérieure	B1.1 disjonction symphysaire < 25 mm	C1.1 le trait de fracture postérieur passe dans l'aile iliaque
A1.2 de l'épine iliaque antéro-inférieure	B1.2 disjonction symphysaire > 24 mm	C1.2 le trait de fracture passe dans la sacro-iliaque
A1.3 de l'épine du pubis		C1.3 le trait de fracture passe dans le sacrum
A2	**B2 : unilatérale**	**C2 : déplacement vertical d'un coté et instabilité rotatoire de l'autre**
A2.1 fracture de la crète iliaque	B2.1 les lésions antérieures et postérieures sont homolatérales	C2.1 le trait vertical passe en trans-iliaque
A2.2 fracture des 2 branches ilio-ischio-pubiennes d'un cadre obturateur	B2.2 la lésion postérieure est controlatérale à la lésion antérieure	C 2.2 le trait vertical passe en trans-sacro-iliaque
A2.3 fracture des 4 branches ilio-ischio-pubiennes	B2.3 double lésion antérieure	C2.3 le trait vertical passe dans le sacrum
A3	**B3 : bilatérale**	**C3 : ascension verticale des 2 hemi-bassins**
A3.1 fractures du coccyx ou disjonction sacro-coccygienne	B3.1 ouverture des 2 hémi-bassins	C3.1 les 2 traits verticaux sont extra-sacrés
A3.2 fractures transverses du sacrum non déplacées	B3.2 fermeture d'un coté et ouverture de l'autre	C3.2 un trait vertical est extra-sacré, l'autre intra-sacré
A3.3 fractures transverses du sacrum déplacées	B3.3 fermeture des 2 hémi-bassins	C3.3 les 2 traits verticaux sont trans-sacrés

Figure 8 : mécanismes dans la classification de Tile [20] (A ligne du haut - B seconde ligne - C ligne du bas)



2.2.4 Complications et lésions associées d'un traumatisme du bassin

Les complications d'une fracture du bassin sont nombreuses.

On distingue :

Les complications vasculaires à type de plaie vasculaire (artérielles (artère hypogastrique) ou plexus veineux) avec ou sans ischémie aigue, de compressions artérielles, d'hématome rétropéritonéal.

Les complications urinaires qui peuvent concerner la vessie (à type de rupture vésicale) et/ou l'urètre. Les complications urétrales des traumatismes du bassin font l'objet du paragraphe 2.3 – traumatismes de l'urètre postérieur)

Les complications nerveuses à type de paralysie sciatique (tronculaire ou radiculaire), d'atteinte mixtes des nerfs sciatiques poplité interne et externe (graves), d'atteinte du nerf obturateur.

Les complications thrombo-emboliques par stase au niveau du réseau veineux pelvien.

Les complications viscérales telles que les lésions ano-rectales, graves car présentant un risque septique majeur. Ces lésions s'accompagnent parfois de fractures du sacrum et se manifestent par une rectorragie, un pneumopéritoine ou un emphysème sous cutané ou rétropéritonéal.

2.2.5 Prise en charge diagnostique et thérapeutique [6]

Stratégie pré-hospitalière :

En plus du contrôle des fonctions vitales (voies aériennes, monitoring cardio-tensionnel, collier cervical) il est totalement proscrit d'effectuer en pré-hospitalier un sondage vésical.

Le patient doit être transporté en coquille (contention orthopédique par planche d'immobilisation) et en cas d'instabilité hémodynamique un pantalon antichoc peut être mis en place. Selon la gravité le patient doit être orienté vers un centre disposant d'une possibilité d'effectuer un geste de radiologie interventionnelle.

Stratégie hospitalière :

A l'arrivée à l'hôpital, le défi relevé par l'équipe d'accueil est d'obtenir un bilan lésionnel précis tout en réalisant les manœuvres nécessaires à la survie et/ou à la stabilisation du malade. Cette première phase est importante et doit répondre à un impératif de rapidité (20 à 30 mn) pour ne pas retarder le traitement étiologique des états de choc hémorragique et permettre sa stratification des priorités thérapeutiques.

Bilan clinique :

Il comprend l'évaluation de la ventilation, de l'état de conscience et de l'état hémodynamique.

Les signes cliniques de fracture du bassin sont importants à rechercher chez un malade éveillé. L'absence de douleur et de mobilité du bassin peuvent infirmer le diagnostic de traumatisme du bassin.

Cependant, l'examen clinique n'est pas suffisant chez un malade inconscient et/ou sédaté, hyperalgique ou en état de choc. Dans ce contexte, les touchers pelviens sont indispensables à la recherche d'arguments pour une ouverture de la fracture du bassin dans la filière génitale ou dans le rectum.

Une hématurie est peu spécifique chez le polytraumatisé, mais son association à une rétention aigue d'urine oriente vers une lésion de l'urètre membraneux.

La pose d'une sonde urinaire est alors contre-indiquée, et nécessite un avis spécialisé ou à défaut, la pose d'un catheter sus-pubien. (cf supra)

Bilan radiologique :

Les 4 examens radiologiques suivants sont indispensables au débrouillage initial et doivent être réalisés en urgence sans déplacer le patient : ce sont la radiographie du thorax de face, la radiographie du bassin de face, la radiographie du rachis cervical de profil et une échographie abdominale.

Ces 4 examens doivent permettre de répondre rapidement aux questions suivantes : existe-t-il une fracture ou une luxation instable du rachis cervical, y a-t-il un hémo-ou pneumothorax, un élargissement du médiastin, un épanchement intrapéritonéal et de quelle abondance, une fracture du bassin.

Algorithme décisionnel

Selon la stabilité du patient, le bilan va être poursuivi ou le patient va devoir d'emblée bénéficier d'une prise en charge thérapeutique (chirurgie et/ou embolisation).

Moyens thérapeutiques

Embolisation artérielle :

L'embolisation au cours de l'artériographie artérielle est un moyen sûr et efficace d'arrêter un saignement pelvien. L'embolisation peut être efficace lors d'un saignement d'origine artérielle ou veineux, avec des résultats de taux d'hémostase de près de 100%

Contention :

Pantalon antichoc : ce système qui a pour but de minimiser un saignement par une contention externe des lésions anatomiques ne doit être retiré que chez un patient en salle d'embolisation ou au bloc opératoire compte tenu du risque de décompensation hémodynamique à l'ablation.

Fixateur externe :

Il n'a d'intérêt qu'en cas de fracture déplacée du bassin.

A la phase aigüe, il peut contribuer à l'hémostase du bassin en diminuant légèrement la compliance de l'espace rétropéritonéal mais présente des risques à long terme (infection..)

Les clamps pelviens qui reposent sur le même principe peuvent en salle d'urgence permettre une action hémostatique similaire.

Hémostase chirurgicale :

L'hémostase chirurgicale des hémorragies rétropéritonéales est délicate et très risquée. En effet, l'ouverture du seul rétropéritoine antérieur décomprime l'espace rétropéritonéal qui est le siège d'un volumineux hématome sous tension en partie « contrôlé » par tamponnement.

En cas de saignement veineux ou diffus, le tamponnement par champ opératoire constitue un geste de sauvetage.

Les lésions de type « bassin ouvert » sont définies comme l'existence d'une communication directe entre le foyer de fracture et la peau, le vagin, le rectum, le périnée. La mortalité de cette pathologie est augmentée par rapport aux traumatismes fermés par choc hémorragiques initialement d'autant plus qu'il y a ouverture de l'espace rétropéritoneal et par les complications septiques secondairement. Dans ce cadre, une exploration chirurgicale est souvent nécessaire.

2.2.6 Conclusion sur les traumatismes du bassin

Les traumatismes du bassin sont des lésions très sévères qui peuvent engendrer un pronostic vital immédiat et une morbidité élevée à long terme.

Leur gravité justifie d'une prise en charge en urgence, standardisée, par des équipes multidisciplinaires. Leur prise en charge est complexe, dominée par le risque immédiat de choc hémorragique. Dans ce contexte thérapeutique, le patient bénéficie d'une mise en condition lourde incluant un suivi de la diurèse par un cathétérisme vésical. L'identification à la phase initiale du traumatisme d'une lésion non vitale (de type lésion de l'urètre) est difficile pour le clinicien en charge du patient. Ce type de lésion pouvant passer inaperçue et être aggravée par un geste iatrogène.

2.3 Les traumatismes de l'urètre postérieur

2.3.1 Epidémiologie

Les données épidémiologiques disponibles reposent sur des études rétrospectives monocentriques. Peu d'études avec une cohorte suffisante sont actuellement disponibles.

Koraitim et al. [21] dans une étude sur 203 patients masculins adultes présentant un traumatisme du bassin identifient dans 19 % des cas un traumatisme urétral, dans 2,5% des cas un traumatisme vésical et dans 6% des cas une atteinte combinée urétrale et vésicale.

Parmi les lésions urétrales, il s'agissait d'une rupture urétrale complète une fois sur 2, d'une rupture urétrale partielle une fois sur 4 et d'un étirement sans rupture une fois sur 4.

Paparel et al.[9] dans une étude sur 73 patients adultes masculins porteurs de traumatismes instables du bassin identifient 12,5 % de lésions urinaires associées, soit 7% de complications urétrales (rupture de l'urètre membraneux).

Ainsi, selon les différentes études, 5 à 25 % des hommes avec une fracture du bassin ont une lésion de l'urètre postérieur[7,9,21].

Dans la population adolescente, ces chiffres seraient plus élevés compte tenu des mécanismes de fixation de l'urètre postérieur mais aucune étude n'évalue la prévalence spécifique dans cette tranche d'âge[22].

2.3.2 Mécanismes lésionnels

Généralités

Le traumatisme urétral est dit antérieur lorsqu'il est distal par rapport au diaphragme uro-génital, et postérieur s'il atteint le diaphragme uro-génital.

Les traumatismes de l'urètre postérieur peuvent résulter de lésions directes ou indirectes, en rapport avec l'existence de parties fixes et mobiles au niveau de l'urètre postérieur et de l'apparition d'un conflit anatomique entre ces différents segments.

Plusieurs études anatomo-cliniques ont cherchées par une analyse rétrospective des cas rencontrés à mettre en évidence ces mécanismes.

Etude de la littérature selon la classification de Tile[20] sur les traumatismes du bassin

Plusieurs travaux visent à analyser les mécanismes responsables de lésions de l'urètre postérieur et/ou de la vessie selon le type de traumatisme du bassin.

Lors d'une étude rétrospective sur 73 cas de fracture instable du bassin, Paparel et coll. [9] mettent en évidence 12 cas de traumatismes urinaires concernant la vessie et/ou l'urètre.

Ils identifient notamment qu'en cas de lésion de type B1, la disjonction symphysaire va avoir tendance à ouvrir le bassin ce qui aura pour conséquence de déchirer l'aponévrose pelvienne et de léser l'urètre membraneux par un mécanisme de distraction.

Ce d'autant plus que la disjonction symphysaire observée sur une radiographie du bassin n'est pas toujours le reflet de l'écart inter-pubien maximal de l'accident. Une rupture de vessie ou de l'urètre peut donc s'observer avec une disjonction symphysaire mineure à la radiographie.

Andrich et coll.[7] identifient la fréquence des lésions et les mécanismes suivants :

Pour les lésions de type Tile A une fréquence nulle de lésions de l'arbre urinaire.

Pour les lésions de type Tile B1, il existe dans leur série 25 % de lésion urinaire. Les mécanismes évoqués sont une lacération urétrale partielle à la jonction bulbo-membraneuse. Il existe lors de l'ouverture de l'anneau pelvien antérieur une rupture de la symphyse avec rupture du ligament pubo-prostatique ipsilateral. Selon la solidité et le déplacement de la membrane périnéale, une rupture urétrale peut survenir.

Pour les lésions de type Tile B2, ils identifient 40 % de lésion urinaire. Les mécanismes évoqués sont en rapport avec un fragment osseux qui va jouer le rôle de guillotine qui va soit lacérer soit rompre totalement l'urètre à la jonction bulbo-membraneuse, soit engendrer une lésion de celui-ci[23].

Pour les lésions de type C, ils identifient 32 % de lésion urinaire. Le mécanisme évoqué est un déplacement du ligament pubo-prostatique et de la membrane périnéale du côté de l'hémi-pelvis concerné ce qui peut engendrer une rupture des ligaments controlatéraux. Si les ligaments pubo-prostatiques sont rompus alors que la membrane périnéale est intacte, cela peut engendrer une rupture de l'urètre à la jonction bulbo-prostatique (lésion en traction-distraction).

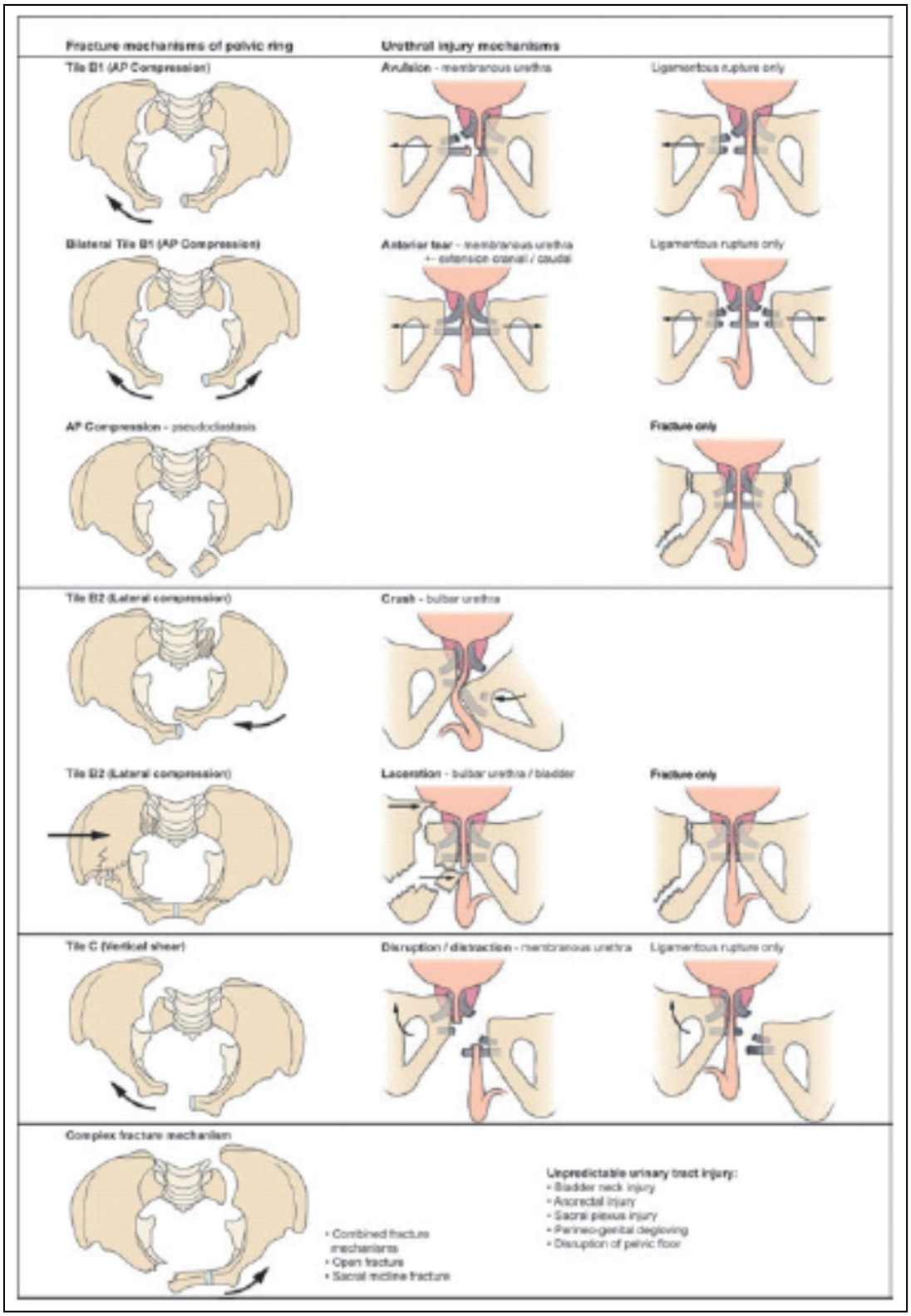
Enfin, il a été décrit dans de rares cas des lésions urétrales en cas de fractures de type A2 A3 liées à un déplacement postéro-inférieur du segment fracturé qui va sectionner l'urètre comme une guillotine[24].

L'ensemble de ces lésions ainsi que les mécanismes lésionnels rencontrés sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3 : lésions urétrales constatées selon la classification de Tile

Classification	Description	Mécanisme	Conséquences sur l'urètre postérieur
B1	Impact antéro-postérieur avec compression antéro-postérieure. « open-book fracture «	Distraction	Lacération urétrale à la jonction bulbo-membraneuse.
B2	Impact latéral	Impact direct par fragment osseux ou écrasement	Impact direct par fragment osseux. Ecrasement de l'urètre bulbaire
C	Impact vertical Ascension d'un ½ bassin sur l'autre (fractures avec instabilité verticale)	Traction-distraction	Cisaillement à la jonction urètre prostatique – urètre membraneux
A2 A3	Déplacement postéro-inférieur des branches fracturées	Impact direct par fragment osseux	Impact direct par fragment osseux

Figure 9 : mécanismes des lésions urétrales / classification de Tile[7]



2.3.3 Présentation clinique

Il existe une association de trois signes souvent peu marqués ou au second plan dans le contexte de patient polytraumatisé :

- Une urétrorragie (sang en dehors des mictions) qui est présente dans 50 % des cas.
- Une rétention urinaire aigue.
- Un hématome périnéal en ailes de papillon qui signe la rupture du diaphragme uro-génital.

Au toucher rectal (systématique), il existe une ascension (en cas de rupture complète de l'urètre) du bloc pubo-prostatique avec palpation d'une masse rénitente (uro-hématome) à la place de la prostate.

2.3.4 Diagnostic d'un traumatisme urétral

Le diagnostic si il est suspecté cliniquement peut être confirmé de 2 manière :

Soit par la réalisation d'une opacification de l'urètre via la vessie (urétro-cystographie par cathétérisme sus pubien) qui visualisera la fuite de produit de contraste, la perte de continuité urétrale et permettra d'établir une classification du traumatisme

Soit par la réalisation d'une endoscopie urétrale prudente qui pourra visualiser la lésion et éventuellement effectuer un geste à visée thérapeutique.

2.3.5 Classifications des traumatismes de l'urètre postérieur

Cette classification est basée sur l'urétrocystographie rétrograde réalisée lors de traumatisme :

La classification la plus communément employée est celle de Colapinto et McCallum [25] :

Type I : étirement de l'urètre sans rupture.

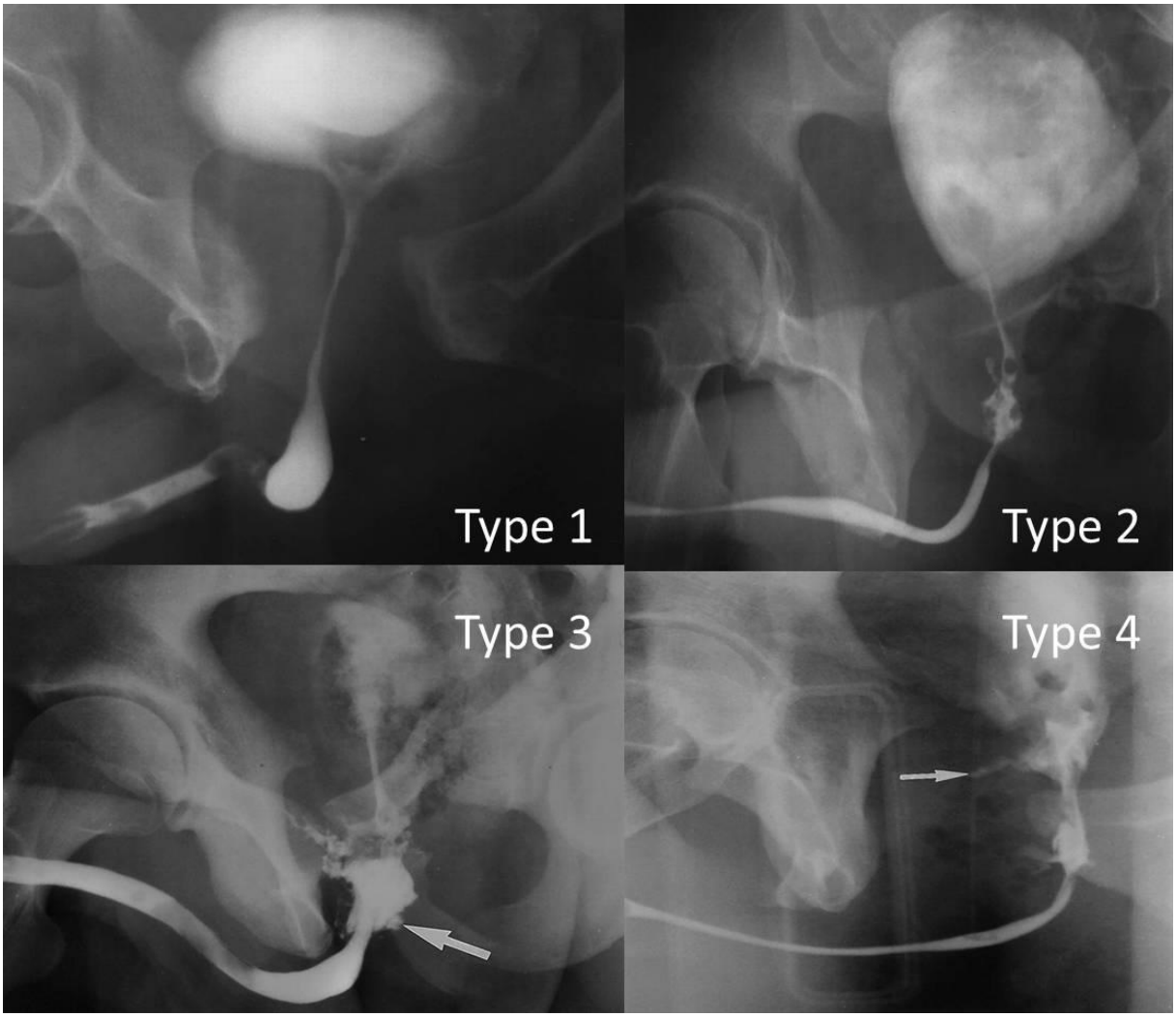
Type II : rupture de l'urètre membraneux au-dessus du diaphragme uro-génital. L'extravasation du produit de contraste est limitée au-dessus du diaphragme uro-génital.

Type III : rupture de l'urètre membraneux et du fascia uro-génital. Le produit de contraste fuse dans le périnée.

Cette classification a été modifiée par Goldman[26] avec l'ajout d'un type IV :

Type IV : atteinte du col vésical

Figure 10 : classification radiologique des traumatismes de l'urètre postérieur



2.3.6 Principes de la prise en charge thérapeutique

Les principes de la prise en charge sont doubles :

A la phase initiale du traumatisme et jusqu'à cicatrisation, il faut permettre un écoulement normal des urines.

Dans ce but, soit une dérivation en amont de la lésion est réalisée (drainage vésical sus-pubien par cathéter sus-pubien), soit l'on cherche d'emblée à mettre en place une sonde urétrale.

Si un geste urétral à la phase initiale du traumatisme est indiqué, il doit être réalisé par endoscopie sous contrôle visuel, son but étant de réaligner les 2 portions de l'urètre lésé.

Toute manœuvre urétrale réalisée à l'aveugle fait par contre courir le risque d'aggraver une lésion pré-existante ou de créer un faux trajet.

Une fois la phase aigüe passée, la réparation urétrale peut être obtenue soit par cicatrisation dirigée sur sonde[27], soit par abord chirurgical direct (plus ou moins réalisable selon le siège de la lésion). Ce second type d'approche demeure difficile dans les lésions importantes avec présence d'hématome périnéal associé.

Parmi les conséquences à long terme des traumatismes de l'urètre, les sténoses peuvent être accessibles à un traitement (urétrotomie endoscopique) de même que les incontinences (par l'utilisation de sphincter artificiel) mais restent difficile à traiter.

2.3.7 Conséquences des traumatismes de l'urètre postérieur

Dans la population adulte

Quel que soit le mode de réparation (réalignement endoscopique sur sonde, réparation d'emblée ou différée), les traumatismes de l'urètre ont 3 conséquences :

- La sténose urétrale (entre 50 à 100 % des cas[15])
- L'incontinence (entre 5 et 12 % des cas[15])
- L'impuissance (entre 19 et 22 %[15])

Les % de ces conséquences sont variables selon le type initial de traumatisme et le mode de correction du traumatisme.

Dans la population pédiatrique

Les données de la littérature sont peu nombreuses à ce sujet. Nous résumons ici les résultats de l'étude de Onen A et al[28] sur les conséquences à long terme (> 12 ans) d'un traumatisme de l'urètre chez l'enfant.

Il s'agit d'une étude rétrospective de 49 garçons sur une période de 14 ans chez qui la continuité urétrale a été rétablie dans 97 %. A l'issue du suivi,

- 22 % des patients présentaient une sténose
- 16 % ont présentaient une incontinence
- 18 % présentaient des troubles de l'érection

43% des patients présentaient des troubles psychiques à long terme (probablement en rapport à l'âge des patients (8 ans d'âge moyen dans la série) lors du traumatisme initial)

Plus récemment, Aggarwal et al. [29] ont présenté les résultats de la prise en charge de sténoses urétrales post-traumatiques (35 cas sur 18 ans d'expérience). Au prix d'une prise en charge complexe, une correction de la sténose a pu être obtenue dans 22 cas sur 23

sténoses initiales. Par contre la prise en charge de sténose récidivante demeure beaucoup plus complexe avec l'impossibilité de corriger les lésions urétrales dans 50 % des cas.

2.3.8 Conclusion sur les traumatismes de l'urètre postérieur

Les traumatismes de l'urètre postérieur sont la résultante d'un conflit anatomique entre les différentes zones de fixation de l'urètre postérieur. Ces lésions sont difficiles à diagnostiquer à fortiori dans un contexte de patient traumatisé.

Ces lésions sont sévères et ont une morbidité très élevée à type de sténose, d'incontinence ou d'impuissance que ce soit dans la population adulte ou pédiatrique.

Leur méconnaissance peut être responsable d'une aggravation des lésions en cas de geste urétral fait à l'aveugle.

Leur prise en charge est complexe avec dans certains cas la nécessité de traitement palliatif définitif (dérivations définitives, sphincters artificiels).

3. Modèles numériques existants

Plusieurs modèles numériques concernant la région étudiée ont été développés. Ceux-ci reposent sur une analyse de l'anatomie et des propriétés biomécaniques des structures analysées. Toutefois, aucun d'entre eux ne réunit toutes les caractéristiques (structures anatomiques concernées et/ou propriétés biomécaniques pour chaque tissu concerné) pour être exploitable dans notre problématique.

On distingue schématiquement des modèles dont l'application est avant tout anatomique, de ceux s'intéressant à la traumatologie de certaines zones spécifiques.

3.1 Modèles à visée anatomique

3.1.1Travaux de Uhl et al. [30]

En se basant sur les données anatomiques du « visible Korean Human », l'équipe de Ulh et al. propose en 2006 une reconstruction en trois dimensions du tractus urogénital masculin.

Le modèle présenté inclus 42 structures anatomiques provenant de 440 coupes (distantes de 1 mm).

Le sujet étudié était un sujet de 33 ans, exempt de pathologies ou de malformations du tractus uro-génital, aux caractéristiques morphologique suivantes : 1 m 64 pour 55 kg.

A partir de coupes anatomiques un modèle vectoriel en 3 dimensions a été réalisé.

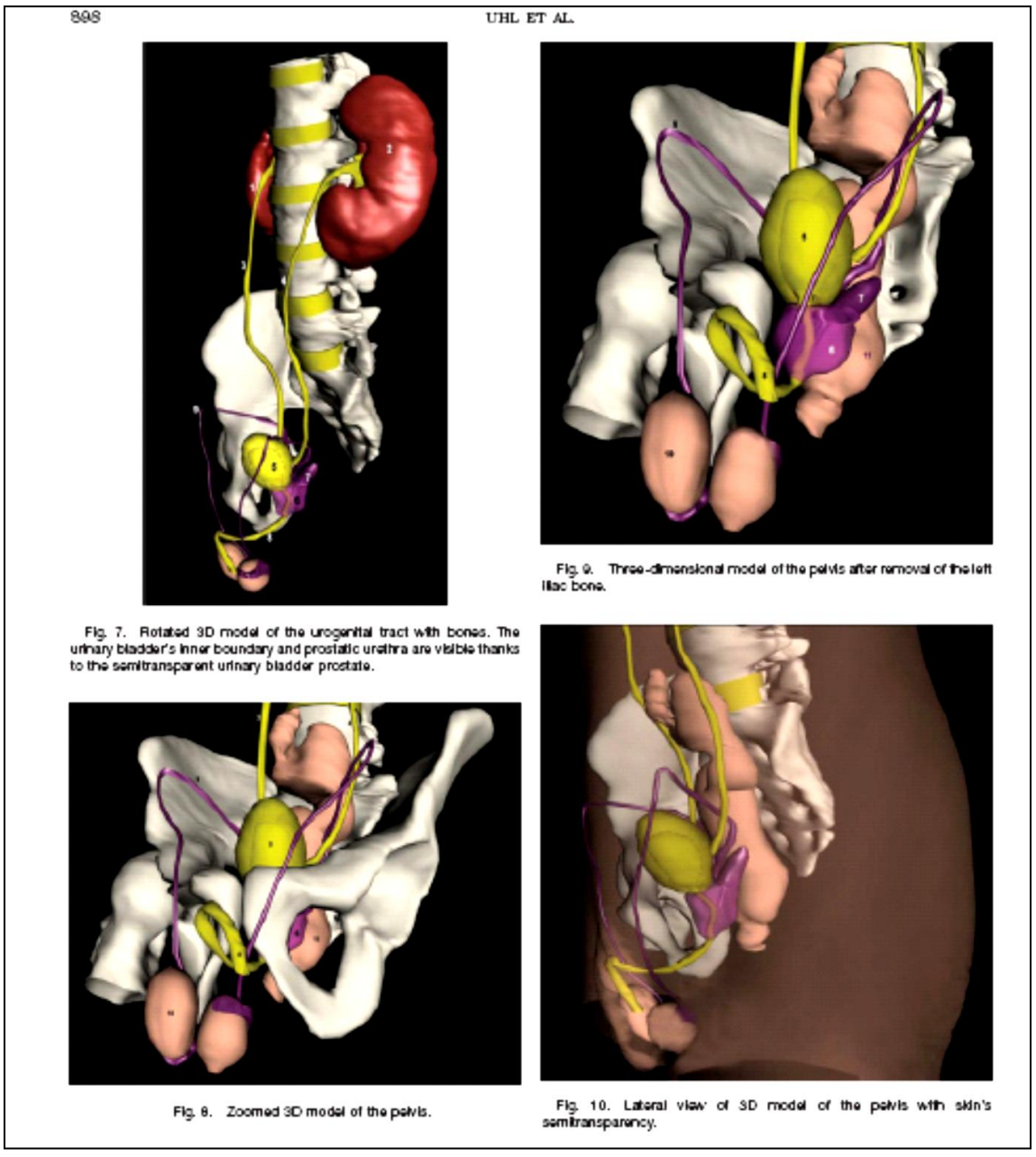
Le mode de détourage était soit semi-automatique (logiciel Adobe Photoshop version 7) pour les structures anatomiques suivantes : reins, vessie (limites externes), aorte abdominale, vertèbres lombaires, sacrum, bassin osseux, fémurs, peau, soit manuel pour les structures suivantes : uretères, vessie (paroi interne), urètre, testicules, épididymes, canaux déférents, vésicules séminales, prostate, rectum, canal anal, artère mésentérique supérieure, veine cave inférieure, veines rénales, disques intervertébraux.

La segmentation et la reconstruction 3D était effectuée grâce aux logiciels : SURFdriver (PC version 3.56) sur système Windows 2000.

Limites du modèle : ce modèle a été créé dans un but pédagogique. Ses limites d'application dans notre travail résident sur le fait qu'il n'y ait pas eu de reconstruction des structures musculaires périnéale, notamment des muscles du plancher périnéal. D'autre part ce modèle était purement descriptif (description anatomique) et les différentes propriétés

biomécaniques des tissus n'étaient pas appliquées dans un but de mise en application du modèle.

Figure 11 : modèle de Uhl et al.



3.1.2 modèle de Brooks [31]

Il s'agit d'un modèle incluant 18 structures anatomiques incluant les structures musculaires (muscle levator ani et le sphincter urétral strié).

La reconstruction a été réalisée à partir d'un sujet de sexe masculin de 39 ans sans antécédents urologiques particuliers en dehors d'une absence de testicule droit.

Les reconstructions ont été réalisées à partir de 132 coupes consécutives espacées de 1 mm. Les images pour faciliter leur traitement étaient réduites sans toucher aux structures analysées (passage de 2,048*1,216 pixels à 1,440*1,080 pixels) (logiciel DeBabelizer 1.6.5 (Equilibrium, Sausalito, California, USA) sur ordinateur Macintosh Quadra800AV)

Les images étaient alors importées sur le logiciel Adobe Photoshop 3.0 et segmentées en 18 structures anatomiques différentes :

Muscle levator ani, muscle strié du sphincter urétral externe, muscle lisse du sphincter urétral externe, muscle recto-uretral, muscle transverse profond du périnée, muscle transverse superficiel du périnée, muscle bulbo-spongieux, muscle ischio-caverneux, rectum, uretères, vessie, trigone, tissus glandulaire prostatique, stroma fibromusculaire antérieur de la prostate, canaux éjaculateurs, urètre, membrane périnéale.Le contourage des structures anatomiques était manuel (réalisation de courbes Brezier). Le contourage des structures anatomiques suivantes : col vésical, stroma fibromusculaire antérieur de la prostate, muscles lisses et strié du sphincter urétral externe était vérifié par comparaison avec des coupes anatomiques de référence (avec marquage hematoxilin et eosine).

L'identification et la conception des structures anatomiques utilisaient les logiciels suivants : EAI I-curve, VisModel ATD (sur un ordinateur IndyR5000), EAI Surf.

Figure 12 : modèle de Brooks

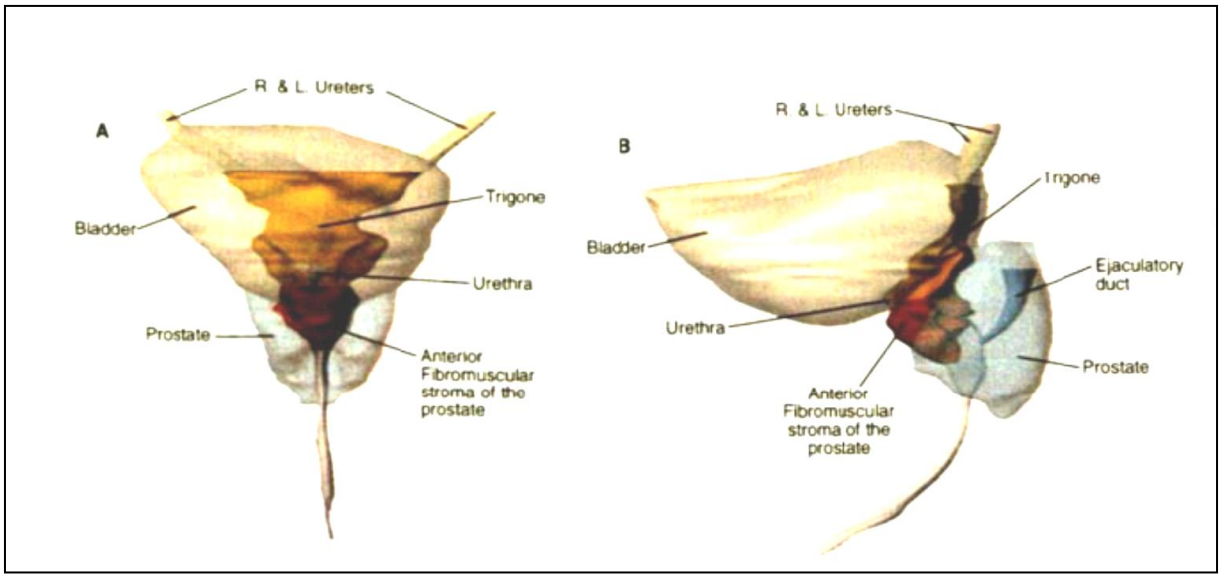
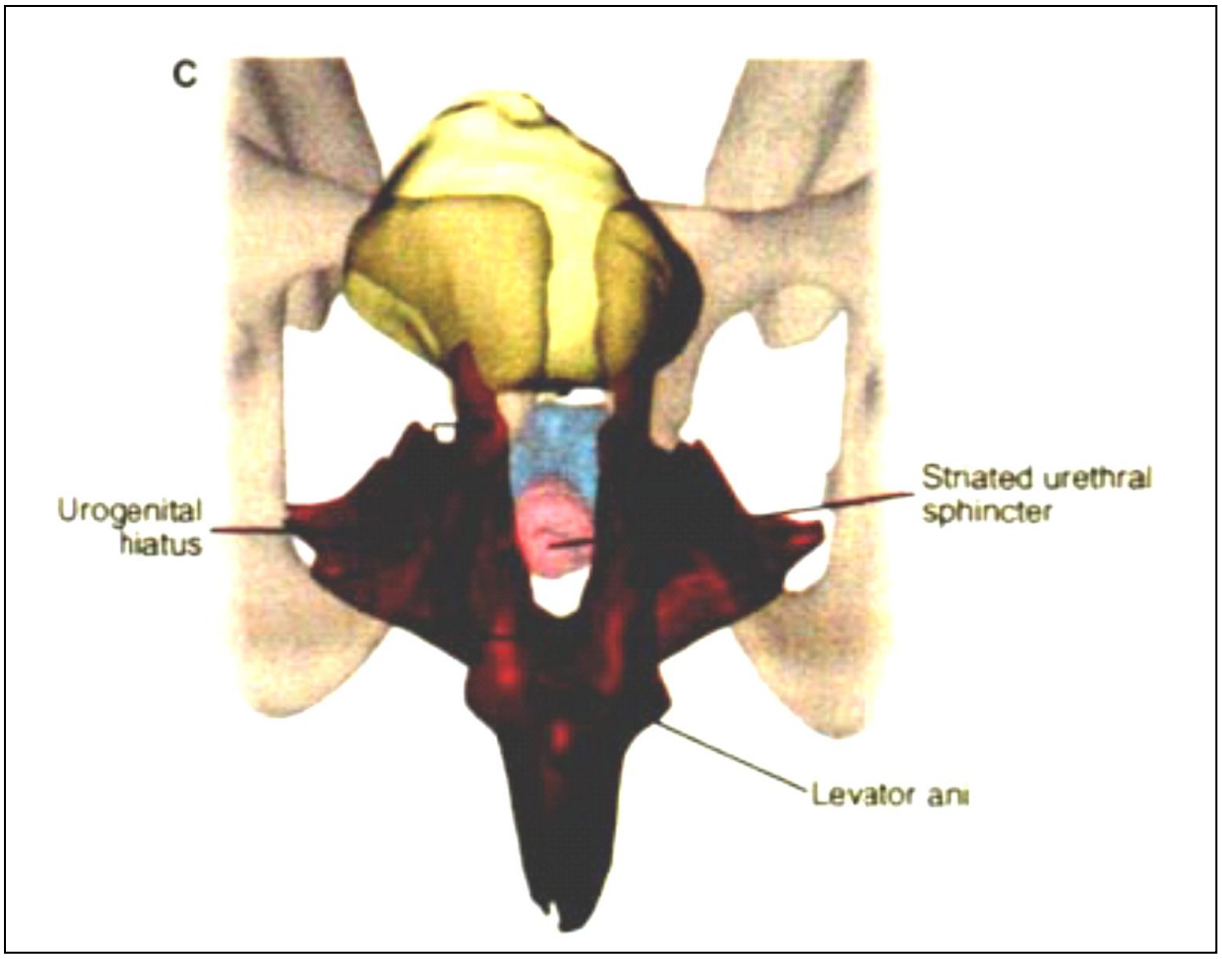


Figure 13 : modèle de Brooks avec cadre osseux



Cette reconstruction présente un intérêt majeur dans la connaissance des rapports anatomiques entre urètre, vessie, prostate et muscles du plancher périnéal. Elle a été développée dans un but pédagogique.

Limite du modèle : ce modèle, même s'il reconstruit toutes les structures impliquées dans les traumatismes de l'urètre postérieur associés aux traumatismes du bassin, est purement anatomique et n'incluse pas de propriétés biomécaniques propres aux structures. En ce sens il ne peut être exploité pour recréer des mécanismes lésionnels.

3.1.3 Modèle de Venuti [32]

Ce modèle a été élaboré dans un but d'enseignement d'anatomie chirurgicale, à partir du concept développé par l'université de Columbia « 3D Vesalius trademark Visualiser ».

Figure 14 : modèle de Ventuni

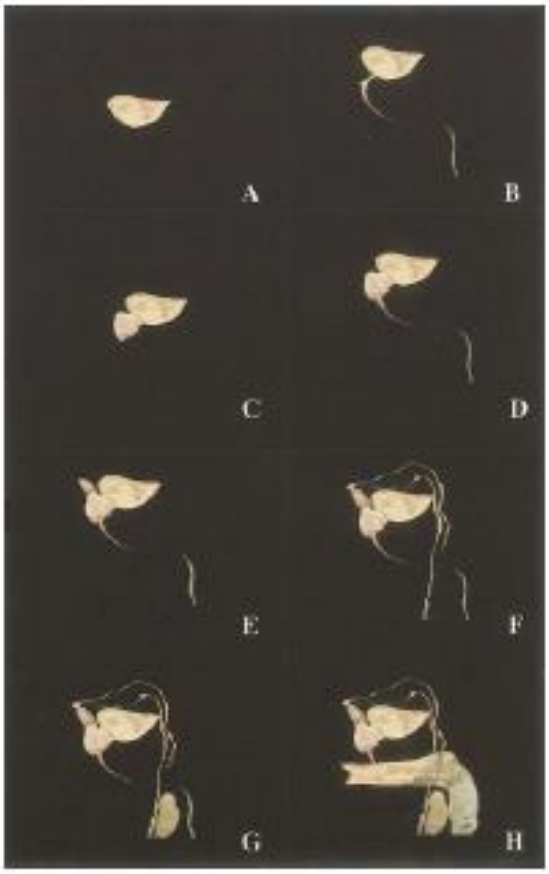


Fig. 5. Lateral views of the urinary bladder in isolation and with the successive addition of other urogenital structures. A: The isolated urinary bladder. B: Addition of the urethra to (A). C: Addition of the prostate gland to (A). D: Addition of both the urethra and prostate gland to (A). E: Addition of the seminal vesicle to (D). F: Addition of the vas deferens to (E). G: Addition of the epididymis and testes to (F). H: Addition of the penis to (G). Note that the inferior most portion of the testis and glans penis terminate abruptly. This is due to a loss of sections from this region as a consequence of transecting the VH male cadaver before cryopreservation.

Limites du modèle : comme les précédents travaux présentés ce modèle n'inclue aucune propriété biomécanique des tissus et ainsi ne peut être exploitable pour notre problématique.

3.2 Modèles dynamiques

3.2.1 Modélisation corps entier

Plusieurs modèles sont existants, dont les applications reposent principalement sur les mécanismes connus en accidentologie et en traumatologie osseuse ou pariétale. Nous pouvons dans ce domaine citer les modèles HUMOS (Human Model for Safety), H-model, WSU human models (Université Wayne State), THUMS (Total HUman Model for Safety) [33-34].

L'élaboration de l'ensemble de ces travaux repose plus sur l'analyse du comportement du corps entier lors de situations traumatiques que sur une analyse de lésions organiques spécifiques. Ainsi, pour chacun d'entre eux, la problématique spécifique du comportement de la région du périnée antérieur, et des relations entre urètre et cadre osseux n'ont pas fait l'objet du travail de recherche.

Même si les expériences en conception et en modélisation de corps entier (modèle HUMOS[33]) nous ont permis une plus grande précision dans l'élaboration de notre modèle, nous n'avons pas pu directement exploiter ces travaux, en dehors de la mise en application très spécifique (impact scooter/voiture recrée lors de la mise en application de notre modèle) pour laquelle nous avons utilisé un segment (parties molles de la hanche) du modèle HUMOS.

3.2.2 Modèles s'intéressant à une région anatomique précise

Plusieurs travaux portent sur des régions anatomiques limitées, que ce soit la région abdomino-pelvienne [35], l'os coxal [36-37] sont disponibles.

Parmi ceux-ci, le modèle réalisé par Labe [35] sur l'étude des mécanismes lésionnels de la région abdomino-pelvienne présente un intérêt particulier.

Le modèle est basé sur l'analyse d'un patient de sexe masculin d'une trentaine d'années, dont les mensurations (poids / taille) correspondent au 50ème percentile.

Ce travail a eu pour but de reconstruire la région abdominale et pelvienne qui associe des structures de comportement biomécanique très variables (structures osseuses, musculaires, organes pleins et creux) afin d'analyser au mieux les phénomènes traumatiques en accidentologie routière.

Dans ces travaux, la géométrie du modèle s'est basée sur une technique d'analyse semi-automatique d'image scanner permettant une reconstruction 3D, permettant d'obtenir un modèle de plus de 2 millions d'éléments.

Les données mécaniques proviennent de la littérature et d'essais expérimentaux.

Une part importante de ce travail a reposé sur l'analyse des déformations osseuses dans les traumatismes du bassin.

Intérêt du modèle de Labe [35] :

Il est par certains aspects proche de notre problématique (précision des structures et du maillage, analyse des propriétés biomécaniques des tissus, validation du modèle) ce qui nous a autorisé à extrapoler certains des éléments de ce travail (propriétés biomécaniques des tissus, loi matériaux appliquées, épaisseur de l'os cortical coxal) pour la conception et la validation de notre modèle.

Figure 15 : modèle de Labe

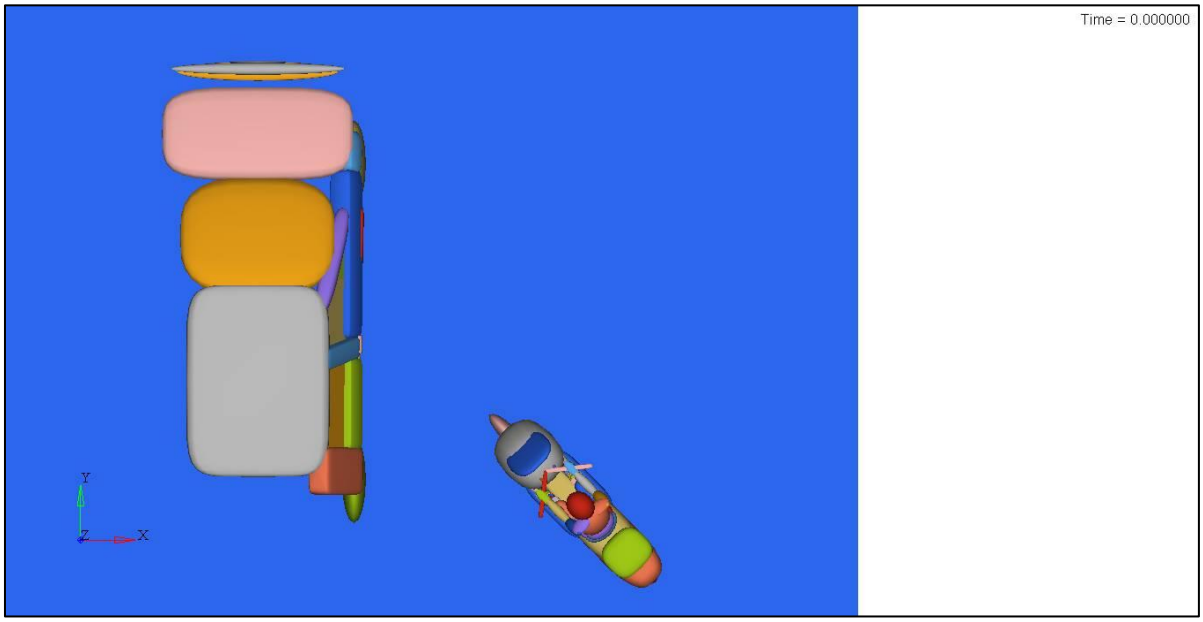
3.2.3 Modèles recréant une circonstance traumatique précise

Plusieurs travaux ont été réalisé sur des situations traumatiques particulières afin d'analyser le comportement du corps entier ou de zones anatomiques précises [13,38]

L'intérêt de ces travaux repose sur la description très précise des conditions cinématiques des traumatismes (force exercées, directions, zones d'impact).

C'est le cas des travaux de Serre et al.[39] qui ont recrée en modélisation multicorps une situation traumatique réelle mettant en jeu un accident de la voie publique entre un scooter et une voiture : impact entre un scooter de type Joyride SYM* et un véhicule léger (Renault Mégane) à une vitesse de 50 km/h, par un angle d'impact de 45 °.

Figure 16 : impact scooter - voiture (travaux de Serre et al.)



Ces travaux nous ont permis d'exploiter les paramètres cinétiques identifiés (vitesse, angle et zone d'impact, force appliquée) et de les appliquer à notre problématique de recherche.

3.3 Conclusions sur les modèles existants

Plusieurs types de modèles informatiques sont disponibles, certains étant spécifiques de la région anatomique nous concernant mais purement descriptifs, d'autres étant dynamiques mais non spécifiques et avec une définition insuffisamment précise pour analyser les traumatismes de l'urètre.

Cependant aucun d'entre eux ne concerne un sujet adolescent.

Les travaux de Labe[35] s'approchent de notre problématiques et présentent un intérêt dans leur validation et l'établissement des propriétés biodynamiques et des lois matériaux des

tissus concernés mais la définition des structures du périnée antérieur n'est pas suffisamment précise.

Les travaux de Serre et al.[39] recréant un accident de la voie publique ont pu être extrapolés pour une mise en application de notre modèle.

Partie II : Modèle. Conception

Remarque préalable :

Compte tenu de la contrainte imposée par notre problématique, nous avons élaboré un modèle suffisamment précis pour permettre de distinguer les zones anatomiques et les structures impliquées dans la genèse des traumatismes de l'urètre, mais dont la taille des éléments autorise toutefois une mise en application réalisable en termes de temps de calculs.
L'élaboration du modèle a été basée sur une connaissance anatomique et physiologique connue sur les traumatismes du bassin et de l'urètre, sur l'expérience du laboratoire en terme de modélisation, par l'utilisation de logiciels internes et du logiciel HyperMesh* 9.0 (Altair France©) pour la génération des contours et la reconstruction 3D, et du logiciel Radioss* 4.4 (Altair France©) pour la mise en donnée et la simulation numérique.

1. Sujet choisi

Nous avons élaboré notre modèle anatomique à partir des données d'imagerie d'un sujet de sexe masculin âgé de 15 ans 9 mois, indemne de pathologie urinaire connue et d'antécédents de cathétérisme urinaire.

Le sujet mesurait 1m 68 pour 45 kg. Selon les courbes de croissance ce sujet était dans la norme (entre -10 et +10 percentile) concernant la taille, et entre le 3ème et le 25ème percentile pour le poids. Son indice de masse corporelle était de 16 ce qui correspond selon les courbes au 3ème percentile.

Le choix du morphotype du patient répond à un impératif d'obtenir un sujet maigre chez qui l'urètre est particulièrement exposé aux traumatismes, devant la diminution de la masse graisseuse.

2. Technique d'acquisition de la géométrie et génération du maillage

2.1 Géométrie

Les structures anatomiques concernées ont été reconstruites selon une méthode de segmentation d'images tomodensitométriques (scanner réalisé avec injection intraveineuse de produit de contraste).

La technique de scanner permet une exploitation précise de nombreux organes et structures anatomiques de densité proche. Les images obtenues sont représentatives de l'atténuation

du faisceau de rayons X qui est proportionnelle à l'épaisseur et à la densité des tissus traversés. Le principe de cette technique est de choisir un plan de coupe et d'effectuer de multiples projections pour connaitre le coefficient d'atténuation en chaque point.

Selon la densité, les structures apparaissent de très blanches (structures osseuses) à noire (air) avec des niveaux de gris différents[40] .

Il est possible d'adapter les images afin d'améliorer la détection de zones anatomiques de densité relativement proches, même si la caractérisation de structures fines ou de densité peu spécifique (faisceau musculaire au sein d'un groupe de muscle…) peut être difficile.

En ce sens lors de l'acquisition de la géométrie nous avons délibérément regroupé certaines structures afin de créer une zone à fonctionnalité et propriétés mécaniques identiques.

Concernant notre modèle, une tomodensiométrie abdomino-pelvienne multibarette en coupes jointives de 0,9 mm a été obtenue. 261 coupes jointives de la région sus-pubienne à la région périnéale inférieure ont été analysées (coupes au format Dicom).

2.1.1 Génération des contours

Dans un premier temps, les contours des structures anatomiques recherchées ont été obtenus manuellement (détourage manuel) à partir de chaque coupe de scanner (utilisation du logiciel Alpha (logiciel interne développé au sein du Laboratoire de Biomécanique Appliquée [40]), après avoir effectué un agrandissement maximal des images (512*512 pixels) et après avoir défini un calibrage d'intensité des pixels le plus adapté au type de structure à reconstruire.

Ce travail de détourage a été effectué manuellement sur un ordinateur personnel (Vaio Sony™ VGN-C1S-processeur Intel®Core™ Duo Processor T5500 1.66 GHz – 1GB/Go – HDD 100 GB/Go – application graphique : Intel®Graphics Media Accelerator 950).

Pour chaque coupe anatomique, le détourage de l'ensemble des éléments a été effectué à 2 reprises afin d'obtenir une saisie la plus précise possible.

Tous les fichiers textes contenant les coordonnées des contours ont été convertis dans un format exploitable par le logiciel.

2.1.2 Reconstruction 3D

La qualité du premier maillage obtenu dépend du pas de coupe utilisé et des paramètres de traitement des contours dont, en particulier, la division de l'espace dans les trois directions qui est liée aux longueurs caractéristiques des éléments de chaque objet géométrique [35] .

Selon la structure concernée, des paramètres dans les 3 plans de l'espace ont été déterminés pour chacune d'entre-elle afin d'optimiser la création des objets géométriques.

Le tableau suivant résume les paramètres dans les 3 dimensions utilisés pour l'obtention de l'image géométrique :

Tableau 4 : paramètres dans les 3 dimensions pour création du modèle géométrique

Structure anatomique	X	Y	Z
Bassin droit	32	19	25
Bassin gauche	31	1	25
Sacrum	22	18	16
Symphyse	25	25	15
Urètre	48	38	40
Prostate	8	6	8
Corps caverneux	25	25	8
Corps spongieux	20	20	10
Ligament pubo-prostatique	25	25	15
Membrane périnéale	26	27	7
Muscles du périnée	30	30	15
Graisse périnéale	25	25	10
Rectum	25	25	20

2.2 Génération du maillage

L'ensemble des travaux de maillage a été réalisé sur le logiciel HyperMesh*.

La problématique posée par les mécanismes lésionnels étudiés (traumatismes de l'urètre postérieur associés aux traumatismes du bassin) nous imposait d'obtenir des éléments de petite taille afin de correspondre au mieux dans le modèle à la complexité géométrique des structures reconstruites. Nous avons dû en ce sens réaliser un maillage fin des structures anatomiques, d'autant plus qu'il a été mis en évidence dans la littérature l'influence de la taille du maillage dans l'analyse des mécanismes lésionnels[41,42], dans la limite d'un certain seuil de taille qui n'apporte plus de bénéfice pour la reconstruction.

Nous avons déterminé une taille limite inférieure pour les éléments de 0.3 mm.

Cette précision étant suffisante pour représenter fidèlement l'anatomie même complexe du périnée masculin sans alourdir trop les calculs nécessaires à la mise en application du modèle.

2.2.1 Type de d'éléments

Le maillage a été réalisé en utilisant des éléments triangulaires : le maillage surfacique a été réalisé en tria et le maillage volumique en tétrahèdre. Le choix d'utiliser ce type de maillage plutôt que des éléments hexahedriques a été déterminé par les conclusions élaborées dans plusieurs travaux de modélisation [35-43]. En effet, selon Bourdin et al. [43], malgré certains inconvénients des éléments tétraédriques (principalement en terme de rigidité qui serait surévaluée), la différence dans la réponse du modèle reste acceptable comparé à l'utilisation d'éléments hexaédriques. De plus, pour les pièces anatomiques à la forme très complexe, l'augmentation du cout de calcul peut largement être compensée par les avantages d'une technique de maillage automatique qu'offrent les éléments tétraédriques [35].

2.2.2 Procédure de remaillage

Comme cela a été rapporté dans les travaux de Labe [35], le premier maillage généré par le logiciel de reconstruction n'est pas directement exploitable en raison d'une taille des éléments trop petite et d'un maillage réalisé en éléments mixtes. Selon les structures et le résultat obtenu par le logiciel, nous avons à plusieurs reprises remaillé par une technique manuelle chaque structure anatomique selon un ordre bien établi :

Une vérification de la surface à extraire :

Celle-ci a permis de réaliser d'éventuelles retouches liées à la géométrie. Cette étape nous amenant à lisser, à recréer ou modifier (segmenter) certains éléments afin de trouver un compromis entre un respect de l'anatomie et l'obtention d'une structure plus régulière.

Une extraction des surfaces :

La facilité de l'extraction d'une surface à partir d'une image 2D est dépendante de la complexité des géométries rencontrées. En ce sens nous nous sommes attachés à obtenir un maillage de départ le plus simple et régulier possible, sans distorsions en ayant recours éventuellement à une fragmentation de la surface globale pour l'extraire par morceaux, en cas de structures complexes.

Génération du maillage définitif :

Une fois les deux procédures précédentes réalisées pour chacun des éléments de notre modèle, le maillage définitif a été réalisé.

Il a bénéficié d'une attention toute particulière avec la réalisation de plusieurs vérifications par rapport aux données anatomiques pour les structures primordiales de notre modèle, à savoir l'urètre, la prostate et la membrane périnéale. Cette technique a notamment été utilisée pour les structures primordiales de notre reconstruction, à savoir certaines zones de l'urètre lors de son passage dans la prostate et au niveau de la membrane périnéale.

A la suite du maillage surfacique obtenu, un maillage volumique a été généré secondairement.

2.2.3 Assemblage des structures

Les pièces anatomiques ont été reconstruites séparément les unes après les autres, puis positionnées dans le modèle en tenant compte des éventuels chevauchements. En fonction de ceux-ci, une correction par modification minime de l'échelle ou reconstitution manuelle d'éléments a été réalisée afin d'obtenir entre l'ensemble des éléments reconstruits des zones de contact homogènes, d'écartement minime, respectant l'anatomie et ne venant pas modifier les conditions mécaniques.

3. Mise en donnée

Celle-ci a été réalisée en utilisant le logiciel Radioss*.

La mise en données a été effectuée en 4 étapes :

- la définition d'un type d'élément pour chaque structure
- l'attribution d'un type de modèle de comportement adapté pour chaque structure identifiée
- la définition des interfaces de contact entre les tissus adjacents
- la définition des conditions limites et initiales

3.1 Définition d'un type d'élément pour chaque structure

En dehors des os pour lesquels nous avons distingués la zone corticale (estimée en moyenne à 3 mm) de la zone spongieuse et déterminé une épaisseur corticale pour chaque zone, les autres éléments ont été considérés avec une épaisseur uniforme.

3.2 Loi matériau

La sélection des lois matériaux qui ont été appliquée aux différentes structures du modèle s'est basée sur une analyse précise de la littérature et des (faibles) données existantes

notamment concernant l'adolescent, et une extrapolation des données utilisées dans les travaux de Labe [35].

Selon les tissus concernés, le comportement mécanique a été considéré comme élastoplastique (os cortical et spongieux), viscoélastique ou élastique (autres tissus du modèle).

Deux lois principales ont été utilisées :

La loi de Poynting Thomson (Loi 35 de la bibliothèque Radioss*) : elle s'appuie sur une analyse thermodynamique et mets en évidence 2 mécanismes :

Le stockage d'une énergie de déformation élastique réversible (ressort) et la dissipation d'une énergie irréversible (amortisseur).

La loi de Johnson Cook + endommagement (loi 22 et 23 de la bibliothèque Radioss*)

Elle est utilisée pour les structures osseuses. Le matériau présente un comportement élastique linéaire avant de subir une phase d'endommagement à partir d'un certain seuil d'endommagement fixé dans les caractéristiques mécaniques du matériau.

Le tableau 5 résume les paramètres biomécaniques et les lois matériaux utilisées pour chacun des éléments du modèle.

Tableau 5: paramètres biomécaniques et lois matériaux

	Densité (Kg/l)	E(MPa)	v	Lois matériaux
Symphyse pubienne	1.5	300	0.3	Poynting Thomson
Ligament pubo-prostatique	1.5	225	0.3	Poynting Thomson
Graisse	1	5	0.49	Poynting Thomson
Graisse postérieure	1	5	0.49	Poynting Thomson
Muscles (Dt et G)	0.9	1.6	0.45	Poynting Thomson
Rectum	1	2	0.3	Poynting Thomson
Urètre	1	2	0.3	Poynting Thomson
Membrane	1.5	225	0.3	Poynting Thomson
Prostate	1	6	0.495	Poynting Thomson
Corps spongieux	0.001	0.02	0.3	Poynting Thomson
Corps caverneux	0.001	0.02	0.3	Poynting Thomson
Sacrum et os iliaque (corticale)	2.1	8000	0.3	Johnson Cook + endommagement
Os iliaque (spongieux)	0.24	550	0.3	Johnson Cook + endommagement
Sacrum (spongieux)	0.2	600	0.3	Johnson Cook + endommagement

E : module de Young . v = coefficient de Poisson

3.3 Définition des interfaces

Les contacts entre chaque composant du modèle ont été créés, avec plusieurs possibilités d'interfaces selon les tissus concernés :

- interfaces de type « collage » permettant de créer une structure adhésive entre les structures concernées (interface de type 2 de la bibliothèque Radioss*).
- Interfaces de type « contact » unilatéral avec frottement permettant de décrire les mouvements relatifs observés entre les tissus biologiques (interfaces 7 et 11 de la bibliothèque Radioss*).

Le type d'interface utilisé dans notre modèle selon les éléments concernés est résumé dans le tableau 6.

Tableau 6 : type d'interfaces utilisées dans le modèle

Interface de type collage	Interface de type contact
Symphyse pubienne – os iliaques droits et gauche Ligament pubo-prostatique - os iliaques Ligament pubo-prostatique - prostate Membrane périnéale – os iliaque droit Membrane périnéale – os iliaque gauche Muscles droits – os iliaque droit Muscles gauches – os iliaque gauche Corps caverneux droit – os iliaque droit Corps caverneux gauche – os iliaque gauche Corps caverneux – corps spongieux	Rectum – graisse Prostate – graisse Urètre – graisse Muscles – organes mous (rectum – urètre)

3.4 Définition des conditions limites et initiales

Pour chaque mise en application du modèle, les conditions cinématiques initiales et limites des structures concernées ont été définies. Elles seront détaillées dans le chapitre « mise en application du modèle ».

4. Conclusion sur la génération du modèle

Le modèle a été généré à partir d'un sujet masculin présentant une faible densité graisseuse, selon la technique de segmentation d'image puis de contourage et de maillage.

Le maillage a bénéficié d'une attention particulière compte tenu de la précision requise entre les différents éléments anatomiques reconstruits, avec une taille inférieure limite pour les éléments de 0.3 mm.

La mise en donnée s'est appuyée sur les éléments disponibles dans la littérature et l'expérience du laboratoire en modélisation, notamment dans les travaux de Labe [35].

Deux types de loi matériaux et deux types d'interfaces ont été utilisées.

Partie III : le modèle réalisé : présentation – validation – mise en application

1. Présentation du modèle

Le modèle crée est un modèle éléments fini composé de **255653 éléments** finis dont 230000 éléments volumiques (tétrahèdre).

Au total, les 19 éléments suivants ont été identifiés et reconstruits :

En italique figure la dénomination de l'élément dans le modèle

<u>Eléments osseux (corticale + spongieux) :</u>

- aile iliaque droite (*bassin Dt cortical / bassin Dt spongieux)*
- aile iliaque gauche (*bassin G cortical / bassin G spongieux)*
- sacrum (*sacrum)*

<u>Eléments musculo-ligamentaires :</u>

- symphyse pubienne : (*symphyse)*
- ligaments pubo-prostatiques droits et gauches *(lig pubo-prostatique Dt / lig pubo-prostatique G)*
- muscles du plancher périnéal (muscles élévateurs de l'anus) droits et gauches (*muscle Dt / muscle G)*
- diaphragme périnéal (regroupant la membrane périnéale et le muscle transverse profond du périnée) *(membrane)*

<u>Structures viscérales :</u>

- rectum *(rectum)*

<u>Structures périviscérale :</u>

- atmosphère graisseuse pelvienne (graisse péri-rectale, fessière postérieure et péri-prostatique) (*graisse / graisse post)*

<u>Eléments du tractus urinaire et génital :</u>

- vessie se prolongeant par l'urètre postérieur et moyen) (*urètre)*
- prostate *(prostate)*
- corps spongieux et corps caverneux. (*spongieux / caverneux Dt / caverneux G)*

Compte tenu de la problématique présentée ; l'identification de l'urètre à volontairement été stoppée à son entrée dans le corps caverneux et l'urètre a été collé à ce niveau.

Il est représenté dans son ensemble dans les figures 17 et 18.

La figure 18 présente une vue latérale des éléments recréés, après avoir extrait l'os coxal gauche.

Figure 17 : modèle dans son ensemble

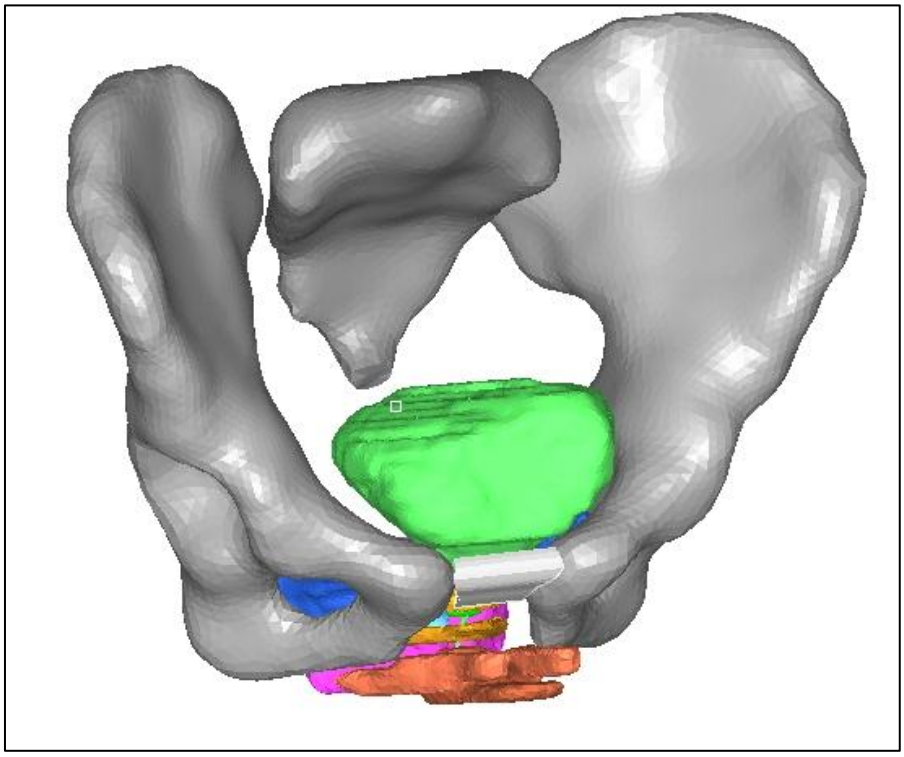
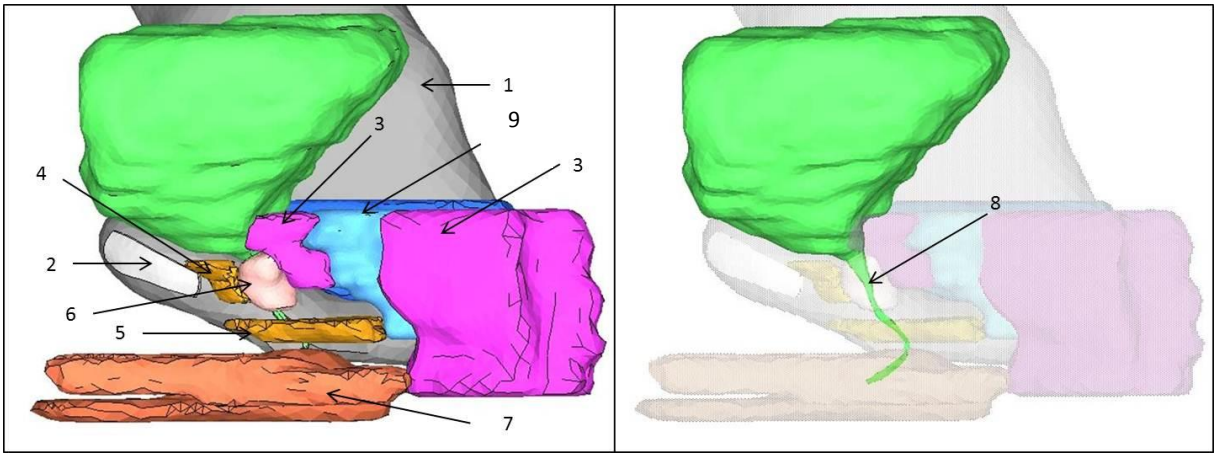


Figure 18 : vue latérale du modèle en ayant extrait l'os coxal gauche



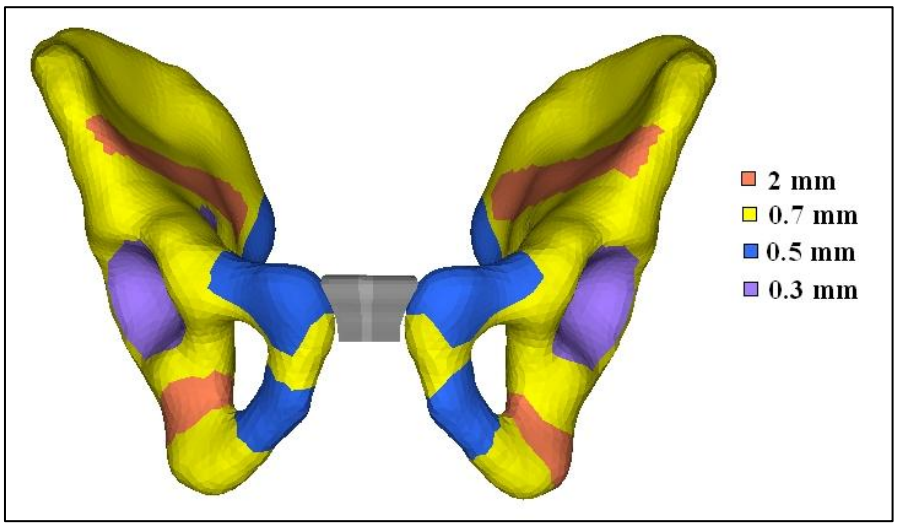
Légende : Os iliaque (1) - Symphyse pubienne (2) - Graisse péri-prostatique et péri-rectale (3) - Ligament pubo-prostatique (4) - Membrane périnéale (5) -Prostate (6) - Corps spongieux et caverneux (7) - Urètre et vessie (8) – Rectum (9)

Remarque :

Pour chaque élément osseux, afin de recréer les conditions mécaniques réalistes, deux structures ont été identifiées : la partie corticale et la partie spongieuse.

Concernant les ailes iliaques, la partie corticale a été séparée en plusieurs zones d'épaisseur corticale variable correspondant aux données anatomiques connues (figure 19).

Figure 19: différentes épaisseurs de la corticale des ailes iliaques



2. Validation du modèle

La validation du modèle a été réalisée selon 2 techniques.

2.1 Vérification des données anatomiques

Chaque structure anatomique identifiée a été vérifiée à 2 reprises lors du détourage et de la reconstruction, par une comparaison aux données anatomiques connues (anatomie cadavérique, planches d'anatomie en coupes longitudinales et transversales) concernant la taille et les rapports anatomiques de la structure concernée.

L'urètre et l'atmosphère péri-urétrale ont fait l'objet d'une attention toute particulière. Outre la vérification précédente, le positionnement de l'urètre a été vérifié en comparant les données obtenues par détourage à un scanner en coupes millimétriques d'un patient adulte sans pathologie urologique connue, et porteur d'un cathétérisme trans-urétral souple de petit calibre (sonde Charriere 12 mise en place dans les suites d'une intervention) afin de ne pas modifier les rapports anatomiques. La présence de ce cathétérisme urétral souple rendant plus aisé le repérage de l'urètre.

2.2 Vérification du comportement du modèle

Lors de la mise en application du modèle, nous avons recrée 3 situations traumatiques, à savoir un traumatisme latéral, un traumatisme antéro-postérieur et un traumatisme postéro-latéral.

Les deux premières situations ont fait l'objet de travaux préalables [35,36,44] de validation du pelvis ostéo-ligamentaire en terme de paramètres biomécaniques et de rupture.

Pour chacune des situations, notre modèle a été soumis aux mécanismes lésionnels développés dans les expérimentations citées. Une comparaison des courbes d'effort obtenues lors de ces expérimentations et sur notre modèle a été réalisée, permettant de valider le comportement du pelvis ostéo-ligamentaire modélisé jusqu'à l'apparition d'une fracture du cadre osseux.

L'ensemble des mécanismes testés est développé dans le chapitre : « mise en application du modèle »

Figure 20 : corridor expérimental et courbe d'efforts - impact latéral. Le trait vertical correspond à la survenue de la fracture. Le corridor expérimental est défini entre les courbes rouges (valeurs maximales) et bleue (valeur minimale). La courbe verte correspond au modèle. La zone encadrée correspond à la période d'analyse lésionnelle de l'urètre précédant la survenue d'une fracture.

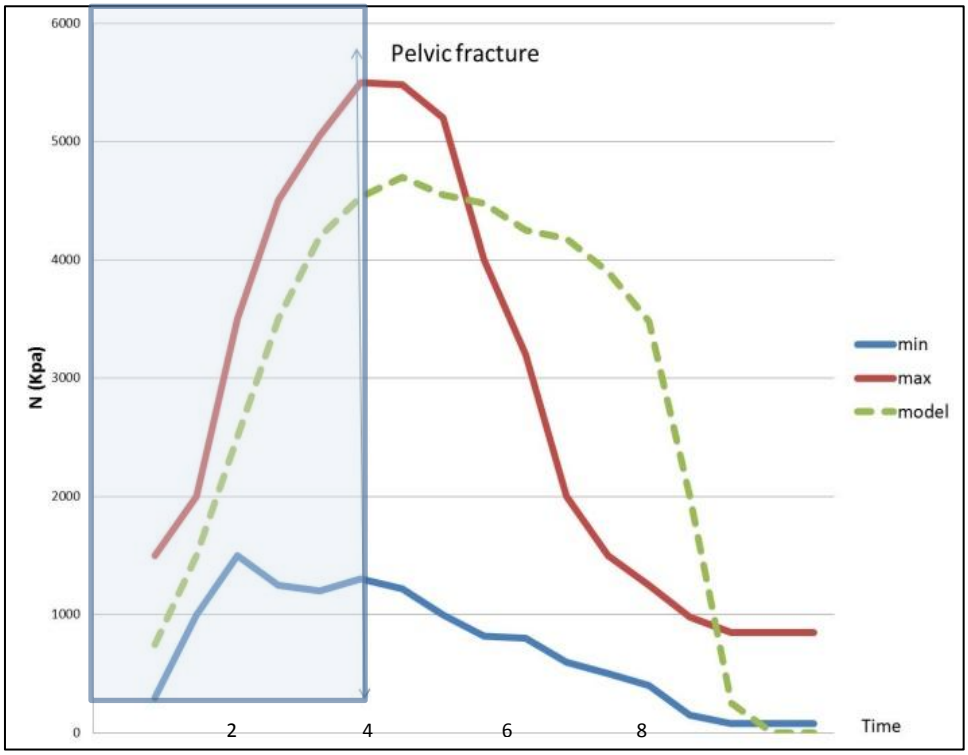
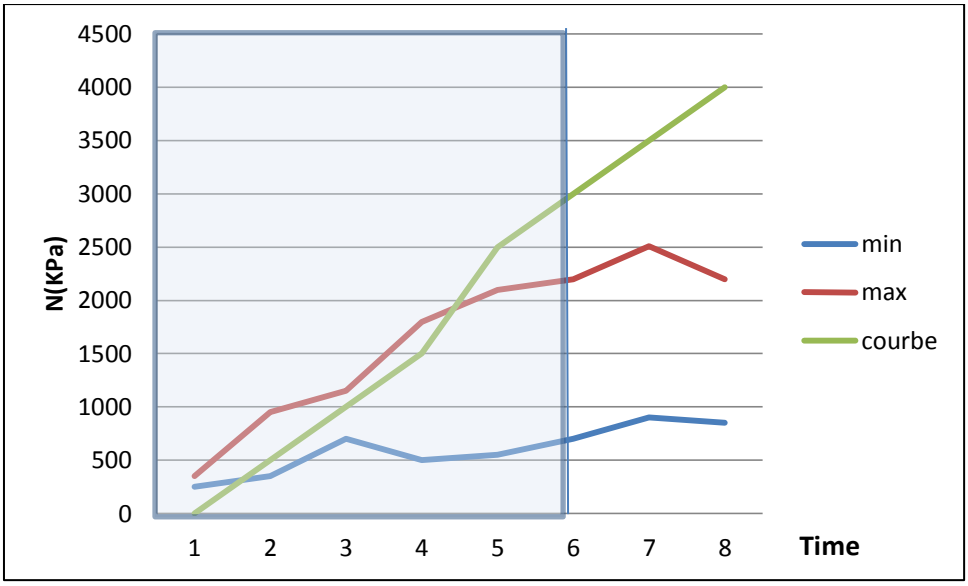


Figure 21 : corridor expérimental et courbe d'efforts - impact antéro-postérieur. Le trait vertical correspond à la survenue de la fracture. Le corridor expérimental est défini entre les courbes rouges (valeurs maximales) et bleue (valeur minimale). La courbe verte correspond au modèle. La zone encadrée correspond à la période d'analyse lésionnelle de l'urètre précédant la survenue d'une fracture.



3. Mise en application du modèle

Une fois le modèle réalisé et validé, 3 situations traumatiques ont été recrées, permettant une analyse précise du comportement de l'urètre postérieur et moyen.

L'analyse des déplacements et de l'élongation de l'urètre postérieur a été réalisée par une techniques de « tracking » après repérage de 2 points fixes, l'un à la partie médiane de l'urètre prostatique (nœud 186680), l'autre à la partie médiane de l'urètre membraneux (nœud 186692).

En fonction du temps, la distance entre ces deux points a été analysée, ainsi que le sens du déplacement.

Une attention particulière étant donnée à l'étirement constaté avant la survenue d'une fracture. De plus, selon le mécanisme recréé, nous avons évalué les déplacements des 2 éléments primordiaux dans notre problématique, la membrane périnéale et la prostate.

3.1 Impact latéral

3.1.1 Conception et réalisation

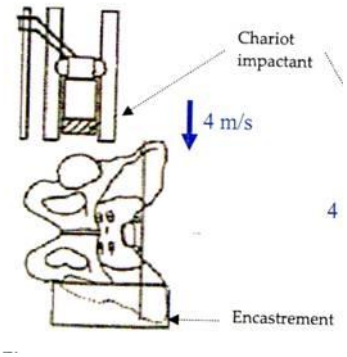
Un mécanisme par impact latéral a été réalisé en recréant les conditions expérimentales développées dans l'étude de Guillemot[44] sur le comportement du cadre osseux :

L'expérimentation réalisée est décrite comme suit :

Il s'agissait d'impacter latéralement une série de 12 pelvis, par l'intermédiaire d'un puit de chute, chaque pelvis étant placé verticalement et stabilisé. L'impact était réalisé par un chariot cylindrique d'une masse de 3,6 kg lâché d'une hauteur de 1,3 m et venant impacter le pelvis avec une vitesse de 4 m/s par l'intermédiaire d'une bille métallique calibrée et placée dans le cotyle droit.

L'objectif de ces essais expérimentaux était de déterminer des seuils lésionnels sur la base des niveaux d'efforts et de l'apparition des fractures.

Figure 22 : expérimentation de Guillemot



Nous avons recréé les conditions expérimentales sur notre modèle en incluant une sphère métallique de taille adaptée dans le cotyle droit et en venant impacter le bassin par un cylindre (impact du cylindre sur la sphère).

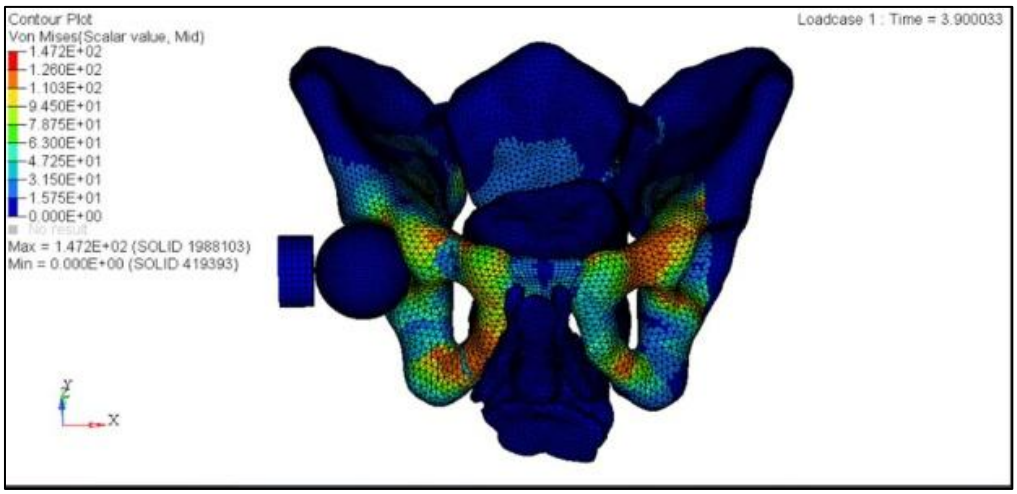
Les conditions expérimentales étaient :

Masse du cylindre : 3,6 kg

Vitesse du cylindre lors de l'impact sur la sphère : 4 m/s

Conditions limites : l'impacteur ne pouvait se déplacer que dans un axe perpendiculaire à la sphère, selon un déplacement linéaire et la partie externe de l'aile iliaque gauche était fixée afin d'éviter tout déplacement du modèle.

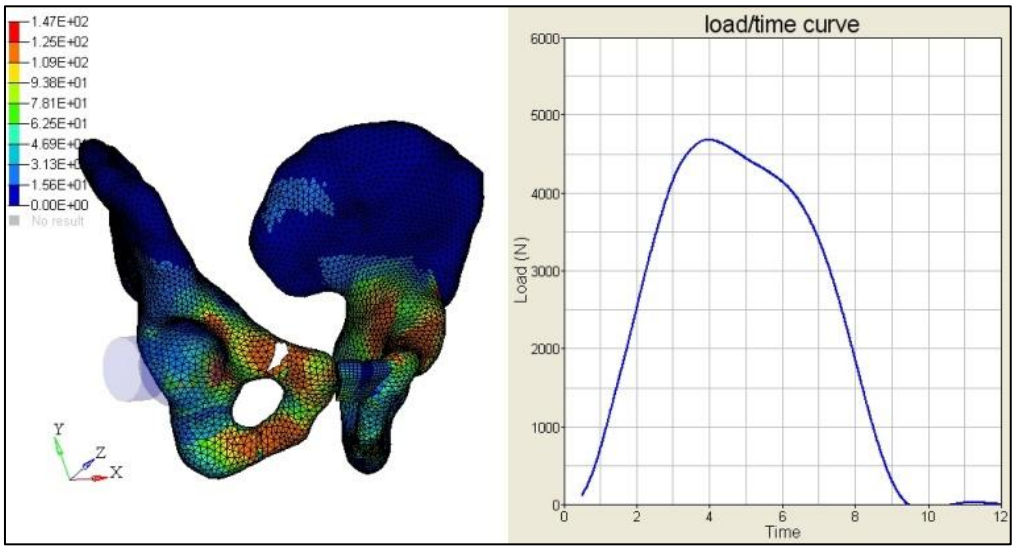
Figure 23 : impact latéral recrée selon l'expérimentation de Guillemot



3.1.2 Résultats

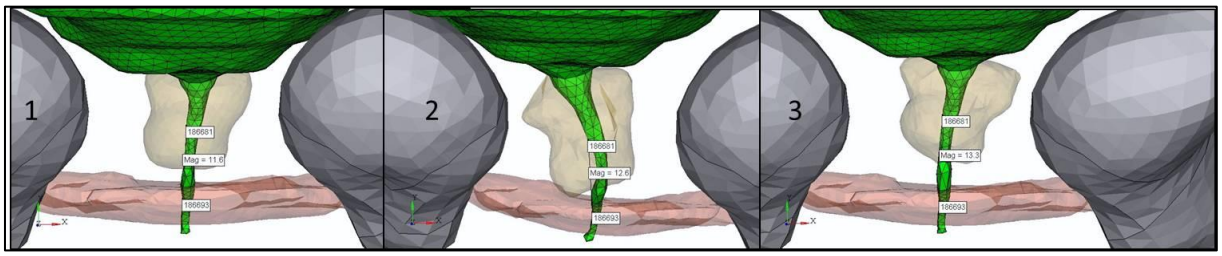
L'impact engendre un effort maximal de 4600 N à t= 3,9 ms responsable de l'apparition d'une fracture des 2 branches ischio et ilio pubiennes droites.

Figure 24 : courbe d'effort en fonction du temps (impact latéral)



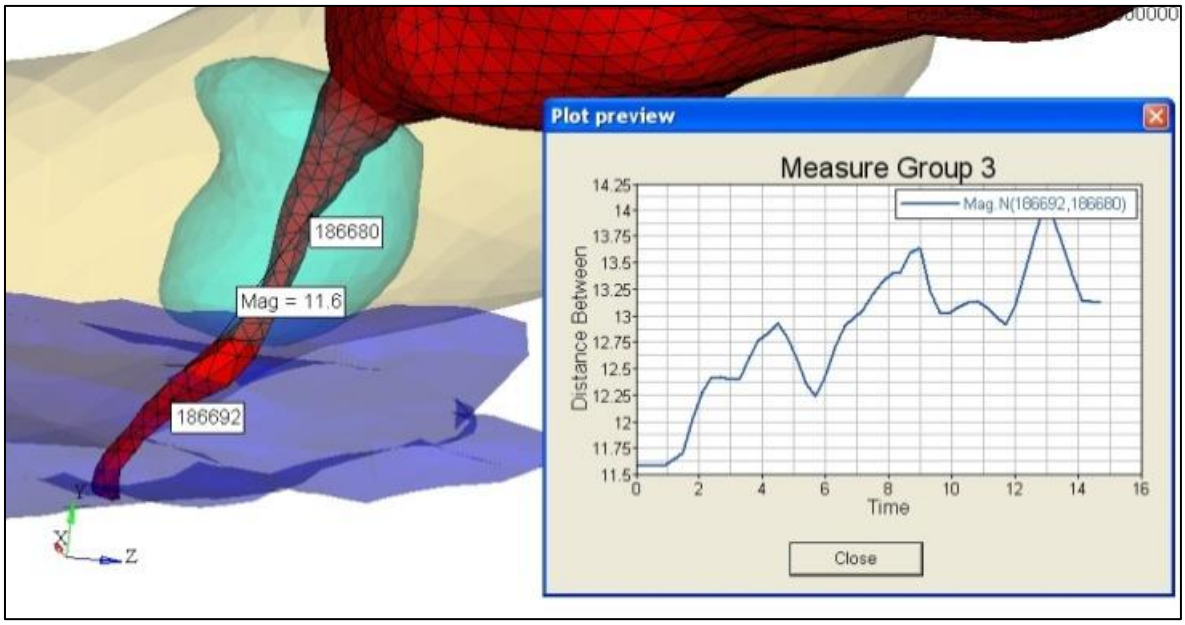
La figure 25 représente le déplacement de l'urètre à 3 temps (t=0 [1] ; t=3.9 [2] ; t=8 [3]) en vue frontale. On constate que l'impact est responsable d'un déplacement latéral de la prostate entrainant l'urètre prostatique, alors qu'au niveau de la membrane périnéale il existe un déplacement vers le bas de la membrane entrainant l'urètre membraneux. La conséquence est un étirement de l'urètre.

Figure 25 : déplacement de l'urètre (vue frontale) à t=0; t=3.9; t=8 ms (impact latéral)



L'étude du déplacement de l'urètre est représentée graphiquement sur la figure 26 par la distance en fonction du temps entre les 2 points (centre de l'urètre prostatique et centre de l'urètre membraneux).

Figure 26 : étirement de l'urètre en fonction du temps (impact latéral)



L'analyse de la courbe révèle :

L'existence d'un étirement de l'urètre avant la survenue d'une fracture osseuse de 1.25 mm.

Après la survenue d'une fracture (t>3.9 ms), la majoration d'un étirement de l'urètre avec un étirement maximal de 2.6 mm.

3.2 Impact antéro-postérieur

3.2.1 Conception et réalisation

Ce mécanisme lésionnel a été reconstitué en s'appuyant sur l'expérimentation de Masson et al. [36]

Les tests réalisés ont consisté en une compression frontale progressive sur 8 pelvis, les pelvis étant placés sur une table en appui sur les articulations sacro-iliaques postérieures, stabilisés pour éviter tout mouvement de bascule antéro-postérieur.

La charge a été appliquée directement au niveau de la symphyse pubienne par l'intermédiaire d'une plaque rectangulaire rigide.

Un chargement initial de quelques Newtons a été initialement appliqué de manière à stabiliser l'ensemble, puis la compression était appliquée avec une vitesse de 80 $mm.mn^{-1}$ pendant 5660 ms.

La force appliquée a été calculée à l'interface avec l'impacteur et les déplacements de la symphyse pubienne ainsi que la force exercée responsable de l'apparition d'une fracture du cadre osseux ont été enregistrées.

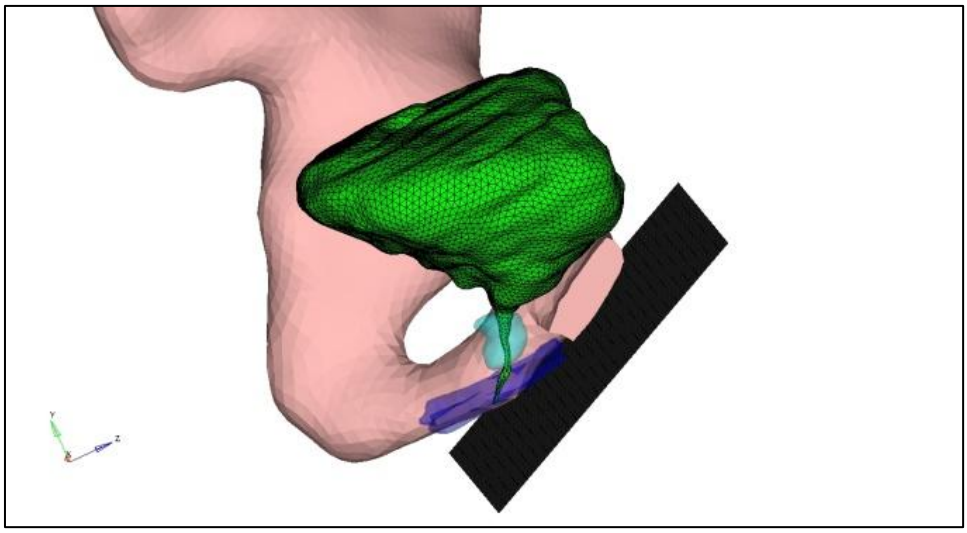
Figure 27 : expérimentation de Masson (impact antéro-postérieur)

Nous avons appliqué ces conditions expérimentales à notre modèle de la manière suivante :

L'impacteur a été représenté par une plaque rigide (15 *8 cm) venant au contact de la symphyse pubienne avec une vitesse imposée de 1 m/s (compte tenu du fait qu'il a été prouvé [35] qu'il n'existait pas de différence de comportement mécanique pendant les quelques milisecondes suivant l'impact, que la vitesse soit de 80 $mm.mn^{-1}$ ou de 1 m/s).

Des conditions limites ont été imposées au modèle : déplacement limité de l'impacteur dans l'axe antéro-postérieur et fixation de la partie postérieure des 2 ailes iliaques pour stabiliser le modèle.

Figure 28 : vue de profil avec 1/2 bassin droit retiré (impact antéro-postérieur)



3.2.2 Résultats

L'impact a engendré une fracture des 2 branches ischio et ilio pubiennes droites et gauche à 6 ms, pour une force engendrée de 3000 N. Le mouvement s'est prolongé dans le temps après l'apparition des fractures avec une majoration des efforts (effort maximal de 4400 N à t=9 ms) (figure 30).

Figure 29 : courbe d'effort (impact antéro-postérieur)

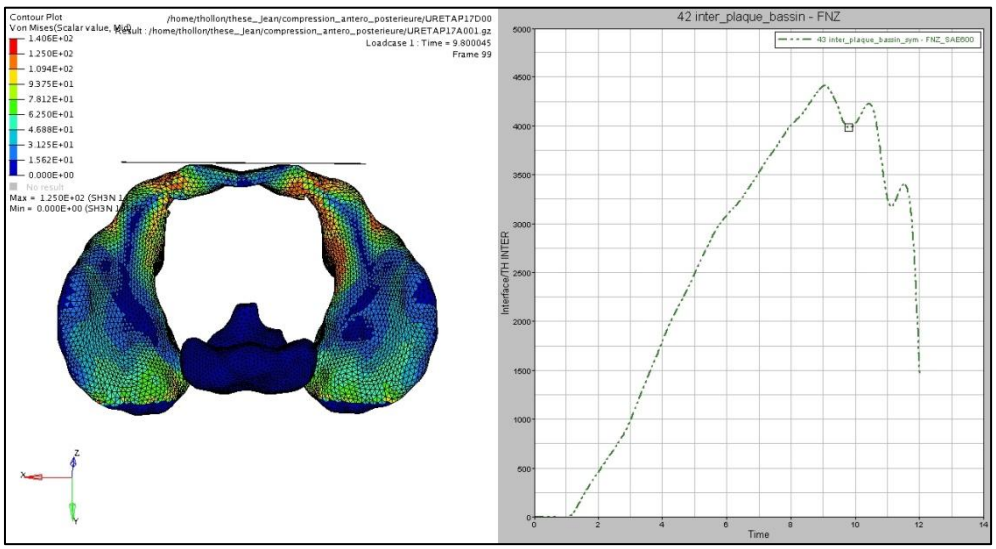
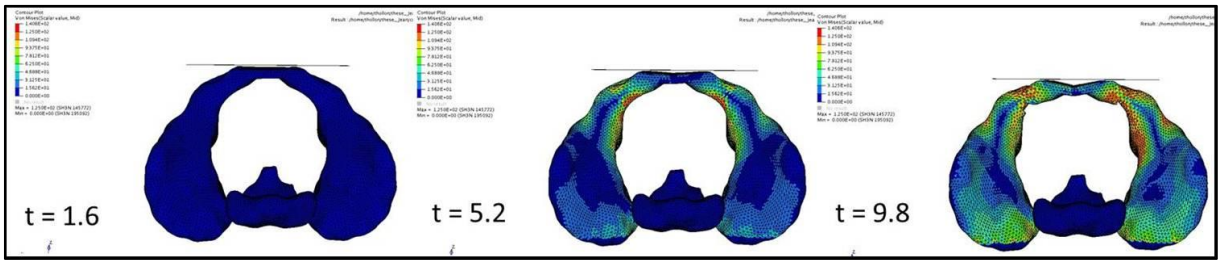


Figure 30 : modification du cadre osseux / temps (impact antéro-postérieur)

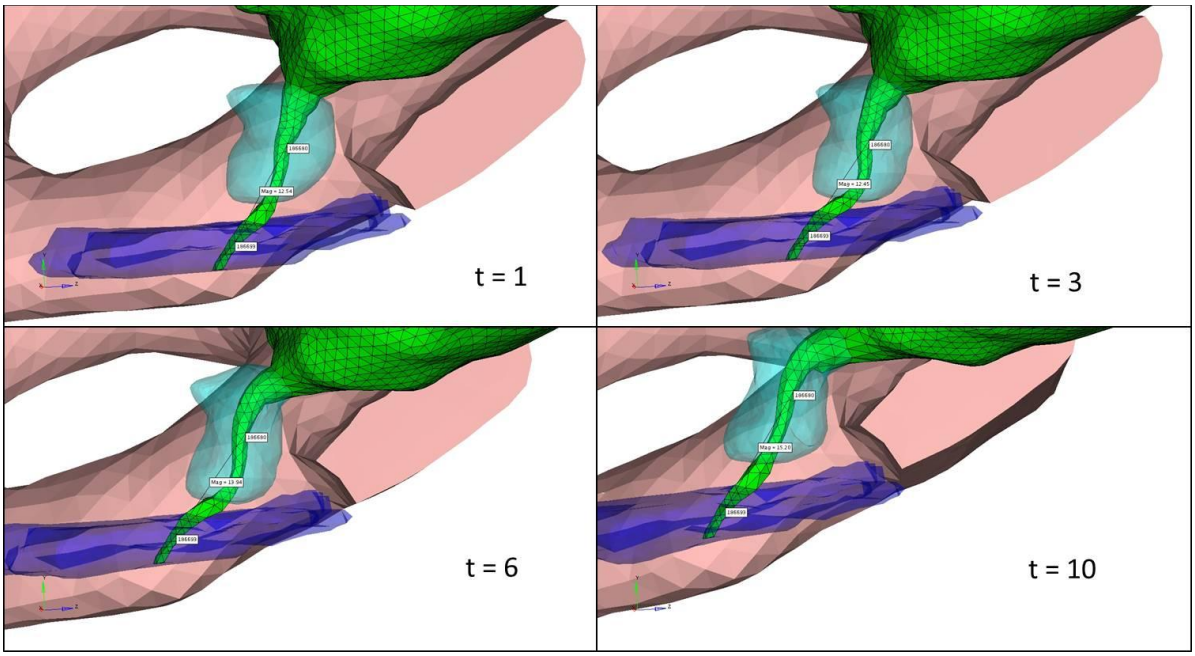


Résultats sur l'urètre (figure 31)

La mesure de la distance entre urètre prostatique est urètre membraneux met en évidence un raccourcissement initial pendant la phase initiale de l'impact (< 3 ms) suivi d'un étirement de l'urètre de 1.5 mm avant l'apparition des fractures du cadre osseux.

L'élongation maximale de l'urètre enregistrée dans ce type d'impact est de 2.8 mm à t=10 ms.

Figure 31 : déplacement de l'urètre en vue de profil (impact antéro-postérieur)



Dans ce type de mécanisme, le déplacement concerne principalement la partie prostatique de l'urètre avec un recul du bloc prostatique proportionnellement plus important que celui constaté au niveau de la membrane périnéale, expliquant le raccourcissement initial constaté. Secondairement le recul de la membrane périnéale explique l'élongation de l'urètre identifiée.

3.3 Impact scooter-voiture (impact postéro-latéral)

3.3.1 Conception et réalisation

Ce mécanisme a été réalisé en recréant les conditions cinématiques développées par Serre et al. [39]

Leur travaux de modélisation ont consisté en la conception d'un modèle d'accident de la route mettant en jeu un motocycliste en scooter (scooter Joyride SYM*) et une voiture (Renault Mégane*) (figure 32) avec les conditions cinématiques suivantes :

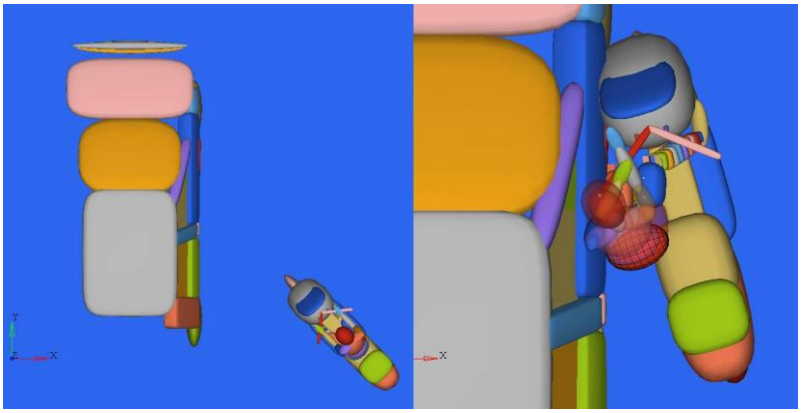
Scooter venant de l'arrière, impactant le véhicule au niveau de la portière avant avec un angle de 45 ° et une vitesse de 50 km/h.

Selon les axes de coordonnées, la direction du scooter était déterminée par les valeurs suivantes :

Vx= -7.7 ms ; Vy = 7.59 ms ; Vz = -0.13 ms; Vres = 10.81 ms

Le choc survenait à t=201.2 ms

Figure 32 : modèle d'impact de Serre et al. (impact scooter-voiture)



Mise en application (figure 33):

Remarque préalable : Compte tenu du mécanisme recrée et de la nécessité de se rapprocher au maximum des conditions réelles de survenue d'un accident, nous avons ajouté à notre modèle dans la cadre de ce mécanisme plusieurs éléments (parties molles de la hanche (peau + muscles) extraites du modèle HUMOS (REF) et sphère rigide dans le cotyle) afin d'obtenir un effet d'amortissement lié à ces parties molles.

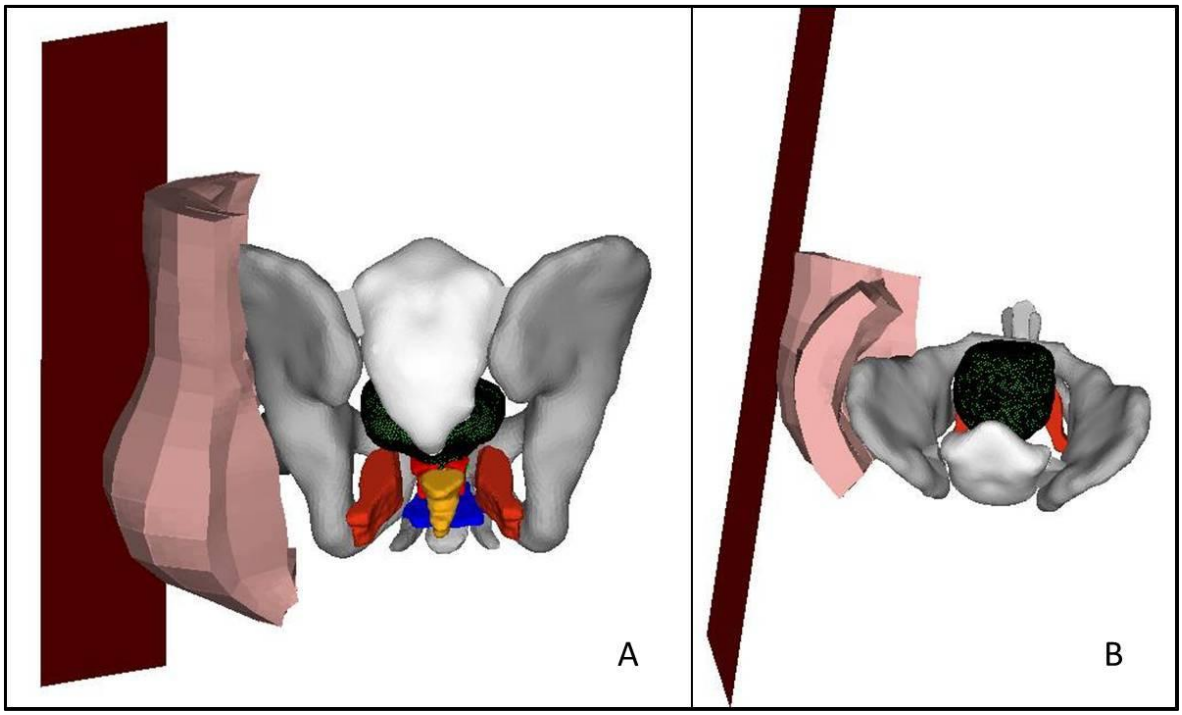
La portière de la voiture a été modélisée sous forme d'une plaque rectangulaire.

Conditions cinématiques :

Le modèle a été projeté sur la plaque représentant la portière de la voiture avec une vitesse imposée de 50 km/h, selon un angle d'impact de 45 ° et une direction postéro-antérieure.

Conditions limites : aucune condition de fixation n'ont été imposées au modèle, le but de la mise en application étant d'analyser les lésions à l'impact et avant la survenue d'une chute sur la chaussée.

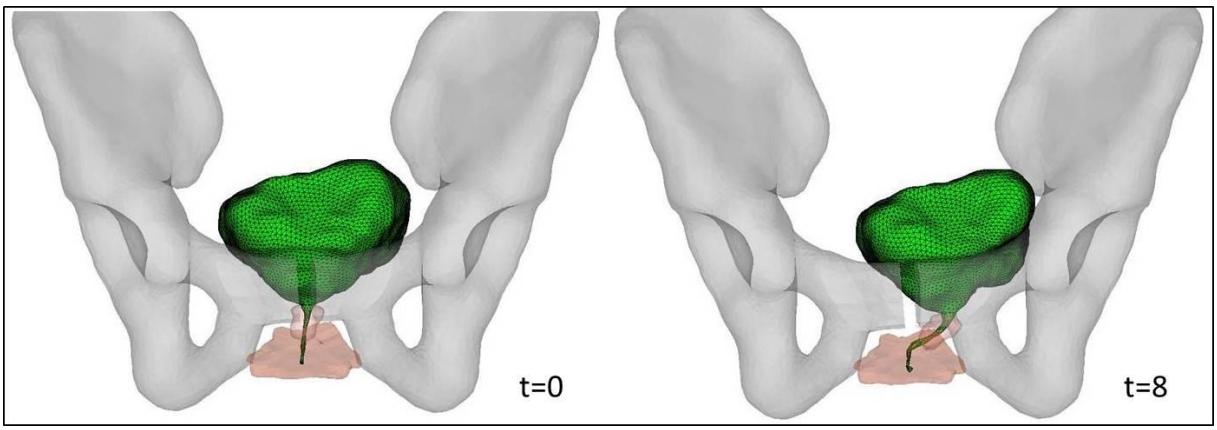
Figure 33: vue postérieure (A) et supérieure (B) (impact scooter-voiture)



3.3.3 Résultats

L'impact a généré une force maximale à t=6ms de 3710 N, responsable d'une inclinaison latérale du bassin (figure 34).

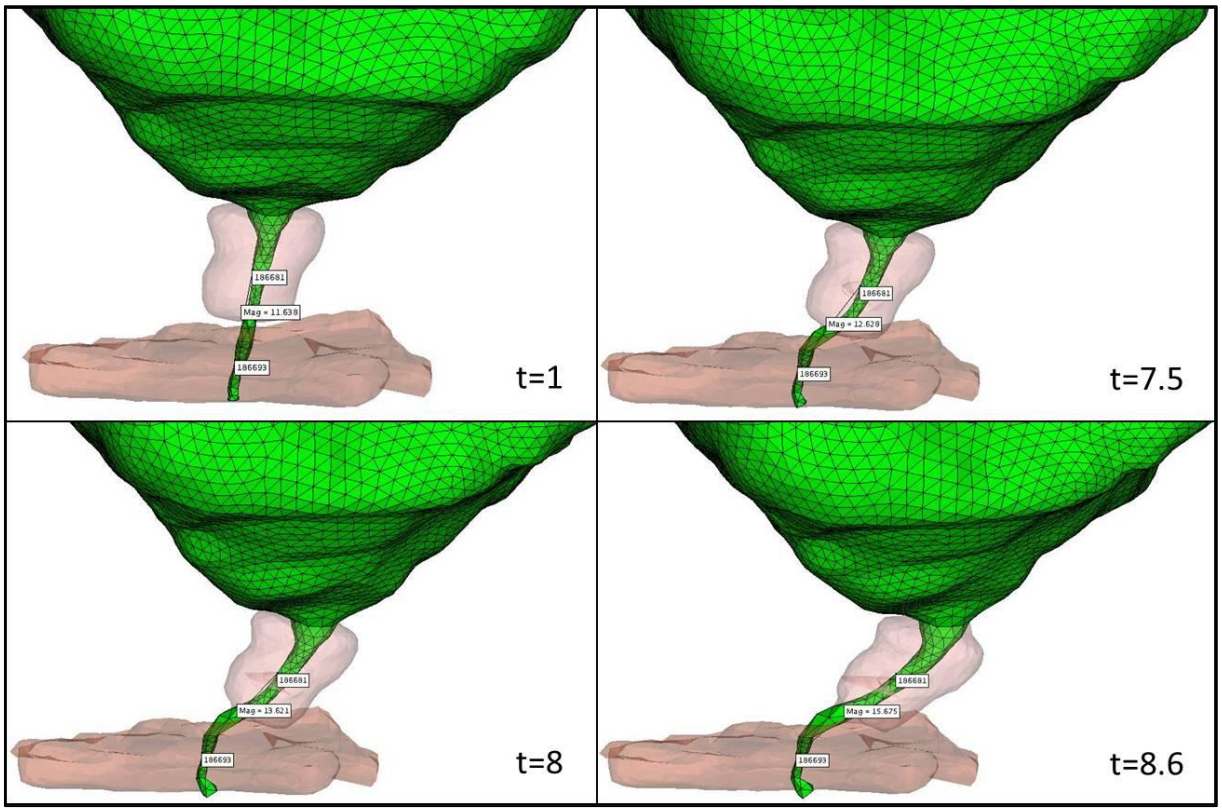
Figure 34 : vue frontale - déplacement du bassin (impact scooter-voiture)



Analyse de l'étirement de l'urètre (figure 35) :

En fonction du temps, un étirement de l'urètre de 1 mm a été constaté à t=7.6 ms et de 2 mm à t=8.15 ms.

Figure 35 : vue antéro-latérale . Déplacement de l'urètre / temps (impact scooter-voiture)



Analyse des déplacements :

Dans ce type de traumatisme, on constate un déplacement du bloc prostatique plus marqué que le déplacement de la membrane périnéale, ce qui engendre un étirement important de l'urètre.

3.4 Conclusion sur les trois mécanismes lésionnels

Les trois mécanismes lésionnels représentant la majorité des cas rencontrés en pratique clinique ont été reconstitués par une mise en application de notre modèle.

Les paramètres expérimentaux ont été extrapolés de données de la littérature et d'expérimentations validées.

Les mécanismes recrées sont un impact latéral, un impact antéro-postérieur et un impact postéro-latéral représentatif d'un accident de la voie publique entre un scooter et une voiture.

Dans chacune des situations traumatiques recréées, il a été constaté avant l'apparition d'une fracture du cadre osseux un étirement de l'urètre postérieur de 1.25 à 2 mm pour des efforts maximaux < 4500 N.

Cet étirement étant soit en rapport avec un déplacement d'un des deux éléments de l'urètre (bloc prostatique ou membrane périnéale) soit un déplacement des 2 conjointement mais dans des directions opposées.

Discussion et conclusion

Les lésions traumatiques de l'urètre postérieur associées aux traumatismes du bassin sont des lésions sévères, que ce soit par l'importance du traumatisme initial, la fragilité du tissu concerné mais aussi par le risque d'aggravation iatrogène par un cathétérisme urétral en cas de lésion méconnue.

Leur morbidité est élevée [15,22,28] avec un risque de sténose urétrale qui survient dans 50 à 100 % des cas et d'incontinence définitive qui est rapportée dans 5 à 12 % des cas.

Les caractéristiques propres des lésions urétrales chez l'enfant sont, même si elles sont moins nombreuses comparativement à l'adulte[45], d'une plus grande complexité et sévérité due à la fragilité des tissus [46], et au caractère plus rapidement complète des ruptures.

La population adolescente représente une tranche d'âge particulièrement soumise à ces accidents de 2 roues, grands pourvoyeurs de traumatismes du bassin[1].

Dans ce contexte, les circonstances traumatiques sont le plus souvent graves avec un contexte de polytraumatisme justifiant d'une prise en charge en réanimation.

Ainsi, compte tenu des données existantes en traumatologie routière [1,2,,47], de notre expérience clinique dans la prise en charge de ces patients polytraumatisés, et des particularités pédiatriques, une meilleure connaissance de la relation anatomo-clinique existant entre les traumatismes de l'urètre postérieur et les traumatismes du bassin devrait permettre de diminuer la morbidité de ces lésions par un dépistage plus précoce et une diminution de la iatrogénie.

<u>Connaissances actuelles sur les mécanismes lésionnels :</u>

Peu de connaissances existent actuellement sur l'association anatomo-clinique entre traumatismes du bassin et de l'urètre postérieur.

Les éléments disponibles reposent sur une analyse rétrospective de situations cliniques[48,49,50] et/ou des études cadavériques[51], résumés dans la classification de Tile et principalement les travaux d'Andrich et al.[7] et Paparel et al.[9] chez l'adulte.

Le principal élément identifié est la présence d'un conflit anatomique entre d'une part le bloc prostatique (incluant la portion prostatique de l'urètre) et d'autre part la membrane périnéale (incluant l'urètre membraneux), ce conflit étant lié aux déplacements des structures concernées en fonction de leurs moyens de fixation aux éléments du cadre osseux.

Chez l'enfant il existe une plus grande dislocation de la prostate et du bloc prostatique [46], en rapport avec un volume moins important de la prostate [18] venant aggraver les déplacements. Ainsi, ont été décrits chez l'enfant uniquement des lésions à type d'avulsions de la partie antérieure de la prostate incluant l'urètre prostatique, et de rupture complète urétrale au niveau du col vésical et de l'urètre membraneux avec « séquestration » de la prostate constatées en cas de traumatisme particulièrement sévère [52].

Toutefois, l'ensemble de ces mécanismes lésionnels décrits n'analysent pas les mécanismes et les lésions potentielles survenant avant l'apparition d'une fracture du cadre osseux, or il est fort probable que des lésions infra-cliniques fragilisant l'urètre apparaissent à la phase initiale du traumatisme.

Nous avions donc pour objectif de tenter de mieux appréhender les lésions urétrales à la phase initiale du traumatisme, avant la survenue d'une fracture osseuse (visible sur une radiographie conventionnelle).

Pour répondre à cette problématique, plutôt que d'utiliser soit des données médicales (études de cas) réelles ou des éléments cadavériques, nous avons opté pour une méthodologie basée sur la modélisation en éléments finis.

La modélisation numérique occupe une place importante dans l'analyse des mécanismes lésionnels en traumatologie humaine et en accidentologie. Elle vient compléter les études mécaniques expérimentales et permettent dans certaines situations complexes où une étude mécanique est peu réalisable d'accroitre les connaissances sur les mécanismes lésionnels.

Les différents modèles existants permettant une analyse de comportement du corps humain[53,54] dans son ensemble lors de situations d'accidentologie fréquentes ou très spécifiques (femme enceinte[38], plongeon[13]). D'autres travaux étudiant plus particulièrement le comportement d'organes ou de segments corporels[55,56].

Plus spécifiquement les travaux de Snedeker et al.[57] s'intéressent à la situation de l'accident de la circulation avec impact périnéal entre un piéton et une voiture, mais sans analyse précise des conséquences sur l'urètre.

Après un recueil précis de l'ensemble des modèles existants, compte tenu du caractère trop global pour les modèles corps entiers, aspécifique ou non adapté par rapport à notre problématique, nous avons élaboré un modèle éléments finis de périnée antérieur d'adolescent, incluant l'ensemble des structures impliquées dans les traumatismes de l'urètre postérieur (urètre, prostate, appareil ligamentaire et musculaire du périnée antérieur), avec une définition la plus précise possible des propriétés biomécaniques des structures concernées.

Ce modèle, a bénéficié d'une double validation : en s'appuyant sur les données anatomiques existantes et en recréant des mécanismes lésionnels connus et analysés dans la littérature.

De plus, dans sa conception, une attention particulière a été donnée dans le choix du patient (présentant un BMI faible afin d'accroitre la précision des images tomodensitométriques) et à l'anatomie des structures principales (urètre – prostate – membrane périnéale).

Nous avons choisi d'appliquer au modèle 3 mécanismes lésionnels, choisis pour leur fréquence en cas d'accident de la voie publique et par leur analyse préalable en traumatologie osseuse.

Bénéfices du modèle

Les travaux réalisés mettent en évidence dans un premier temps la faisabilité de cette approche par modélisation pour l'analyse de mécanismes lésionnels très précis, incluant plusieurs structures anatomiques de propriétés différentes.

Dans l'étude des mécanismes traumatiques périnéaux, cette approche est à notre connaissance la première de ce type qui effectue une analyse aussi détaillée.

Elle n'a pu être réalisable qu'après une analyse précise de l'ensemble des éléments anatomiques composant le périnée antérieur et des hypothèses existant sur l'association lésionnelle étudiée.

Pour chacun des mécanismes recréés, un étirement longitudinal ou transversal de l'urètre postérieur par conflit et déplacement asynchrone entre le bloc prostatique et la membrane périnéale a été identifié. Cet étirement pouvant être de 2 mm selon le mécanisme, pour des forces engendrées correspondant à la réalité des traumatismes rencontrés en pratique clinique.

Outre la constatation d'une élongation de l'urètre, l'étude à des temps différents des déplacements de la membrane périnéale et de la prostate permet de compléter les connaissances actuelles :

Ainsi, si l'on se réfère à la classification de Tile [20], dans le cas des lésions de type B2 par impact latéral les mécanismes évoqués pour les lésions urétrales sont une déchirure directe par un fragment osseux. Or, dans notre mise en application du modèle en cas de mécanisme latéral, nous identifions un déplacement de l'urètre induit par d'une part un déplacement latéral de la prostate mais aussi une inclinaison de la membrane périnéale laissant présager d'un mécanisme au moins de fragilisation de l'urètre avant d'obtenir une rupture par un fragment osseux.

Dans le second mécanisme que nous avons créé, notre modèle identifie pour les lésions de type Tile B1 (mécanisme antéro-postérieur) avant l'apparition d'une fracture osseuse un recul initial du bloc prostatique sans déplacement de la membrane périnéale, ce recul étant

responsable d'un raccourcissement initial de la portion urétrale mobile située entre l'urètre prostatique et l'urètre membraneux) puis d'une élongation lors du déplacement secondaire de la membrane périnéale.

Le troisième mécanisme recréé (impact postéro-latéral) correspond à une situation fréquente en accidentologie routière, pour laquelle une analyse selon la classification de Tile[20] n'est pas directement réalisable. Dans ce cas notre objectif était de corréler des données d'accidentologie réelles et d'identifier qu'il existait dans ce cas des conséquences en terme de déplacement sur l'urètre postérieur avant même la constatation d'une fracture du cadre osseux.

Ainsi, dans chacune des 3 situations (impact latéral, antéro postérieur et postéro-latéral), l'étirement urétral a été identifié avant toute constatation d'une fracture osseuse (visible sur une radiographie du bassin). Cet élément laisse présumer de l'existence d'une fragilisation de l'urètre (et/ou de rupture) dans ce type de mécanismes avant toute survenue d'une fracture osseuse.

Difficultés rencontrées dans la mise en application du modèle

La mise en application du modèle dans les 3 mécanismes recrées a nécessité plusieurs mises au point de celui-ci afin d'obtenir sa validation dans les différentes situations recréées.

Les principales modifications ont été apportées sur les structures osseuses (os iliaques) pour lesquelles une modification progressive de l'épaisseur de l'os cortical a été justifiée, afin d'obtenir un os présentant des caractéristiques les plus proches possibles de la réalité.

De même, selon le mécanisme recréé, certaines structures n'intervenant pas directement ou indirectement dans le mécanisme lésionnel ont été simplifiées pour alléger les calculs.

C'est le cas des corps spongieux et caverneux dans le traumatisme par impact postéro-latéral.

Limites du modèle

Notre modèle peut présenter plusieurs limites :

La définition des structures musculaires du diaphragme uro-génital peut présenter une limite du modèle élaboré :
La notion anatomique de diaphragme uro-génital regroupe un ensemble musculomembraneux difficilement dissociable, qui s'étend entre les branches ischio-pubiennes.
Compte tenu des structures anatomiques concernées (muscle transverse profond du périnée, membrane périnéale) et de l'orientation de leur composantes musculo-ligamentaires, il n'était pas possible de distinguer les différents composants de cet

ensemble. Nous avons considéré cette structure comme unique, à caractéristiques biomécaniques musculo-ligamentaire tendue entre les os iliaque latéralement et la symphyse pubienne en avant. Dans celle-ci le passage de l'urètre a été ménagé afin de recréer au mieux la réalité anatomique et les mécanismes lors des circonstances traumatiques.

La définition des propriétés biomécaniques de la prostate s'est heurtée au faible nombre de données disponibles chez l'adolescent (notre sujet) et l'adulte jeune. En ce sens, les caractéristiques biomécaniques de celle-ci (coefficient de Poisson, module de Young) ont été extrapolées des données disponibles chez l'adulte, en tenant compte des variations histologiques connues selon l'âge par les travaux de Well [58].

Nous avons délibérément négligé dans la reconstruction les glandes séminales pour plusieurs raisons : l'absence d'implication connue dans les traumatismes de l'urètre postérieur, les caractéristiques anatomiques en termes de volume et de moyens de fixité, et la difficulté présentée par leur identification sur les coupes tomodensitométriques rendant leur modélisation peu réalisable.

Enfin, l'analyse des résultats basée sur la corrélation entre élongation et rupture de l'urètre demeure difficile à établir compte tenu de l'absence de données biomécaniques disponibles dans la littérature sur la résistance à l'élongation de l'urètre. Ce sujet a fait l'objet de nombreux travaux pour l'urètre féminin ou chez l'animal[59,60], mais n'a jamais à ce jour été étudié pour l'urètre postérieur masculin de l'adolescent.
Seul Mouraviev et al.[61], dans une étude cadavérique sur 12 cas de traumatismes de l'urètre postérieurs survenus en cas de traumatisme du bassin établissent une corrélation entre la longueur du défect muqueux et l'importance de la fracture osseuse, un défect muqueux de moins de 3 cm étant associé à une dislocation symphysaire modérée, un défect plus important (>3.7 cm) en rapport avec une dislocation symphysaire importante.
Cette étude ne délivrant toutefois aucune information sur l'importance de l'étirement urétral avant la survenue d'une rupture urétrale partielle ou complète.
Cet élément devant faire l'objet d'un travail ultérieur.

<u>Applications cliniques du modèle réalisé</u>

Nous avons pu mettre en évidence dans les situations cliniques recréées la présence d'un étirement de l'urètre avant même l'apparition d'une fracture osseuse.

Cet étirement laisse présumer dans cette situation d'une fragilisation de l'urètre postérieur.

En ce sens, il est probable qu'un geste de cathétérisme urétral vienne aggraver un urètre déjà fragilisé et accroisse le risque de rupture dont on connait les conséquences à long terme.

Il nous semble important qu'en cas de nécessité de cathétérisme vésical sur un traumatisme du bassin même sans fracture de mécanisme latéral, antéro-postérieur ou postéro-latéral, la voie trans-urétrale ne soit réalisée que dans des conditions strictes :

- que le geste soit réalisé par un urologue ou praticien ayant une expérience sérieuse en cathétérisme urétral (urologue / chirurgien)
- que le geste soit réalisé de manière prudente
- qu'une seule tentative ne soit réalisée.

Si ces conditions ne sont pas requises en cas de suivi nécessaire de la diurèse un drainage vésical sus-pubien doit être réalisé.

Conclusion

Une modélisation du périnée antérieur de l'adolescent (modèle élément fini) a été réalisée dans le but de mieux comprendre l'association lésionnelle existant entre traumatismes du bassin et traumatismes de l'urètre postérieur.

La mise en application de ce modèle dans trois situations lésionnelles connues a permis de confirmer les hypothèses lésionnelles et d'identifier un déplacement à type d'étirement au niveau de l'urètre postérieur, avant même la survenue d'une fracture du cadre osseux.

Ces éléments laissent présumer d'une fragilisation de l'urètre postérieur à fortiori chez l'adolescent compte tenu des caractéristiques anatomiques propres de la prostate et justifient d'une conduite à tenir très prudente en cas de cathétérisme urétral dans un contexte de traumatisme du bassin.

Annexes

Légendes des figures et tableaux

Figure 1 : os coxal 12
Figure 2 : appareil ligamentaire au niveau du bassin osseux 14
Figure 3: muscles du diaphragme pelvien 15
Figure 4 : diaphragme uro-génital (coupe frontale) 16
Figure 5 : diaphragme uro-génital (partie antérieure) 17
Figure 6 : urètre 18
Figure 7 : rectum 22
Figure 8 : mécanismes dans la classification de Tile [20] (A ligne du haut - B seconde ligne - C ligne du bas) 28
Figure 9 : mécanismes des lésions urétrales / classification de Tile [7] 35
Figure 10 : classification radiologique des traumatismes de l'urètre postérieur 37
Figure 11 : modèle de Uhl et al. 41
Figure 12 : modèle de Brooks 43
Figure 13 : modèle de Brooks avec cadre osseux 43
Figure 14 : modèle de Ventuni 44
Figure 15 : modèle de Labe 46
Figure 16 : impact scooter - voiture (travaux de Serre et al.) 47
Figure 17 : modèle dans son ensemble 58
Figure 18 : vue latérale du modèle en ayant extrait l'os coxal gauche 59
Figure 19: différentes épaisseurs de la corticale des ailes iliaques 59
Figure 20 : corridor expérimental et courbe d'efforts - impact latéral. Le trait vertical correspond à la survenue de la fracture. Le corridor expérimental est défini entre les courbes rouges (valeurs maximales) et bleue (valeur minimale). La courbe verte correspond au modèle. La zone encadrée correspond à la période d'analyse lésionnelle de l'urètre précédant la survenue d'une fracture. 61
Figure 21 : corridor expérimental et courbe d'efforts - impact antéro-postérieur. Le trait vertical correspond à la survenue de la fracture. Le corridor expérimental est défini entre les courbes rouges (valeurs maximales) et bleue (valeur minimale). La courbe verte correspond au modèle. La zone encadrée correspond à la période d'analyse lésionnelle de l'urètre précédant la survenue d'une fracture. 61
Figure 22 : expérimentation de Guillemot 63
Figure 23 : impact latéral recrée selon l'expérimentation de Guillemot 63
Figure 24 : courbe d'effort en fonction du temps (impact latéral) 64
Figure 25 : déplacement de l'urètre (vue frontale) à t=0; t=3.9; t=8 ms (impact latéral) 64
Figure 26 : étirement de l'urètre en fonction du temps (impact latéral) 65
Figure 27 : expérimentation de Masson (impact antéro-postérieur) 66
Figure 28 : vue de profil avec 1/2 bassin droit retiré (impact antéro-postérieur) 67

Figure 29 : courbe d'effort (impact antéro-postérieur) 67
Figure 30 : modification du cadre osseux / temps (impact antéro-postérieur) 68
Figure 31 : déplacement de l'urètre en vue de profil (impact antéro-postérieur) 68
Figure 32 : modèle d'impact de Serre et al. (impact scooter-voiture) 69
Figure 33: vue postérieure (A) et supérieure (B) (impact scooter-voiture) 70
Figure 34 : vue frontale - déplacement du bassin (impact scooter-voiture) 70
Figure 35 : vue antéro-latérale . Déplacement de l'urètre / temps (impact scooter-voiture) 71

Tableau 1 : liste des éléments reconstruits et correspondance anatomique p 23

Tableau 2 : classification de Tile [20] p 27

Tableau 3 : lésions urétrales constatées selon la classification de Tile p 34

Tableau 4 : paramètres dans les 3 dimensions pour création du modèle géométrique p 51

Tableau 5 : paramètres biomécaniques et lois matériaux p 55

Tableau 6 : type d'interfaces utilisées dans le modèle p 56

Références

[1] Rapport de l'office national de la sécurité routière du 20 juin 2011. Mortalité routière en 2010.

[2] www.maids.study.eu

[3] de Rome L, Ivers R, Haworth N, Heritier S, Du W, Fitzharris M. Novice riders and the predictors of riding without motorcycle protective clothing. Accid Anal Prev. 2011;43:1095-103.

[4] Stein DM, O'Connor JV, Kufera JA, Ho SM, Dischinger PC, Copeland CE, et al. Risk factors associated with pelvic fractures sustained in motor vehicle collisions involving newer vehicles. J Trauma 2006 ;61:21-30.

[5] Demetriades D, Karaiskakis M, Velmahos GC, Alo K, Murray J, Chan L. Pelvic fractures in pediatric and adult trauma patients: are they different injuries. J Trauma 2003;54:1146-51.

[6] Geeraerts T, Chhor V, Cheisson G, Martin L, Bessoud B, Ozanne A, Duranteau J. Clinical review: initial management of blunt pelvic trauma patients with haemodynamic instability. Crit Care 2007;11:204.

[7] Andrich DE, Day AC, Mundy AR. Proposed mechanisms of lower urinary tract injury in fracture of the pelvic ring. BJU Int 2007;100:567-73.

[8] Bordenave M, Rouprêt M, Taksin L, Parra J, Cour F, Richard F, et al. Long-term results of the treatment of urinary incontinence with bulbar implantation of artificial urinary sphincter in men: A single-center experience. Prog Urol 2011;21:277-82.

[9] Paparel P, Badet L, Tayot O, Fessy MH, Bejui J, Martin X. Mechanisms and frequency of urologic complications in 73 cases of unstable pelvic fractures. Prog Urol 2003;13:54-9.

[10] Jeong SH, Park SJ, Kim YH Efficacy of urethral catheterisation with a hydrophilic guidewire in patients with urethral trauma for treating acute urinary bladder retention after failed attempt at blind catheterisation. Eur Radiol 2011 Sep 29. [Epub ahead of print]

[11] Kullgren A, Lie A, Tingvall C. Comparison between Euro NCAP test results and real-world crash data. Traffic Inj Prev 2010;11:587-93.

[12] De Lange R, Van Rooij L, Mooi H, Wismans JJ. Objective biofidelity rating of a numerical human occupant model in frontal to lateral impact.Stapp Car Crash J 2005;49:457-79.

[13] Tropiano P, Thollon L, Arnoux PJ, Huang RC, Kayvantash K, Poitout DG, et al. Using a finite element model to evaluate human injuries application to the HUMOS model in whiplash situation. Spine (Phila Pa 1976) 2004;15:1709-16.

[14] Cabrol. Anatomie Humaine. Eds Masson (Paris)

[15] Bensalah K, Manunta A, Guillé F, Patard JJ. Diagnosis and management of posterior urethra disruptions. Ann Urol(Paris) 2006 ;40 :309-16.

[16] Arenas MI, Romo E, Royuela M,Ruiz A, Fraile B, Sanchez-Chapado M, Paniagua R. Morphometric evaluation of the human prostate. International Journal of Andrology 2001;24:37-47.

[17] Berry Sj, Coffey DS, Walsh P, Ewing LL. The development of human benign prostatic hyperplasia with age. J Urol 1984;132:474-9.

[18] Jakobsen H, Torp-pedersen S, Juul N. Ultrasonic evaluation of age-related human prostatic growth and development of benign prostatic hyperplasia. Scan J Urol Nephrol Suppl 1988;107:26-31.

[19] Thouzet P. “Traumatismes du bassin et de la hanche chez l’enfant”. Conférences d’enseignement de la Sofcot. 1994 ;4 :121-36.

[20] Tile M. Pelvic ring fractures: should they be fixed. J Bone Joint Surg Br 1988;70:1-12.

[21] Koraitim MM, Marzouk ME, Atta MA, Orabi SS. Risk factors and mechanism of urethral injury in pelvic fractures. Br J Urol 1996;77:876-80.

[22] Mathur R, Aggarwal G, Satsangi B, Khan F, Odiya S. Prognosis of urethral strictures following pelvic fracture urethral distraction defects – a single centre study. Int J Surg 2011;9:68-71.

[23] Zingg EJ, Casanova GA, Isler B et al. pelvic fractures and traumatic lesions of the posterior urethra. Eur Urol 1990;18:27-32.

[24] Pokorny M, pontes JE, Pierce JM jr. Urological injuries associated with pelvic trauma. J Urol 1979;121:455-7.

[25] Colapinto V, McCallum RW. Injury to the male posterior urethra in fractured pelvis: a new classification. J Urol 1977;118:575-80.

[26] Goldman S, Sandler C, Corriere J, Mc Guire E. Blunt urethral trauma. An unified, anatomical mechanical classification. J Urol 1997;157:85-89.

[27] Guille F, Cippola B, el Khader K, Lobel B. Early endoscopy realignment for complete traumatic rupture of the posterior urethra – 21 patients. Acta Urol Belg 1998;66:5-58.

[28] Onen A, Subasi M, Arslan H, Ozen S, Basuguy E.Long-term urologic, orthopedic, and psychological outcome of posterior urethral rupture in children. Urology 2005 ;66:174-9.

[29] Aggarwal SK, Sinha SK, Kumar A, Pant N, Borkar NK, Dhua A. Traumatic strictures of the posterior urethra in boys with special reference to recurrent strictures. J Ped Urol 2011;7:356-62.

[30] Uhl JF, Park JS, Chung MS, Delmas V. Three-dimensional reconstruction of urogenital tract from Visible Korean Human. Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol 2006;288:893-9.

[31] Brooks JD, Chao WM, Kerr J. Male pelvic anatomy reconstructed from the visible human data set. J Urology 1998;159:868-72.

[32] Venuti JM, Imielinska C, Molholt P. New views of male pelvic anatomy: role of computer-generated 3D images. Clin Anat 2004;17:261-71.

[33] Behr M, Arnoux PJ, Serre T, Bidal S, Kang HS, Thollon L, et al. A human model for road safety: from geometrical acquisition to model validation with radioss. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2003;6:263-73.

[34] Haug E, Choi H Y, Robin S, et al. Handbook of Numerical Analysis, Vol XII: Computational Models for the Human Body - Human Models for Crash and Impact Simulation [M]. Atlanta: Elsevier, 2004: 297-361.

[35] Labe A. Etude des mécanismes lésionnels de la région abdomino-pelvienne. Application à la traumatologie virtuelle et à la sécurité routière. Thèse du Laboratoire de Biomécanique Appliquée. Université de la Méditerranée (France) 2008.

[36] Masson C, Baqué P, Brunet C. Biomechanical response of impacted bony pelvis : influence of the morphometry and bone density. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2010;13:641-6.

[37] Majunder SS, Roychowdhury A, Pal S. Effects of body configuration on pelvic injury in backward fall simulation using 3D finite element models of pelvis-femur-soft tissue complex. J Biomech. 2009 42:1475-82.

[38] Delotte J, Behr M, Thollon L, Arnoux PJ, Baque P, Bongain A, et al. Pregnant woman and road safety: a numerical approach. Application to a restrained third trimester pregnant woman in frontal impact. J Gynecol Obstet Biol Reprod (Paris) 2007;36:577-81.

[39] Serre T, Masson C, Perrin C, Martin JL, Moskal A, Llari M. The motorcyclist impact against a light vehicle : Epidemiological, accidentological and biomechanical analysis. Accid Anal Prev 2011; In Press

[40] Bidal S . Reconstruction tridimensionelle d'éléments anatomiques et génération automatiques de maillages elements finis optimizes. Thèse de l'université de la Méditerranée (France). 2003

[41] Du bois P 2005. The influence of mesh quality on the accuracy and sensitivity of crashworthiness simulations. IRUC – Communication orale

[42] Jundt G . Modèle d'endommagement et de rupture des matériaux biologiques. Thèse de l'Université de la Méditerranée (France). 2007

[43] Bourdin X , Trosseille X, Petit P, Beillas P. Comparison of tetrahedral and hexaedral meshes for organ finite element modeling : an application to kidney impact. 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicle. 2007 (june 18-21), Lyon (France).

[44] Guillemot H. Etude biomécanique du basin en choc latéral automobile. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, centre de Paris (France).1997

[45] Silber JS, Flynn JM, Koffler KM, Dormans JP, Drummond DS. Analysis of the cause, classification, and associated injuries of 166 consecutive pediatric pelvic fractures. J Pediatr Orthop. 2001 ;21:446-50.

[46] Orabi S, Badawy H, Saad A. Post-traumatic posterior urethral strictures in children: how to achieve a successful repair. J Ped Urol 2008;4:290-4.

[47] Kosola S, Salminen P, Laine T. Heading for a fall – Moped and scooter accidents from 2002 to 2007. Scand J Surgery 2009;98:175-9.

[48] Gokcen EC, Burgess AR, Siegel JH, Mason-Gonzalez S, DischingerPC, Ho SM. Pelvic fracture mechanism of injury in vehicular trauma patients. J Trauma 1994;36:789-95.

[49] De Peretti F, Cambas PM, Hovorka I, Veneau B, Argenson C. Motorcycle petrol tanks and their role in severe pelvic injuries. Injury 1994;25:223-5.

[50] Khoury A, Kreder H, Skrinskas T, Hardisty M, Tile M, Whyne CM. Lateral compression fracture of the pelvis represents a heterogeneous group of complex 3D patterns of displacement. Injury 2008;39:893-902.

[51] Baqué P, Trojani C, Delotte J, Séjor E, Senni-Buratti M, Baqué F, et al. Anatomical consequences of « open-book » pelvic ring disruption : a cadaver experimental study. Surg Radiol Anat 2005;27:487-90.

[52] Mundy AR, Andrich DE. Pelvic fracture-related injuries of the bladder neck and prostate: their nature, cause and management. BJU Int 2010;105:1302-8.

[53] Yang KH, Hu J, White NA, King AI, Chou CC, Prasad P. Development of numerical models for injury biomechanics research: a review of 50 years of publications in the Stapp Car Crash Conference. Stapp Car Crash J 2006;50:429-90.

[54] Ruan JS, El-Jawahri R, Rouhana SW, Barbat S, Prasad P. Analysis and evaluation of the biofidelity of the human body finite element model in lateral impact simulations according to ISO-TR9790 procedures. Stapp Car Crash J 2006;50:491-507.

[55] Arnoux PJ, Serre T, Cheynel N, Thollon L, Behr M, Baque P, et al. Liver injuries in frontal crash situations a coupled numerical - experimental approach. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2008;11:189-203.

[56] Behr M, Thollon L, Arnoux PJ, Serre T, Berdah SV, Baque P, et al. 3D reconstruction of the diaphragm for virtual traumatology. Surg Radiol Anat 2006;28:235-40.

[57] Snedeker JG, Muser MH, Walz FH. Assesment of pelvis and upper leg injury risk in car-pedestrian collisions: comparison of accident statistics, impactor tests and a human body finite element model. Stapp Car Crash J 2003;47:437-57.

[58] Well D, Yang H, Houseni M, Iruvuri S, Alzeair S, Sansovini M, et al. Age-related structural and metabolic changes in the pelvic reproductive end organs. Semin Nucl Med 2007;37:173-8.

[59] Prantil RL, Jankowski RJ, Kaiho Y, de Groat WC, Chancellor MB, Yoshimura N, Vorp DA. Ex vivo biomechanical properties of the female urethra in a rat model of birth trauma. Am J Physiol Renal Physiol 2007;292:F1229-37.

[60] Idzenga T, Pel JJ, van Mastrigt R. A biophysical model of the male urethra: comparing viscoelastic properties of polyvinyl alcohol urethras to male pig urethras. Neurourol Urodyn 2006;25:451-60.

[61] Mouraviev VB, Santucci RA. Cadaveric anatomy of pelvic fracture urethral distraction injury: most injuries are distal to the external urinary sphincter. J Urol 2005 ;173:869-72.