

Université de Montréal

Prédicteurs de l'issue neurologique : adapter la conduite chirurgicale chez les blessés  
médullaires thoraco-lombaires

Par Julien Goulet

Programme de cycles supérieurs en Sciences Biomédicales  
Faculté de Médecine

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de M. Sc. en Sciences Biomédicales  
option Musculosquelettique

Août 2020

© Julien Goulet, 2020



*Ce mémoire intitulé*

**Prédicteurs de l'issue neurologique : adapter la conduite chirurgicale chez les  
blessés médullaires thoraco-lombaires**

*Présenté par*  
**Julien Goulet**

*A été évalué par un jury composé des personnes suivantes*

**Marie-Lyne Nault**  
Président-rapporteur

**Jean-Marc Mac-Thiong**  
Directeur de recherche

**Bernard Larue**  
Membre du jury

## Résumé

Les lésions traumatiques de la moelle épinière entraînent de graves conséquences d'un point de vue personnel, physique et social chez les individus qui en sont victimes. La prise en charge médicale et chirurgicale de ces patients évolue au fil de l'amélioration des connaissances sur ce qui favorise la récupération neurologique et la qualité de vie à long terme.

Pour le chirurgien du rachis, les facteurs modifiables qui influencent de façon significative l'issue neurologique à long terme chez les blessés médullaires thoraco-lombaires sont peu explorés dans la littérature. Le délai entre le trauma et l'exécution du geste chirurgical est un de ces facteurs, mais la définition de chirurgie précoce chez cette population spécifique demeure à être objectivée. De plus, il n'y a pas de paramètres sur le scan préopératoire ayant été décrit pour aider la prise en charge en fonction de l'issue neurologique à long terme. L'objectif général de ces travaux est de préciser ce qui influence la récupération neurologique chez les patients paraplégiques ayant subi une fracture dans la région thoraco-lombaire et évaluer l'impact de la morphologie de la fracture sur l'effet du délai entre le traumatisme et la chirurgie de décompression et de stabilisation de la colonne vertébrale.

Le premier volet de ce mémoire concerne l'étude du seuil de délai chirurgical associé à une récupération neurologique optimale. Pour ce faire, une étude clinique rétrospective a été menée en évaluant plusieurs issues neurologiques à long terme chez une cohorte prospective de 35 patients blessés médullaires secondairement à un traumatisme vertébral de la région thoraco-lombaire. Déterminer de façon objective le seuil de délai optimal pour la récupération neurologique a été possible en utilisant une méthode statistique faisant intervenir des modèles de prédiction sous la forme d'arbres décisionnels élaborés par partition objective récursive. Cette méthode a démontré que la chirurgie de décompression et de stabilisation entreprise dans les 21 heures suivant le moment du traumatisme augmente la probabilité d'améliorer l'état neurologique 12 mois après le traumatisme, en termes de sévérité (grade) de la lésion et du niveau neurologique.

Le deuxième volet du mémoire concerne l'étude de la morphologie de la fracture la plus commune de la région thoraco-lombaire, la fracture de type « burst ». De nombreux paramètres radiologiques sont connus et définissent ce type de fracture mais aucun n'a été bien évalué en fonction de la récupération neurologique à long terme. Une deuxième étude clinique rétrospective implique l'étude du scan préopératoire à la recherche de paramètres reliés à l'issue neurologique chez les blessés médullaires avec atteinte motrice sévère. Trois caractéristiques morphologiques fortement associées à la récupération ont été identifiées : la présence d'une fracture complète de la lame, le recul de plus de 4 mm de la portion inférieure du mur postérieur du corps vertébral et la présence de comminution du fragment de corps vertébral rétropulsé dans le canal spinal. Ces paramètres sont des facteurs de pronostic défavorable de récupération neurologique plus importants que l'atteinte neurologique initiale ou l'estimation du degré d'énergie impliquée durant le traumatisme. Puisque ces paramètres décrivent la géométrie du canal spinal endommagé lors d'une fracture de type « burst », ils offrent un reflet de l'énergie locale dissipée dans le canal spinal et transmise aux éléments neuraux.

Le troisième volet du mémoire implique l'intégration des nouvelles connaissances issues des deux articles présentés, à la recherche de l'influence de certains paramètres morphologiques sur l'effet de la chirurgie précoce sur la récupération neurologique. Les analyses complémentaires effectuées sur la cohorte de patients atteints de fracture de type « burst » n'ont pas démontré que l'avantage procuré par une chirurgie de décompression et stabilisation précoce était modifié ou altéré par la présence d'un des paramètres démontrés comme importants d'un point de vue neurologique.

Ces travaux permettent de mieux guider le chirurgien du rachis dans la planification du geste chirurgical de par une meilleure compréhension des facteurs prédictifs de l'issue neurologique à long terme. En déterminant un seuil de délai objectif optimal de 21 heures, ils permettent d'établir une recommandation pour la définition même de la chirurgie précoce chez le blessé médullaire thoraco-lombaire. Ils proposent également une base pour l'étude subséquente de nouveaux paramètres clés quantifiables sur le scan préopératoire, un examen essentiel et disponible chez tous les patients, et de leur relation potentielle avec

le choix de l'approche chirurgicale idéale ainsi qu'avec de multiples issues neurologiques et non-neurologiques.

Mots-clés : colonne vertébrale, moelle épinière, traumatisme, lésion médullaire, fracture thoraco-lombaire, paramètres morphologiques, délai chirurgical, prédiction de l'issue neurologique

## **Abstract**

Traumatic spinal cord injury (TSCI) is a debilitating condition that leads to many adverse consequences on a personal, physical and social standpoint for the injured victim. Medical and surgical care evolved along with the progression of understanding regarding what factors lead to better neurological recovery and overall quality of life in paralyzed patients.

With respect to surgical care, modifiable factors significantly related to neurological recovery in thoracolumbar TSCI are not well known. In this regard, the optimal timing threshold for surgical spinal decompression and stabilization has not been demonstrated objectively. Moreover, there are no radiological parameter on the pre-operative computed tomography scan (CT scan) that have been shown to predict long term neurological outcome. The main goal of the presented work is to provide precise identification of such factors, and therefore evaluate the impact of the spine fracture specific morphological features on the effect of early surgical care.

The first part involves the assessment of the optimal surgical timing threshold for neurological recovery. A retrospective clinical study was conducted to evaluate several neurological outcome measures in a prospective cohort of 35 thoracolumbar TSCI patients. Thresholds were obtained from the elaboration of prediction models with the use of Classification And Regression Tree (CART) statistical analysis. The first article demonstrated that for optimal recovery of the neurological level of injury, a timing threshold of a maximum of 21 hours should ideally be respected between the traumatic event and the beginning of the surgical intervention.

The second part encompasses the study of the morphology of the fractured vertebrae in thoracolumbar burst fractures. Many radiological descriptors are used to describe these severe spine compression injuries but few have been evaluated with regards to neurological recovery. A second retrospective clinical study was conducted and associated a thorough examination of the preoperative CT scan reconstructions to the assessment of long term neurological outcome. Three morphologic parameters were found to be linked to poor

prognostic of neurological recovery: complete lamina fracture, comminution of the posteriorly retracted fragment and vertebral body postero-inferior corner translation of 4 mm or more. Such features, all three describing the disrupted anatomy of the spinal canal, could be potential indicators of the amount of energy locally dissipated to the neural elements. These parameters were found to be more important to predict neurological outcome than the initial neurologic examination and global trauma energy indicators.

The third part integrates the notions derived from the two presented studies and aims to assess for the influence of the presence of specific fracture parameters on the effect of early surgery regarding neurological outcome. Additional analyses did not show that the advantage of early surgery, defined in the first article, was influenced by the presence of any of the relevant fracture features demonstrated in the second article.

Therefore, this work emphasizes on the importance of early surgery for better neurological recovery and serves to guide the surgeon in planning the timing of the intervention. Defining the concept of early surgery is key in implementing future retrospective or prospective research protocols. It also highlights the importance of new morphological features of the most common type of thoracolumbar fracture. It sets standards for further research involving preoperative CT scan parameters and their potential relationship with surgical approach, neurological and non-neurological outcomes.

Key words : spine, spinal cord, trauma, spinal cord injury, thoracolumbar fracture, morphological parameters, surgical timing, neurological outcome prediction



## Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Résumé  | 4  |
| Abstract  | 7  |
| Table des matières                                | 9  |
| Liste des tableaux                                | 12 |
| Liste des figures                                 | 14 |
| Liste des abréviations                            | 16 |
| Liste des annexes                                 | 17 |
| Chapitre 1 Introduction                           | 18 |
| Chapitre 2 Revue de la littérature                | 21 |
| Chapitre 3 Problématique, hypothèses et objectifs |    |
| 3.1 Synthèse de la problématique                  | 35 |
| 3.2 Hypothèses et objectifs                       |    |
| 3.2.1 Volet 1 « délai chirurgical »               | 36 |
| 3.2.2 Volet 2 « paramètres »                      | 36 |
| 3.2.3 Volet 3 Hypothèse complémentaire            | 37 |
| 3.3 Approche générale                             | 37 |
| Chapitre 4 Matériel et méthodes                   | 38 |

## Chapitre 5 Article 1

|   |    |
|---|----|
| 5.1 Situation et description de l'article 1   | 42 |
| 5.2 Article 1: The use of classification and regression tree analysis to identify the optimal surgical timing for improving neurological outcomes following motor-complete thoracolumbar traumatic spinal cord injury |    |
| 5.2.1 Abstract  | 43 |
| 5.2.2 Introduction  | 45 |
| 5.2.3 Methods   | 46 |
| 5.2.4 Results   | 49 |
| 5.2.5 Discussion  | 53 |
| 5.2.6 Conclusion  | 55 |
| 5.2.7 References  | 56 |

## Chapitre 6 Article 2

|   |    |
|---|----|
| 6.1 Situation et description de l'article 2   | 60 |
| 6.2 Article 2: Morphological features of thoracolumbar burst fractures associated with neurological outcome in traumatic spinal cord injury |    |
| 6.2.1 Abstract  | 61 |
| 6.2.2 Introduction  | 62 |
| 6.2.3 Methods   | 63 |
| 6.2.4 Results   | 67 |
| 6.2.5 Discussion  | 71 |
| 6.2.6 Conclusion  | 74 |
| 6.2.7 References  | 75 |

## Chapitre 7 Analyse complémentaire

79

## Chapitre 8 Discussion générale

|                  |    |
|------------------|----|
| 8.1 Discussion   | 83 |
| 8.2 Limitations  | 91 |
| 8.3 Perspectives | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| Chapitre 9 Conclusion et recommandations   | 98  |
| Bibliographie  | 99  |
| Annexe A Article 3   |     |
| A.1 Situation et description de l'article 3  | 113 |
| A.2 Article 3 : Dynamics of spinal cord compression with different patterns of thoracolumbar burst fractures: numerical simulations using finite element modelling |     |
| A.2.1 Abstract   | 114 |
| A.2.2 Introduction   | 115 |
| A.2.3 Methods  | 116 |
| A.2.4 Results  | 123 |
| A.2.5 Discussion   | 128 |
| A.2.6 Conclusion   | 131 |
| A.2.7 Authorship contribution statement and acknowledgements   | 132 |
| A.2.8 References   | 132 |
| Annexe B Système de classification AOSpine du trauma vertébral thoraco-lombaire  |     |
|  | 138 |
| Annexe C Normes internationales pour la classification neurologique des lésions médullaires  |     |
|  | 139 |
| Annexe D Tableau de classification des prédicteurs de l'issue neurologique à long terme chez les blessés médullaire traumatiques                                   |     |
|  | 141 |

## Liste des tableaux

|  |            |
|--|------------|
| <b>Tableau 2.1</b> Résumé des descripteurs radiologiques de la fracture de type « burst » et des principales références menant à l'étude de l'issue neurologique   | <u>27</u>  |
| <b>Table 5.1:</b> Summary of outcomes and predictor variables considered   | <u>50</u>  |
| <b>Table 6.1:</b> Patient population demographic and clinical characteristics  | <u>68</u>  |
| <b>Table 6.2:</b> Neurological status at admission and follow-up   | <u>69</u>  |
| <b>Table 6.3:</b> Univariate binary logistic regressions with clinical variables and AIS grade conversion as outcome   | <u>69</u>  |
| <b>Table 6.4:</b> Univariate binary logistic regressions with morphological parameters and AIS grade conversion as outcome   | <u>70</u>  |
| <b>Tableau 7.1</b> : Données catégorisées et délai chirurgical des 25 patients de la série de l'article 1 ( 0 = absence ; 1 = présence)  | <u>80</u>  |
| <b>Tableau 7.2</b> : Analyse par tableaux croisés des paramètres morphologiques en relation avec la récupération d'un ou plusieurs NLI chez les patients opérés sous le seuil de 21,47 heures  | <u>81</u>  |
| <b>Tableau A.1</b> Meshing and materials features in the thoracolumbar FEM, with: E, Young's modulus (MPa); $\rho$ , Density ( $\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$ ); $\nu$ , Poisson's ratio; Cl, liquid bulk modulus (MPa); $\nu_l$ , shear kinematic viscosity ( $\text{mm}^2\cdot\text{ms}^{-1}$ ) | <u>117</u> |
| <b>Tableau A.2</b> Definition of factors for the factorial plan  | <u>121</u> |

**Tableau D.1** Tableau de classification des prédictors de l'issue neurologique à long terme  
chez les blessés médullaire traumatiques \_\_\_\_\_ 141

## Liste des figures

**Figure 2.1** Représentation graphique de la classification de l'AO pour la fracture de type « burst »

Image sous la licence « Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License » \_\_\_\_\_ 23

**Figure 2.2** Représentation graphique des catégories de comminution vertébrale selon la classification de McCormack et al \_\_\_\_\_ 24

**Figure 5.1** Maximal Canal Compromise (MCC) calculation formula, where  $D_a$  is the anteroposterior canal diameter one level above the injury site,  $D_i$  is the anteroposterior osseous canal diameter at the injury site, and  $D_b$  is the anteroposterior canal diameter one level below the injury site \_\_\_\_\_ 48

**Figure 5.2** Number of patients operated in surgical delay intervals \_\_\_\_\_ 50

**Figure 5.3** Classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least one AIS grade as the dependent variable, with corresponding p-value \_\_\_\_\_ 51

**Figure 5.4** Classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least one NLI as the dependent variable, with corresponding p-value \_\_\_\_\_ 52

**Figure 5.5** Classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least 10 points on the total MS as the dependent variable, with corresponding p-values \_\_\_\_\_ 53

**Figure 6.1** Morphological parameters assessed in article 2

A. An axial reconstruction demonstrating a non-comminuted retropulsed fragment

B. An axial reconstruction demonstrating a comminuted retropulsed fragment

- C. A sagittal reconstruction showing the segmental kyphosis angle ( $\theta$ ) and the anterior (x) and posterior (y) vertebral body height measurements
- D. A sagittal reconstruction showing the different mid-sagittal canal diameters used to calculate the MCC with the corresponding formulae
- E. An axial reconstruction with the arrow pointing to a complete lamina fracture
- F. A sagittal reconstruction with representation of the method used to measure the postero-inferior vertebral body corner translation 66

**Figure 8.1** Représentation schématique de la direction des fragments rétropulsés dans le canal spinal 96

**Figure A.1** Finite element model, with: T11, T12 and L1 vertebrae and their associated disks; DL, the denticulate ligaments; DM, the dura mater; GM, the gray matter; PM, the pia mater; WM, the white matter 118

**Figure A.2** Geometry of the fragments, with: SupL, the left superior fragment; SupR, the right superior fragment; Inf, the inferior fragment 120

**Figure A.3** Simulated stress-deformation diagrams for the spinal cord model validation compared to experimental results in transverse compression at a) 0.5 s<sup>-1</sup>, b) 5 s<sup>-1</sup> and 50 s<sup>-1</sup>, as well as in c) uniaxial tension 124

**Figure A.4** Sorted effects of factors and their interactions on a) von Mises Stress, b) Principal Strain, c) von Mises Strain, and d) Pressure. The vertical dashed line is the statistical significance threshold (p=0.05). Factor A relates to comminution of the superior fragment, factor B relates to the presence of an inferior fragment, factor C relates to the rotation of fragment and factor D relates to the initial retropulsion velocity of fragments 125

**Figure A.5** Cross sections of the model, exposing the distribution of VM stress and strain in the spinal cord (every factor set to +1) 127

## Liste des abréviations

### **Abréviations en français :**

AO : Association pour l'étude de la fixation interne (de l'allemand Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen)

FRQS : Fonds de Recherche du Québec - Santé

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

LTME : Lésion Traumatique de la Moelle Épineuse

### **Abréviations en anglais :**

AIS : American Spinal Injury Association Impairment Scale

ASIA : American Spinal Injury Association

AUC : Area Under the Curve

CART : Classification and Regression Tree Analysis

C.-I. : Confidence Interval

CT-scan : Computed Tomography scan

IQR : Interquartile Range

ISS : Injury Severity Score

ISNCSCI : International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury

LSC : Load Sharing Classification

MCC : Maximal Canal Compromise

MRI : Magnetic Resonance Imaging

MS : Motor Score

MSCC : Maximal Spinal Cord Compression

NLI : Neurological Level of Injury

NSCISC : National Spinal Cord Injury Statistical Center

OR : Odds Ratio

ROC : Receiver Operating Characteristic

SCI : Spinal Cord Injury

STASCIS : Surgical Timing in Acute Spinal Cord Injury Study

TSCI : Traumatic Spinal Cord Injury



## Liste des annexes

**Annexe A** Article 3: Dynamics of spinal cord compression with different patterns of thoracolumbar burst fractures: numerical simulations using finite element modelling \_\_\_\_\_ 110

**Annexe B** Système de classification AOSpine du trauma vertébral thoraco-lombaire Images sous la licence « Creative Commons Attribution-Non Commercial-No Derivatives 4.0 International License » \_\_\_\_\_ 134

**Annexe C** Normes internationales pour la classification neurologique des lésions médullaires \_\_\_\_\_ 135

**Annexe D** Tableau de classification des prédicteurs de l'issue neurologique à long terme chez les blessés médullaire traumatiques \_\_\_\_\_ 137

## Chapitre 1 Introduction

Les lésions traumatiques de la moelle épinière (LTME) sont liées à la présence d'une fracture vertébrale chez 64 % des cas (Pickett et al., 2006). Le trauma de la colonne vertébrale peut entraîner des lésions médullaires selon différents mécanismes en fonction du type et de la localisation de la fracture. La majorité des victimes de ces accidents sont jeunes et actives professionnellement (Wagnac et al., 2019), ce qui entraîne en conséquence des bouleversements personnels et sociétaux considérables (Berkowitz et al., 1998).

L'analyse la plus récente démontre qu'au Canada, le fardeau économique à vie pour les patients atteints de LTME varie entre 1,5 millions de dollars pour une paraplégie incomplète et 3 millions de dollars pour une tétraplégie complète. Le coût annuel basé sur une incidence d'environ 1400 cas s'élève ainsi à 2,67 milliards de dollars. La majorité des coûts (32,7 %) sont des coûts indirects générés par la nécessité de soins auxiliaires (Krueger et al., 2013). D'un point de vue social mais également individuel, il est nécessaire de poursuivre les efforts en recherche pour optimiser la récupération fonctionnelle, la qualité de vie et l'autonomie des victimes de ces lésions (Goulet et al., 2019).

Les LTME sont catégorisées selon la région de la colonne vertébrale atteinte. La lésion cervicale entraîne une tétraplégie. La lésion plus distale, thoracique ou lombaire, entraîne une paraplégie. De tous les patients victimes de LTME, la proportion de paraplégies varie entre 41,3 % et 46,0 % dans les pays industrialisés (Krueger et al., 2013 ; NSCISC, 2016 ; Mitchell et al., 2020). La région thoraco-lombaire, comprenant les segments entre la 10<sup>e</sup> vertèbre thoracique et la 2<sup>e</sup> vertèbre lombaire, est le siège de la majorité des fractures vertébrales entraînant une paraplégie (Kaminski et al., 2017).

Au niveau thoraco-lombaire, ces LTME surviennent souvent dans un contexte de polytraumatisme, où de nombreux systèmes sont mis à l'épreuve (Yue et al., 2017). Dans la très grande majorité des cas, l'expertise du chirurgien du rachis est requise pour stabiliser la colonne vertébrale et décompresser la moelle épinière.

Il y a consensus voulant que l'indication d'une chirurgie de décompression et de stabilisation soit posée dès qu'il y a déficit neurologique en lien avec fracture thoraco-lombaire (Glennie et al., 2017 ; van Middendorp et al., 2013). Le chirurgien étudie par la suite la morphologie pour juger de l'anatomie en planification du geste de décompression et de fixation nécessaire. Il planifie en examinant soigneusement les coupes et reconstructions du scan effectué en pré-opératoire. Également, il examinera différents paramètres dans le cadre de la planification de l'instrumentation à utiliser pour le montage de fixation ou dans le cadre de la prédiction de l'issue neurologique. Au meilleur de notre connaissance, il n'y a pas, dans la littérature, de consensus concernant l'utilisation des paramètres définis sur le scan pré-opératoire pour prédire l'issue neurologique à long terme. Le choix de l'imagerie diagnostique tomodensitométrie comme point de départ pour ces travaux est justifié car cela offre un médium d'étude avec paramètres quantifiables, reproductible entre les patients, nécessaire pour chacun et ainsi disponible dans le dossier radiologique de chacun. Ces travaux visent à bonifier les connaissances sur les facteurs prédictifs de l'issue neurologique à long terme dans ce contexte clinique précis, via une meilleure utilisation des données lorsque facilement et universellement disponibles. La prédiction de l'issue neurologique permet d'optimiser la communication et le partage d'information avec les patients et leur famille, de justifier des décisions de prise en charge et d'utilisation des ressources aux administrateurs du réseau de la santé et de créer des programmes de réhabilitation personnalisés en fonction des issues attendues (1 - Wilson et al., 2012).

Parallèlement, il y a plusieurs facteurs à prendre en considération dans le traitement des LTME secondaires à une fracture thoraco-lombaire. La majorité des facteurs impliqués sont non modifiables. Peu de facteurs modifiables sont à la portée du chirurgien de la colonne : la décision d'opérer ou non, la technique chirurgicale, et le délai entre l'évènement traumatique et le début de la chirurgie (Mputu et al., 2018). Le chirurgien du rachis est garant de différents rôles : il pose l'indication chirurgicale, prédit les différentes issues cliniques, planifie puis exécute la chirurgie et dirige le plan post-opératoire. Un des objectifs du chirurgien est de promouvoir et effectuer le meilleur traitement médical et chirurgical possible pour favoriser la récupération neurologique du patient paralysé, ou du

moins le protéger d'une aggravation. Il est donc primordial d'avoir des outils pour être en mesure de prédire l'impact des différentes actions à entreprendre et planifier en conséquence. Bien que l'importance d'une prise en charge chirurgicale rapide des blessés médullaires fait consensus pour l'amélioration de l'issue neurologique (Fehlings et al., 2010 ; Glennie et al., 2017), la littérature n'offre pas de définition claire quant à la notion de chirurgie précoce chez cette population de patients, tel que mentionné dans la revue systématique de El Teclé et al. publiée en 2016. Ainsi, les travaux présentés ici visent à optimiser la planification de la prise en charge chirurgicale avec comme objectif de déterminer le seuil de délai optimal à viser pour entreprendre la chirurgie, puis à vérifier si la présence de facteurs morphologiques au scan pré-opératoire influence l'effet d'une chirurgie précoce. Adapter la conduite du chirurgien pour optimiser les chances d'obtenir la meilleure récupération neurologique possible chez les patients atteints de LTME demeure l'élément central sur lequel est basé ce mémoire.

Ce mémoire se divise en 9 chapitres. Le chapitre 2 présente une revue des connaissances. Le chapitre 3 détaille la problématique et les objectifs du projet et le chapitre 4 décrit la méthodologie des deux articles scientifiques. Ceux-ci sont présentés séparément aux chapitres 5 et 6. Le chapitre 7 présente les résultats de l'analyse complémentaire qui intègre les notions des deux articles. Une discussion générale et une conclusion terminent ce mémoire aux chapitres 8 et 9 respectivement. L'annexe A présente un troisième article, issu de la collaboration entre cliniciens et ingénieurs, pour démontrer l'impact des travaux présentés dans ce mémoire sur les suites de la recherche et la translation des découvertes vers l'étude numérique.

## Chapitre 2 Revue de la littérature

### Fractures thoraco-lombaires : concepts

La région thoraco-lombaire se situe à la jonction de la colonne thoracique et de la colonne lombaire. Elle comprend les segments vertébraux compris entre la 10<sup>e</sup> vertèbre thoracique et la 2<sup>e</sup> vertèbre lombaire (Vaccaro et al., 2014 ; Tan et al., 2020). Ce segment comporte la zone de transition entre la cyphose physiologique thoracique et la lordose physiologique lombaire. Cette zone de transition est également caractérisée par le changement d'une zone relativement rigide crânialement vers une zone progressivement plus mobile caudalement. Les contraintes subies par cette région sont donc uniques et les types de lésions potentielles suites à un trauma sont multiples.

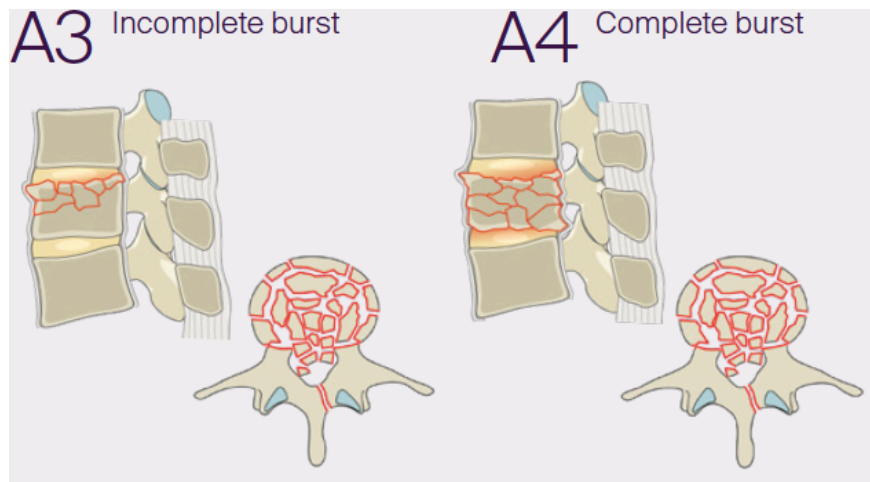
Parce que chaque accident est unique, chaque fracture résultante est différente et sa morphologie ainsi que sa sévérité dépend d'un très grand nombre de facteurs. Par contre, les schémas de classification couramment utilisés permettent de discriminer et regrouper certains types de fractures en des catégories prédéterminées de par leur similitude, ce qui permet de faciliter la communication entre intervenants ainsi que le développement de rationnelle de traitement et l'exploration des issues cliniques spécifiques à chacune. La classification la plus répandue est celle de l'AO Spine Classification Group (Reinhold et al., 2013), (Annexe B) qui sépare les fractures selon le mécanisme lésionnel, nommément compression axiale (type A, rupture des éléments antérieurs), flexion-distriction (type B, rupture des éléments contraignants postérieurs) ou translation-rotation (type C, rupture des éléments antérieurs et postérieurs, menant à un déplacement). Chacune de ces catégories est par la suite divisée en sous-types en ordre croissant de sévérité.

D'autres termes œuvrant à décrire des sous-types de ces fractures sont couramment utilisés dans le domaine chirurgical. Parmi ceux-ci, le terme « fracture de type burst » apparaît dans la littérature médicale au début des années 1970 et est décrite comme une fracture comminutive du corps vertébral résultant de la compression axiale verticale sur une colonne lombaire légèrement fléchie (Holdsworth, 1970). Denis (Denis, 1983) ajuste la

définition en ajoutant, dans sa classification des fractures thoraco-lombaires par 3 colonnes, le concept de la colonne moyenne. Il précise ainsi l'importance de la fracture du mur postérieur du corps vertébral ainsi que son recul vers le canal spinal et décrit cinq sous-types en fonction de l'atteinte des plateaux vertébraux et de la déformation résiduelle sur la radiographie antéropostérieure.

Encore davantage de sous-types furent décrits par Magerl et al (Magerl et al., 1994) dans la version originale de la classification de l'AO. Les concepts de « burst » incomplet, « burst-split » et « complet », avec 3 sous-types chacun, furent ajoutés. Les caractéristiques communes y demeurent inchangées, hormis une précision : s'il y a une atteinte de l'arc osseux postérieur, on la décrit comme une fracture verticale de la lame ou du processus épineux, sans impact sur la stabilité de la fracture. Le « burst » incomplet comporte un plateau vertébral intact. Le « burst-split » comporte une fracture longitudinale, dans le plan sagittal, du plateau vertébral non-comminutif. Le « burst » complet implique une comminution de tout le corps vertébral. Les 9 sous-types résultants de cette classification furent remplacés dans la version contemporaine par deux catégories, simplifiées : la fracture « burst » correspond désormais aux sous-types A3 et A4 de la classification de l'AO, respectivement « burst » incomplet et « burst » complet (Figure 2.1)

Bien qu'il existe un lien global entre le mécanisme lésionnel et le potentiel de sévérité de l'atteinte neurologique initiale, avec le type C (translation-rotation) comportant le plus de risque d'atteinte sévère à la présentation, les types de mécanisme lésionnel ne permettent pas une prédiction individualisée de la récupération neurologique. Ainsi, les caractéristiques radiologiques de la fracture en compression de type « burst », à laquelle s'intéresse la majeure partie de ces travaux, méritent d'être explorées en davantage de détails.

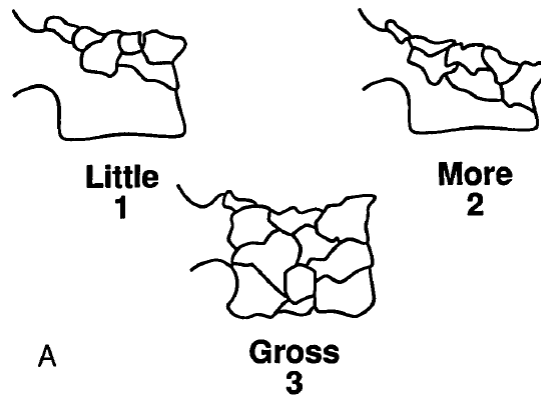


**Figure 2.1** Représentation graphique de la classification de l'AO pour la fracture de type « burst »

### **Descripteurs radiologiques : fracture de type « burst »**

Plusieurs trouvailles radiologiques sont utilisées pour détailler la fracture de type « burst ». Plusieurs d'entre elles ont été décrites à partir des radiographies simples orthogonales du rachis thoraco-lombaire. (Nicoll, 1949 ; Denis, 1983). L'atteinte comminutive du corps vertébral est le principal paramètre radiologique qui sous-tend le diagnostic de la fracture de type « burst ». McCormack, (McCormack et al., 1994) a publié une classification nommée « Load Sharing Classification (LSC) » dans le but de prédire l'échec potentiel des vis pédiculaires dans les montages de fixation postérieurs courts, en évaluant l'étalement des fragments du corps vertébral, la quantité de correction de la cyphose locale et la comminution du corps vertébral. Il propose, au sein de la LSC, de distinguer trois catégories de comminution: < 30 % , entre 30 et 60 % et plus de 60 % du corps vertébral (Figure 2.2). Bien que la fiabilité intra et inter-observateur de la LSC dans son ensemble soit établie comme étant au mieux modérée, la fiabilité de l'évaluation de la comminution fut démontrée excellente lorsque prise de façon individuelle (Dai et al., 2005 ; Elzinga et al., 2012). Il s'agit d'une catégorisation utile dans la planification de la rigidité nécessaire d'un montage de fixation, mais ce paramètre n'a jamais été évalué en regard de

l'atteinte neurologique initiale ; son rôle envers la récupération neurologique des patients est également inconnu.



**Figure 2.2** Représentation graphique des catégories de comminution vertébrale selon la classification de McCormack (McCormack et al., 1994)

Sur la radiographie simple antéro-postérieure, la comparaison entre la distance interpédiculaire du niveau lésé et celles des vertèbres sus et sous-jacente est également un signe classique démontrant une fracture en compression axiale d'une plus grande sévérité. Ce signe fut décrit de façon concomitante avec l'écartement des processus articulaires et la fracture de la lame, dite de « nécessité » (Denis, 1983). Les études précliniques démontrent que l'élargissement de la distance interpédiculaire est un phénomène dynamique, avec pour initiateur potentiel l'effet de mise en compression violente des processus articulaires (Brandolini et al., 2014) lors de l'évènement traumatique. La magnitude de l'écartement des pédicules corrèle avec la présence de fracture de la lame (Caffaro et al., 2012).

Différents types de fracture de lame ont été décrits dans la littérature. La majorité des études se concentrent sur la présence (fracture complète ou incomplète) ou absence de la fracture (Tisot et al., 2009 ; Skiak et al., 2015 ; Xu et al., 2018). Il est suggéré que la pathogenèse de la fracture complète de la lame soit expliquée par la complétion d'une fracture en boisvert de l'arc postérieur, entraînée par l'écartement latéral des pédicules (Ozturk et al., 2006). Les études biomécaniques ajoutent que la fracture de la lame se produit lorsque



davantage de contraintes en compression sont subies par la portion postérieure de la vertèbre (Panjabi et al., 2001).

La fracture de la lame fut également décrite comme cause potentielle de brèche durale en per-opératoire (Cammisa et al., 1989 ; Aydinli et al., 2001). En effet, la distraction du trait fracturaire pendant l'évènement traumatique fut suggérée comme cause de séquestration d'un feuillet de dure-mère, comprenant parfois des racines. Il s'agit donc d'une caractéristique à prendre en compte dans l'approche chirurgicale et dans la séquence de décompression. Par contre, bien que le lien entre la présence d'une fracture de la lame et la sévérité de l'atteinte neurologique initiale ait été démontré (Caffaro 2012), aucune étude n'a adressé le lien potentiel de ce facteur avec l'issue neurologique à long terme.

Un autre descripteur radiologique reconnu par les études biomécaniques pour être le reflet final d'un phénomène dynamique est le recul du mur postérieur (Panjabi et al., 2001 ; Wilcox et al., 2003). Cet indice est davantage appréciable sur un examen tomodensitométrique ou par résonance magnétique. La magnitude de la rétropulsion peut être évaluée en tenant compte du diamètre du canal spinal en mid-sagittal (MCC, Maximal Canal Compromise) (Figure 5.1), par sa conséquence sur les éléments neuraux (MSCC, Maximal Spinal Cord Compression) (Furlan et al., 2007) ou par le calcul de l'aire transverse du canal spinal au niveau lésé (Yugué et al., 2011).

Il persiste une controverse concernant le rôle du MCC comme indicateur de sévérité de la LTME en thoraco-lombaire (Meves et al., 2006). Alors que certains auteurs démontrent un lien entre la récupération neurologique et le MCC (Magu et al., 2015), la majorité des études contemporaines ne relèvent pas de telle relation (Fontijne et al., 1992 ; Mohanty et al., 2002 ; Dai et al., 2007 ; Gupta et al., 2014 ; Mabray et al., 2016, Skeers et al., 2018). L'importance du MCC comme facteur pronostic de l'issue neurologique demeure à être établie, de par l'inclusion de différents types de mécanismes traumatiques, le large spectre de sévérités de l'atteinte neurologique initiale et le faible temps de suivi clinique qui caractérisent les études citées.

Parallèlement, très peu a été écrit sur le recul de la portion inférieure du mur postérieur (Figure 6.1). Radcliff en a fait une description tomодensitométrique et a démontré une corrélation modérée ( $R = -0,379$ ,  $p = 0.009$ ) avec la sévérité de l'examen neurologique initial évaluée par le score moteur (MS) (Radcliff et al., 2012). Par contre, le lien entre le recul de la portion inférieure du mur postérieur et l'issue neurologique à long terme n'est pas établi.

L'évaluation des conséquences de la fracture sur le profil sagittal de la colonne thoracolumbaire est possible à l'aide de plusieurs mesures différentes (Keynan et al., 2006). La cyphose locale ou segmentaire (Figure 6.1) ainsi que la perte de hauteur de la portion antérieure du corps vertébral fracturé sont des paramètres souvent mentionnés par les radiologistes ; ces paramètres ont traditionnellement été cités dans les algorithmes de traitement, avec des seuils de 20 à 35 degrés de cyphose locale et 50 à 60 % de perte de hauteur comme critères d'instabilité donc de prise en charge chirurgicale (Reid et al., 1988 ; Benson et al., 1992 ; Hitchon et al., 1998). Une analyse contemporaine a démontré qu'une cyphose locale de plus de 20 degrés est associée à un plus grand risque de retrouver une atteinte des éléments ligamentaires postérieurs, sans y retrouver de lien significatif avec la perte de hauteur du corps vertébral (Hiyama et al., 2014). Ces études furent conduites sans égard à l'atteinte neurologique initiale ni au pronostic de récupération. La seule étude, à notre connaissance, ayant évalué l'importance de la cyphose segmentaire en regard de l'évaluation neurologique initiale et au suivi à long terme (chez des patients ayant bénéficié d'un geste de décompression chirurgicale) est celle de Dai et al., 2007. Ils ont démontré une absence de corrélation significative entre la cyphose segmentaire et la récupération neurologique à un minimum de 3 ans de suivi clinique, chez une population de 52 blessés médullaires avec une majorité (43/52) de lésions incomplètes. Par contre, la proportion de ces patients ayant reçu un traitement chirurgical conformément aux standards canadiens de délai chirurgical n'est pas précisée par les auteurs, et l'issue étudiée se limite à l'évaluation du taux de récupération de la fonction motrice (Glennie et al., 2017). Ainsi, le rôle du profil sagittal initial dans l'issue neurologique à long terme est encore sujet à débat.

Le tableau 2.1 présente un résumé des différents travaux clés ayant abordé les descripteurs radiologiques de la fracture de type « burst » en fonction de l'issue neurologique. Les travaux présentés à l'article 2 ont permis de mettre en lumière un nouveau descripteur radiologique, la comminution du fragment rétro pulsé, qui n'a été retrouvé dans aucune publication scientifique lors de la revue de la littérature. Il s'agit d'un paramètre morphologique clé dans l'évaluation du pronostic neurologique et sera décrit au chapitre 5.

| Descripteur radiologique       | Références  | Lien avec l'examen neurologique initial | Lien avec la récupération neurologique | Résumé   |
|--------------------------------|---|---|--|--|
| Comminution du corps vertébral | Denis, 1983<br>Magerl et al., 1994<br>McCormack et al., 1994  | Non étudié                              | Non étudié                             | Aucune étude ne liant la comminution du corps vertébral à l'issue neurologique   |
| Fracture de la lame            | Denis, 1983<br>Cammisa et al., 1989<br>Aydinli et al., 2001<br>Tisot et al., 2009<br>Caffaro et al., 2012<br>Xu et al., 2018  | Étudié                                  | Non étudié                             | La présence d'une fracture de la lame semble être associée à l'altération de l'examen neurologique initial                                 |
| MCC                            | Fontijne et al., 1992<br>Mohanty et al., 2002<br>Dai et al., 2007<br>Caffaro et al., 2012<br>Radcliff et al., 2012<br>Gupta et al., 2014<br>Magu et al., 2015<br>Mabray et al., 2016<br>Skeers et al., 2018 | Étudié                                  | Étudié                                 | Quoique débattu, la magnitude du MCC ne semble pas corrélée à l'examen neurologique initial ni à la récupération neurologique à long terme |

|  |  |            |            |  |
|--|--|------------|------------|--|
| Recul de la portion inférieure du mur postérieur | Radcliff et al., 2012                        | Étudié     | Non étudié | Une étude démontrant une corrélation modérée entre un seuil de recul de 3,5 mm et l'altération de l'examen neurologique initial          |
| Cyphose segmentaire                              | Dai et al., 2007<br>Radcliff et al., 2012    | Étudié     | Étudié     | Deux études réfutant la relation entre cyphose segmentaire et issue neurologique   |
| Cyphose locale                                   | Radcliff et al., 2012<br>Hiyama et al., 2014 | Étudié     | Non étudié | La cyphose locale n'est pas corrélée à l'examen neurologique initial. Aucune étude n'en évalue le rôle pour la récupération neurologique |
| Comminution du fragment rétro pulsé              | Nil  | Non étudié | Non étudié | Aucune étude ne mentionnant ce paramètre   |

**Tableau 2.1** Résumé des descripteurs radiologiques de la fracture de type « burst » et des principales références menant à l'étude de l'issue neurologique

### Évaluation neurologique des blessés médullaires

L'évaluation neurologique initiale est au cœur de la prise en charge des patients de la sphère traumatologie. Il est impératif de reconnaître un déficit neurologique dès l'admission d'un polytraumatisé, ou de le suspecter jusqu'à preuve du contraire chez le patient dont l'évaluation clinique est impossible, tel que précisé dans les protocoles de l'Advanced Trauma Life Support (ATLS, 2012). L'examen physique est conduit selon le International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury (ISNC-SCI) et les recommandations de l'American Spinal Injury Association (ASIA). Il comprend une

gradation numérique de la fonction musculaire (score moteur, Motor Score, MS) et sensibles des myotomes et dermatomes intéressant la moelle épinière et les racines de la queue de cheval. Il s'agit d'une évaluation objective qui doit être conduite par un professionnel de la santé et qui peut être répétée dans le temps afin de suivre l'évolution de la récupération neurologique. Décrites à l'annexe C, les différentes étapes de classification permettent d'obtenir le grade ASIA Impairment Scale (AIS) noté de A à E ainsi que le niveau neurologique correspondant. Le niveau neurologique (Neurologic Level of Injury, NLI) correspond au segment le plus caudal où les fonctions sensibles sont intactes et où la fonction motrice est au minimum antigravitaire, pour autant que celle-ci soit jugée normale à tous les segments proximaux. Le grade AIS A implique une lésion nerveuse cliniquement complète caractérisée par l'absence de fonction motrice et sensitive préservée aux segments sacrés S4-S5. Le grade B implique une lésion nerveuse motrice complète avec préservation de la fonction sensitive sous le NLI, incluant les segments sacrés S4-S5. Le grade C implique une lésion motrice incomplète où moins de la moitié des muscles clés sous le NLI permettent un mouvement antigravitaire. Le grade D implique une lésion motrice incomplète où la moitié ou plus des muscles clés sous le NLI permettent un mouvement antigravitaire. Le grade E indique que la fonction sensitive et motrice est normale pour tous les segments.

### **Prédicteurs de l'issue neurologique**

L'importance de l'examen neurologique initial comme facteur prédictif de la récupération neurologique est reconnue depuis longtemps dans la littérature (1 - Wilson et al., 2012). Plus de la moitié des études ayant évalué les facteurs cliniques hâtifs comme prédicteurs de l'issue neurologique à long terme ont reconnu l'examen neurologique initial comme le meilleur prédicteur (Mputu et al., 2018). Également, toutes les études ayant évalué l'impact de la sévérité de la lésion médullaire par l'examen clinique initial ont retrouvé une relation significative avec l'issue fonctionnelle chronique (1- Richard-Denis et al., 2018).

La prédiction de l'issue neurologique à long terme chez les patients sévèrement atteints par le traumatisme est un domaine d'étude prolifique de par l'importance des lésions sur le

bilan fonctionnel des patients (Whiteneck et al., 2012). Pour le chirurgien, la connaissance des facteurs prédictifs en aigu permet de justifier des décisions de prise en charge et d'utilisation des ressources aux administrateurs du réseau de la santé (1 - Wilson et al., 2012). Prédire l'issue neurologique permet d'orienter les ressources vers les acteurs d'une réhabilitation personnalisée en fonction d'objectifs réalistes. Il est primordial pour les médecins rééducateurs de pouvoir guider les attentes du patient en ce qui a trait au retour des aptitudes fonctionnelles et aux probabilités de travailler : prédire adéquatement optimise le partage d'information avec le patient et leur famille. Plusieurs facteurs ont été étudiés et pris en compte dans des modèles de prédiction de la récupération neurologique. Il est important de mentionner que la majorité des études évaluant des facteurs prédictifs de récupération neurologique sont effectuées sur des cohortes de patients étant atteint de lésion médullaire traumatique au niveau cervical. Ces facteurs prédictifs sont souvent évoqués et translaté dans le domaine clinique lorsque le chirurgien est confronté à la prise en charge d'un blessé médullaire thoracique ou thoraco-lombaire (Harrop et al., 2011). Les études portant sur les blessés médullaires de niveau thoraco-lombaire sont rares et davantage de connaissances sont nécessaire pour bien évaluer et guider la prise en charge chez cette population (Skeers et al., 2018). Ces facteurs peuvent notamment être séparées en quatre différentes catégories :

- Les facteurs démographiques, ou reliés au patient, tel que l'âge (Duh et al., 1994), le genre, les comorbidités médicales ;
  
- Les facteurs reliés aux caractéristiques du trauma, tel que l'énergie du trauma (basse ou haute énergie/vélocité, ou évaluée via score clinique tel que l'Injury Severity Score, ISS), les blessures associées (Dvorak et al., 2015), le mécanisme de trauma (Skeers et al., 2018), les caractéristiques de la fracture spinale associée (Dai et al., 2007 ; Dvorak et al., 2015) ;
  
- Les facteurs reliés aux caractéristiques de la lésion neurologique, tel que la sévérité initiale évaluée par l'examen neurologique initial (Duh et al., 1994), le niveau neurologique (Harrop et al., 2011), les caractéristiques radiologiques du cordon médullaire à l'imagerie par résonance magnétique (IRM) (Miyajiri et al., 2007) ; Martineau et al., 2019)

- Les facteurs liés aux modalités de traitement, tel que la prise en charge chirurgicale ou non et le délai entre le trauma et la prise en charge chirurgicale (Fehlings et al., 2012).

Hormis les facteurs liés aux modalités de traitement, tous ces facteurs sont non-modifiables. Pour le chirurgien du rachis, la connaissance des différents facteurs modifiables ayant un impact sur la récupération neurologique et fonctionnelle est essentielle pour mener à bien l'organisation d'un plan de traitement optimal. Notamment, l'importance du délai entre le trauma et la prise en charge chirurgicale est discutée dans la section suivante.

### **L'importance de la chirurgie précoce chez les blessés médullaires**

La nécessité de procéder à une chirurgie de décompression et de stabilisation de la colonne thoraco-lombaire en contexte de LTME, afin d'améliorer le potentiel de récupération neurologique à long terme, fait consensus (Glennie et al., 2017). La physiopathologie d'une LTME comporte différentes phases catégorisées d'abord en lésions primaire et secondaire. La lésion primaire consiste en l'atteinte mécanique locale de la moelle épinière et de son apport vasculaire par phénomènes de compression, distraction ou transection induits par la fracture ou dislocation de la colonne vertébrale au moment même du trauma. Les dommages subis par le tissu nerveux et l'atteinte de la barrière hémato-médullaire entraînent une cascade de réactions nommée lésion secondaire. Les phénomènes survenant durant le déroulement de la lésion secondaire sont reconnus pour entraîner potentiellement davantage de dommages que la lésion primaire, et forment la base des interventions neuro-protectrices à la portée des cliniciens (2 - Ahuja et al., 2017). Ils consistent en des changements cellulaires comme l'augmentation de la perméabilité cellulaire, la relâche locale de multiples facteurs pro-apoptotiques et des lésions ischémiques relevant de la destruction de la micro-vascularisation. La combinaison de ces phénomènes, couplée à la relâche de facteurs pro-inflammatoires des hémorragies locales et des globules blancs appelées dans la zone lésée, exacerbe l'œdème de la moelle épinière qui peut s'étendre à de multiples segments spinaux de part et d'autre de la zone traumatisée (Tator et al., 1999).

Le geste chirurgical de décompression est ainsi une intervention neuroprotectrice en ce sens qu'il vise à empêcher l'œdème de la moelle épinière d'entraîner davantage de compression. Il implique notamment de libérer les éléments neuraxiaux de la compression mécanique résiduelle causée par l'hématome macroscopique ainsi que par les fragments osseux, ligamentaires et discaux. Plusieurs études précliniques appuient la théorie voulant qu'après la lésion primaire, la rapidité de l'intervention limite les effets délétères de la lésion secondaire, dont l'évolution dans le temps fut bien documentée chez les modèles animaux (Batchelor et al., 2013). La décompression chirurgicale permet ainsi d'améliorer la perfusion sanguine dans la zone de pénombre péri-lésionnelle (Tator, 2006). Le concept d'une chirurgie hâtive, ou « Time is Spine », est établi dans la communauté chirurgicale comme un facteur influençant l'issue neurologique à long terme (1 - Ahuja et al., 2017). Par ailleurs, le geste chirurgical de stabilisation permet de restaurer l'alignement et la hauteur de la colonne vertébrale, assurant de conserver la moelle épinière en position anatomique et protégeant celle-ci de l'instabilité causée par le traumatisme, dans le but de débiter rapidement un programme de réhabilitation de façon sécuritaire en post-opératoire (2 – Ahuja et al., 2017).

La majorité des études évaluant l'influence du délai chirurgical sur l'issue neurologique vise les patients atteints de LTME au niveau cervical (Wilson et al., 2020). L'étude phare STASCIS (Fehlings et al., 2012) inclus 313 patients et supporte un seuil de délai chirurgical de 24 heures, concordant avec 2,8 fois plus de chance de récupération de 2 grade AIS ou plus à 6 mois de suivi pour les blessés médullaires traumatiques cervicaux. Cette étude a contribué à solidifier le seuil de 24 heures comme définition de la chirurgie précoce et a contribué à influencer les choix méthodologiques des études subséquentes (Rahimi-Movaghar et al., 2014 ; Celik et al., 2013 ; Umerani et al., 2014).

Il est important de noter que ce seuil de 24 heures fut déterminé de façon empirique de par l'estimation réaliste des temps de transfert inter-hospitaliers, obtention des imageries nécessaires, stabilisation médicale, etc. Certains auteurs ont remis en question la subjectivité de cette définition et ont été les premiers à proposer un seuil chirurgical non-



empirique de 19 heures pour les LTME de niveau cervical, basé sur une analyse objective des données de 42 patients (Facchinello et al., 2018).

Par contre, il n'y a pas dans la littérature d'étude comparable pour les LTME de niveau thoraco-lombaire. Une analyse approfondie des revues systématiques récentes (van Middendorp et al., 2013 ; El Teclé et al., 2016 ; Kato et al., 2017) ne relève que deux études dédiées spécifiquement à l'évaluation de l'influence du délai chirurgical sur l'issue neurologique à long terme (Cengiz et al., 2008 ; Bourassa-Moreau et al., 2016). Cengiz et al décrivent une amélioration du grade AIS entre l'admission et le congé de l'hôpital (le transfert vers l'unité de réadaptation) chez 27 patients avec LTME de grade AIS A à C, opérés dans un délai de 8 heures versus 3 à 15 jours. Bourassa-Moreau et al n'a pas démontré d'amélioration significative du grade AIS, entre l'admission et le congé de l'unité de réadaptation, chez 33 patients avec LTME de grade AIS A opérés dans un délai de 24 heures ou 24 à 72 heures. Les critères d'inclusions de ces études diffèrent non seulement en sévérité initiale mais également en niveaux neurologiques. Les seuils de délai chirurgical ainsi que le temps de suivi alloué varient grandement entre ces études. Il est donc raisonnable d'affirmer qu'il n'y a pas de consensus sur le délai chirurgical optimal pour la récupération neurologique en LTME thoraco-lombaire.

À l'opposé, nombre d'auteurs s'accordent pour relever l'importance de la chirurgie précoce sur les issues non-neurologiques. Plusieurs séries rétrospectives incluent plus de 1000 patients et utilisent un délai de 72 heures comme définition de prise en charge précoce (Xing et al., 2013 ; Bliemel et al., 2014 ; Rutges et al., 2017). On y associe une baisse du nombre total de jours de ventilation mécanique, du temps de séjour aux soins intensifs et du temps de séjour à l'hôpital. D'autres auteurs associent également une baisse des complications médicales, qu'elles soient infectieuses, pulmonaires ou dermatologiques avec un délai de prise en charge encore plus court (<24 h , Bourassa-Moreau et al., 2013). Il est reconnu qu'avec une ressuscitation adéquate, l'intervention chirurgicale hâtive n'augmente pas le risque de mortalité et permet de réduire le coût total de l'hospitalisation (Kerwin et al., 2007 ; O'Boynick et al., 2014). Malgré cela, les seuils de délai chirurgical

étudiés dans les travaux cités plus haut varient grandement et sont déterminés de façon subjective, de par l'absence de définition claire de ce que constitue une chirurgie précoce.

## **Chapitre 3 Problématique, hypothèses et objectifs**

### **3.1 Synthèse de la problématique et approche générale**

Chez les patients victimes de trauma vertébral, l'atteinte neurologique est un concept primordial et le potentiel de récupération est au centre des préoccupations de l'équipe de soins. Dans la prise en charge du blessé médullaire, le chirurgien prédit, planifie et exécute, en fonction des données cliniques et radiologiques à sa disposition. La problématique visée par ces travaux touche globalement les aspects de prédiction et de planification.

En bref, à ce jour, les facteurs qui influencent de façon importante l'issue neurologique à long terme chez les blessés médullaires thoraco-lombaires sont peu explorés dans la littérature. Le chirurgien a la capacité d'agir sur un nombre limité de ces facteurs. Le délai entre le trauma et l'exécution du geste chirurgical est un de ces facteurs dits modifiables. Également, chez les patients ayant subi une LTME suite à une fracture de type « burst » au niveau thoraco-lombaire, il n'y a pas de paramètres sur le scan préopératoire qui sont décrits pour aider à prédire l'issue neurologique à long-terme. Pourtant, le scan préopératoire est nécessaire chez tous les patients et est toujours étudié par le chirurgien avant la procédure.

L'objectif général de ces travaux est de mieux identifier ce qui influence la récupération neurologique chez les blessés médullaires ayant subi une fracture thoraco-lombaire. Des lacunes dans la littérature furent identifiées dans deux secteurs d'intérêts et soulève trois questions de recherche :

Quel est le seuil de délai optimal pour planifier la chirurgie chez cette population de patients ?

Quels paramètres provenant du scan préopératoire prédisent l'issue neurologique à long terme ?

Comment la morphologie de la fracture documentée sur le scan préopératoire peut aider à la planification du timing optimal pour entreprendre la chirurgie ?

Il est donc utile ici de diviser les hypothèses (et objectifs sous-jacents) en trois volets.

### **3.2 Hypothèses et objectifs**

Les hypothèses de recherche adressées dans ces travaux sont les suivantes :

#### **3.2.1 Volet 1 « délai chirurgical »**

H1 – Il existe un délai optimal objectif entre le trauma et la prise en charge chirurgicale associé à une meilleure récupération neurologique à long terme chez les blessés médullaires thoraco-lombaires.

Pour la première portion de ce mémoire, l'objectif est d'évaluer la relation entre le délai chirurgical et la récupération neurologique à long terme. Pour répondre à cet objectif, l'article 1 propose une méthode pour statuer sur une valeur seuil objective de délai chirurgical.

#### **3.2.2 Volet 2 « paramètres »**

H2 – Il existe des paramètres radiologiques issus du scan préopératoire qui influencent le potentiel de récupération neurologique des blessés médullaires.

Ainsi, pour la deuxième portion de ce mémoire, les objectifs de ces travaux sont premièrement de faire un examen minutieux des scans préopératoires des patients de la population d'étude pour documenter les paramètres communément décrits, et identifier de nouveaux paramètres potentiels. Puis, il faut déterminer quels paramètres morphologiques sont liés la récupération neurologique à long terme. Ensuite, il faut déterminer la relation entre l'examen neurologique initial et la récupération neurologique dans notre population

de façon à la comparer de façon relative avec celle des paramètres morphologiques. Ces objectifs seront répondus par l'article 2.

### **3.2.3 Volet 3 Hypothèse complémentaire**

Les réponses à ces questions de recherche permettront de tester l'hypothèse complémentaire suivante :

HC – Dans une population de patients ayant subi une lésion médullaire suite à une fracture thoraco-lombaire de type « burst », la morphologie de la fracture influence l'effet de la chirurgie précoce ; celle-ci bénéficierait davantage à certains patients que d'autres selon l'aspect de la fracture.

L'objectif complémentaire est donc de déterminer si l'impact du délai chirurgical sur la récupération neurologique varie en fonction des différentes morphologies post-traumatiques du canal spinal dans le contexte de fractures thoraco-lombaires de type « burst ». Cet objectif sera répondu au chapitre 7.

### **3.3 Approche générale**

Le chapitre 4 présente un résumé de la méthodologie des articles 1 et 2. Le chapitre 5 présente l'article 1 qui répond aux objectifs du volet « délai chirurgical ». Le chapitre 6 présente l'article 2 qui répond aux objectifs du volet « paramètres ». Le chapitre 7 présente les résultats des analyses complémentaires portant sur la relation entre le seuil chirurgical optimal dérivé de l'article 1 et les différents paramètres retenus de l'article 2.

## Chapitre 4 Matériel et méthodes

Les patients étudiés dans l'article 1 et 2 font partie de la même base de données prospective de blessés médullaires traumatiques. Le recrutement s'effectue chez les patients majeurs (âge  $\geq 18$  ans) sur une base volontaire et est basé dans l'établissement de référence niveau 1 en traumatologie du Centre Intégré Universitaire de Santé et de Services Sociaux du Nord-de-l'Île-de-Montréal. Tous les patients ont subi une intervention chirurgicale à visée de décompression et de stabilisation de la colonne vertébrale à l'Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal dans les trois jours (72 heures) du traumatisme. Les données cliniques et radiologiques des patients consécutivement admis entre janvier 2010 et décembre 2017 pour lésion médullaire secondaire à un trauma vertébral entre la 10<sup>e</sup> vertèbre thoracique et la 2<sup>e</sup> vertèbre lombaire furent recueillies au centre de recherche en chirurgie du rachis de l'Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal. Les patients avec un examen neurologique initial correspondant à une paraplégie avec atteinte motrice sévère (grade AIS A, B ou C) furent retenus. La période minimale de suivi clinique fut fixée à 12 mois. Furent exclus les patients opérés dans un autre centre hospitalier, les patients ayant subi des lésions vertébrales adjacentes empêchant la mesure adéquate du diamètre normal du canal spinal au-dessus et au-dessous de la lésion principale et les patients ayant subi une lésion médullaire pénétrante.

Un total de 42 patients furent identifiés; cinq d'entre eux furent exclus faute de suivi clinique à 12 mois et deux d'entre eux furent exclus de par la présence d'une lésion traumatique concomitante à la vertèbre L3. La collecte au sein de la base de données fut effectuée par l'auteur de ce mémoire et comprenait la révision des données démographiques et les éléments d'issues détaillées dans les paragraphes suivant, ainsi que l'analyse détaillées des reconstructions axiales, coronales et sagittales de l'examen tomodensitométrie effectué en préopératoire. Pour les patients transportés d'un centre hospitalier référant, l'analyse fut effectuée sur l'examen tomodensitométrie le plus contemporain précédant l'intervention chirurgicale. Tous les examens tomodensitométriques furent effectués en position de décubitus dorsal stricte sur une planche de trauma semi-rigide. Un examen en imagerie par résonance magnétique (IRM)

était disponible pour moins de la moitié des patients (18/42; 42,9%). Il ne fut donc pas planifié d'effectuer des études comparatives entre tomodensitométrie et IRM, ou d'utiliser des paramètres à l'IRM comme facteurs prédictifs de récupération neurologique.

Ces études furent approuvées par le comité de révision de l'institution et respectent les règles éthiques gouvernementales et institutionnelles concernant l'utilisation des données de sujets volontaires.

À l'article 1 (Chapitre 5.2), les dossiers cliniques et radiologiques de 35 adultes (âge > 18 ans) consécutifs admis entre 2010 et 2017 furent considérés complets et ainsi analysés. Cette cohorte rassemble des patients ayant subi une lésion médullaire motrice complète (définie par un grade AIS initial de grade A ou B) secondairement à un trauma vertébral entre les niveaux T10 et L2. Pour l'étude de l'effet du délai chirurgical, l'inclusion des différents mécanismes de trauma (compression axiale, flexion-distraction, translation-rotation) est justifiée pour assurer des résultats généralisables à la majorité des LTME thoraco-lombaires. Il fut par la suite décidé de limiter l'hétérogénéité des patients inclus en se concentrant sur les blessés médullaires moteurs complets, de par la prévisibilité des modèles de récupération des patients ASIA C (Marino et al., 1999) et de l'effet plafond rencontré chez les patients ASIA D (Whiteneck et al., 2012), particulièrement en regard de l'issue du score moteur. De plus, la récupération neurologique chez les patients atteints de lésions motrices incomplètes (ASIA C et D) dépendrait de davantage de facteurs que les événements mécaniques et physiopathologiques propres au traumatisme (Horn et al., 2013).

Trois issues cliniques furent analysées en fonction du délai chirurgical : la récupération d'un ou plusieurs grades sur l'échelle AIS, la récupération d'un ou plusieurs NLI et l'amélioration de 10 points ou plus au score moteur. Les variables choisies comme facteurs prédictifs potentiels furent le délai entre le moment du traumatisme et le début de la chirurgie, la sévérité de la lésion médullaire telle qu'évaluée par l'examen neurologique initial, le MCC, et l'énergie du traumatisme dichotomisée en basse énergie (chute de sa

hauteur, trauma trivial) et haute énergie (accident véhicule-piéton, accident de la route, chute de plus de 3 mètres, etc.) (1 - Wilson et al., 2012).

L'article 2 (Chapitre 6.2) étudie plus spécifiquement les 25 patients de la cohorte ayant subi une LTME secondairement à une fracture thoraco-lombaire de type « burst », classifiée selon l'AO en A3 ou A4. L'issue primaire étudiée est la présence ou non de récupération d'un ou plusieurs grade AIS à 12 mois de suivi. L'issue neurologique est considérée en fonction des facteurs prédictifs potentiels liés au patient (âge au moment du trauma), aux caractéristiques de la lésion nerveuse (le grade AIS initial), à la prise en charge chirurgicale (le délai chirurgical) ainsi qu'à différentes caractéristiques du trauma (niveau d'énergie et ISS) incluant de nombreux paramètres radiologiques tels qu'évalués sur le scan préopératoire :

-La comminution du corps vertébral (McCormack et al., 1994), décrit comme comminution faible (<30 %), modérée (30 à 60 %) ou sévère (>60 %)

-La compression résiduelle maximale du canal spinal, mesurée par le Maximal Canal Compromise (MCC) (Fehlings et al., 1999), calculée selon la formule telle qu'illustrée à la Figure 5.1.

-La présence de comminution du fragment rétropulsé, reporté comme variable dichotomique et définie comme la présence de deux fragments osseux intracanaux ou plus.

-La magnitude du recul de la portion inférieure du mur postérieur (Radcliff et al., 2012), mesurée par la distance en millimètre, arrondie à l'entier le plus près, entre le coin postéro-inférieur du corps vertébral lésé et la ligne vertébrale postérieure émergeant de la vertèbre sous-jacente intacte.

-La présence d'une fracture complète de la lame, définie comme une séparation fracturaire complète de la lame en reconstructions axiale et coronale du CT-scan.

-L'index de cyphose du corps vertébral (Radcliff et al., 2012), un index de cyphose locale calculé par le ratio entre la hauteur antérieure et postérieure du corps vertébral au niveau lésé.



-L'angle de cyphose segmentaire (Keynan et al., 2006), un indice de cyphose segmentaire mesuré entre le plateau supérieur de la vertèbre sus-jacente et le plateau inférieur de la vertèbre sous-jacente au segment lésé.

L'obtention de ces paramètres et les décisions de les inclure dans les analyses se sont basées sur la méthodologie suivante : revue de la littérature pertinente, discussion des articles avec le directeur de recherche et choix des paramètres, brainstorming en groupe ciblé sur les techniques de mesure, et validation des paramètres avec le directeur de recherche sur une série de scans provenant de la cohorte.

L'analyse statistique de l'article 1 a été effectuée avec le programme CART (Classification And Regression Trees) du logiciel Salford Predictive Modeler (Version 8, Salford Systems, San Diego, CA, USA). Il s'agit d'une méthode statistique faisant intervenir des modèles de prédiction sous la forme d'arbres décisionnels élaborés par partition objective récursive. Les autres analyses statistiques ont toutes été effectuées avec le programme SPSS Statistic version 24.0 (IBM Corp, NY, USA) et sont par ailleurs décrites en détails aux sections dédiées des chapitres 5.2.3 et 6.2.3. La méthodologie statistique de l'analyse complémentaire est détaillée au chapitre 7.

## Chapitre 5 Article 1

### 5.1 Situation et description de l'article 1

Le premier article proposé dans ce mémoire cadre dans la quête vers l'optimisation du délai chirurgical comme facteur modifiable influençant la récupération neurologique chez les LTME de niveau thoraco-lombaire. Il vise à répondre à l'objectif du volet 1 « délai chirurgical ». Le délai chirurgical optimal pour cette population de patients n'est pas statué dans la littérature, et le consensus est basé sur des seuils subjectifs. L'inclusion de différents mécanismes traumatiques est justifiée afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les études précédentes et pour en augmenter leur validité externe. L'article est publié dans la revue Spinal Cord (<https://doi.org/10.1038/s41393-020-0412-z>).

## **5.2 Article 1: The use of classification and regression tree analysis to identify the optimal surgical timing for improving neurological outcomes following motor-complete thoracolumbar traumatic spinal cord injury**

### **5.2.1 Abstract**

**Study design:** Observational cohort study

**Objective:** To identify the optimal surgical timing for improving neurological outcomes in patients that sustained a motorcomplete traumatic spinal cord injury (TSCI) secondary to a thoracolumbar injury.

**Setting:** Level 1 trauma center specialized in TSCI care.

**Methods:** We prospectively analyzed clinical data of 35 patients admitted for motor-complete TSCI secondary to a thoracolumbar injury. We quantified neurological recovery with three different outcomes: the improvement of at least one grade on the American Spinal Injury Association Impairment Scale (AIS), of at least one neurological level of injury (NLI), and of at least 10-points on the motor score (MS). Classification and regression tree analysis was used to identify outcome predictors and to provide cutoff values of surgical timing associated with recovery.

**Results:** The proportion of the patients improving by at least one AIS grade was higher in the group undergoing early surgery within 25.7 h of the TSCI (46% vs 0%). The proportion of patients that improved by at least one NLI was also higher in the group undergoing early surgery within 21.5 h of the TSCI (71% vs 18%). Lastly, 25% of the AIS grade A patients undergoing early surgery within 25.6 h of the TSCI improved 10 MS points or more as compared with 0% in the other group.

**Conclusions:** Earlier surgery was effective in improving neurological outcome in motor-complete TSCI at the thoracolumbar levels. Performing surgery within 21.5 h from the

traumatic event in these patients increases the likelihood of improving the neurological recovery.

**Sponsorship:** This study was supported by the Fonds de Recherche du Québec—Santé (FRQS), Department of the Army—United States Army Medical Research Acquisition Activity, Rick Hansen Spinal Cord Injury Registry and Medtronic research chair in spinal trauma at Université de Montréal.

### 5.2.2 Introduction

Traumatic spinal cord injury (TSCI) is a debilitating condition. In the past decades, efforts to improve medical and surgical management of TSCI patients have resulted in better neurologic and functional outcomes after trauma. Whereas many predictors of such outcomes are non-modifiable for the clinicians, controversy regarding best management of modifiable elements remains. Debate is still ongoing when looking at optimal timing of surgical intervention in this patient population.

The literature strongly suggests that earlier surgery leads to better outcomes but there is a lack of evidence supporting an objective optimal timing of surgery in TSCI patients. Discrepancy between studies that investigate the association of early surgery with neurological outcome mainly comes from the wide range of time thresholds used in the definition of “early surgery” and the inclusion of a vast array of neurological levels and severity of neurological injury at presentation [1].

Paucity in the literature in this regard is particularly striking when looking at thoracolumbar TSCI. This population of patients is important to study because it is one of the most prevalent group of patients with TSCI living in the community [2]. In addition, it is a subset of TSCI patients in which prediction of neurological outcome is very difficult because of the variability of mechanisms of injury, specific relevant anatomical characteristics such as the transition from the spinal cord to the conus medullaris to the cauda equina, and associated injuries to surrounding organs. Review of the subject by El Tecle in 2016 showed only six retrospective studies with variable results and conflicting conclusions, with time thresholds extending from 8 to 72 h from the traumatic event [3]. Cengiz et al. suggested that operating before 8 h is favorable [4]. However, this study included a small number of paraplegic patients and compared outcomes in patients operated either before 8 h or after 3 days. Such strategy is not applicable in the current Canadian hospital service system [5, 6]. McLain and Benson claimed better proportion of neurological recovery in patients operated under 24 h (8/9, 88% vs 6/12, 50%), without providing thorough statistical analysis [7]. More recently, Burke et al. [8] added the definition of “ultra-

early” surgical strategy as an operation taking place 12 h from the traumatic event. In a series of 78 patients, they found that “ ultra-early” strategy provided better neurological outcome than “early” (>12 h, <24 h) or “ late” (>24 h) strategy. They found no difference in neurological outcome between early (>12 h, <24 h) and late strategies (>24 h) [8]. Clohisy et al. compared a small number of paraplegic patients and supported a cut-off of 48 h, demonstrating better Frankel and motor score in early decompression surgery [9]. Likewise, Landi et al. provided multivariable analysis to support surgery within 48 h of the traumatic event but compared patients injured at the thoracic, thoracolumbar and lumbar levels, with only 9 patients fitting our inclusion criteria [10].

However, many larger retrospective studies that included paraplegic patients did not find significant differences when looking at neurological recovery according to timing subgroups [11–14].

This study intends to provide objective and unbiased cutoffs for surgical timing following TSCI to assist in optimizing the surgical planning of TSCI patients. We limited the heterogeneity of the patient population studied by specifically examining cases of thoracolumbar motorcomplete TSCI. The main objective of this study is to assess the influence of surgical timing on the neurological recovery and to identify objective surgical timing cutoffs associated with better neurological recovery using classification and regression tree (CART) analysis.

### **5.2.3 Methods**

#### **Patients**

Patients in this study were prospectively enrolled on a voluntary basis at a single Level 1 trauma center. All 35 consecutive adult (>18 years old) patients were admitted between 2010 and 2017 for TSCI secondary to a traumatic thoracolumbar injury, either burst fracture, flexion-distraction or rotation-translational injury between T10 and L2 levels. Included patients had severe TSCI, defined as motor-complete American Spinal Injury

Association Impairment Scale (AIS) grade A or B. All benefited from a decompression and stabilization surgical procedure. A minimum of 12 months of clinical follow-up after the traumatic event was set as an inclusion criteria. This study was approved by the Institutional Review Board. All applicable institutional and governmental regulations concerning the ethical use of human volunteers were followed during the course of this research.

## **Variables**

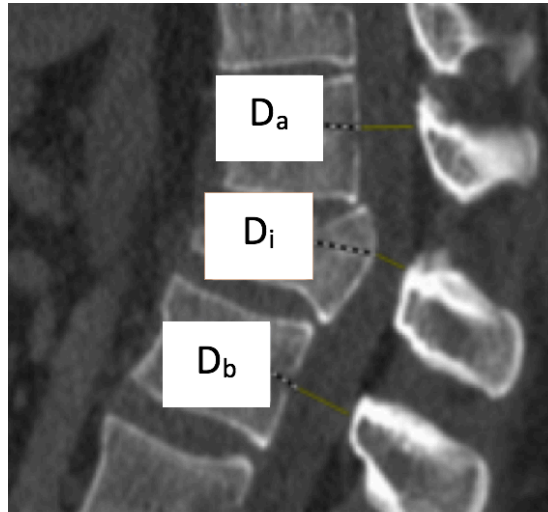
### **Outcome variables**

The International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury (ISNC-SCI) were utilized in the clinical evaluation of patients to collect AIS grades preoperatively within 3 days of presentation and at a minimum of 12 months of follow-up. The neurological level of injury (NLI) and the total motor score (MS) of each evaluation were also collected at presentation and follow-up. One patient had missing MS data at the yearly follow-up due to contractures preventing full assessment of motor function. The primary outcome to assess neurological recovery was an improvement of at least 1 grade on the AIS scale. The improvement of at least one NLI and at least 10 points on the MS were considered as secondary outcomes.

### **Predictor variables**

Predictors of neurological recovery following TSCI were chosen according to their potential to influence neurological outcome. Five independent variables were selected based on the literature [15]. The main independent variable consisted of the surgical delay considered as a continuous variable and defined as the time between the traumatic event and the time of surgical incision. Age was considered as a continuous variable. The initial severity of the neurological injury was assessed with the AIS. The Maximal Canal Compromise (MCC) was calculated according to the formula as depicted on Fig. 5.1 [16]. The energy of the trauma was dichotomized in low (fall from standing or walking, trivial

trauma) or high (pedestrian hit by vehicle, motor-vehicle or motorcycle accident, fall from more than 3 m, etc.).



$$\text{MCC (\%)} = 1 - \left( \frac{D_i}{(D_a + D_b)/2} \right) \times 100\%$$

**Figure 5.1:** Maximal Canal Compromise (MCC) calculation formula, where  $D_a$  is the anteroposterior canal diameter one level above the injury site,  $D_i$  is the anteroposterior osseous canal diameter at the injury site, and  $D_b$  is the anteroposterior canal diameter one level below the injury site

### Statistical analysis

The CART analysis engine (Salford Predictive Modeler software, Version 8, Salford Systems, San Diego, CA, USA) was used for statistical analyses. It is a useful tool in the field of predictive analytics and was applied to solve a binary classification from recursive partitioning: the general outcome of interest here being whether patients show neurological recovery or not following TSCI. This statistical method creates prediction models in the form of decision trees by repeatedly partitioning a data set into two subgroups based on an objective splitting criterion (predictor most related to the outcome) until further partitioning no longer adds value to the prediction [17]. The classification trees were elaborated using



the Gini splitting rule. Trees were pruned to prevent splitting rules based on a similar predictor variable from appearing more than once. A stopping rule was used to prevent the algorithm from creating subgroups of five patients or less. Overfitting was monitored by choosing the tree exhibiting the minimum relative cost value computed by the software. The CART engine also identifies surrogate splitter, as close approximations of the primary splitters appearing in the trees. Surrogate splitters are used by the algorithm to handle eventual missing data and are taken into account when computing the variable importance [18]. Continuous data were reported as median and interquartile range (IQR), whereas categorical data were reported as percentages.  $\chi^2$ -square tests were used to assess whether the proportion of patients who improved neurologically was statistically different from the proportion of patients who did not improve as determined following the split based on the surgical timing. The significance level was set at  $p < 0.05$ .

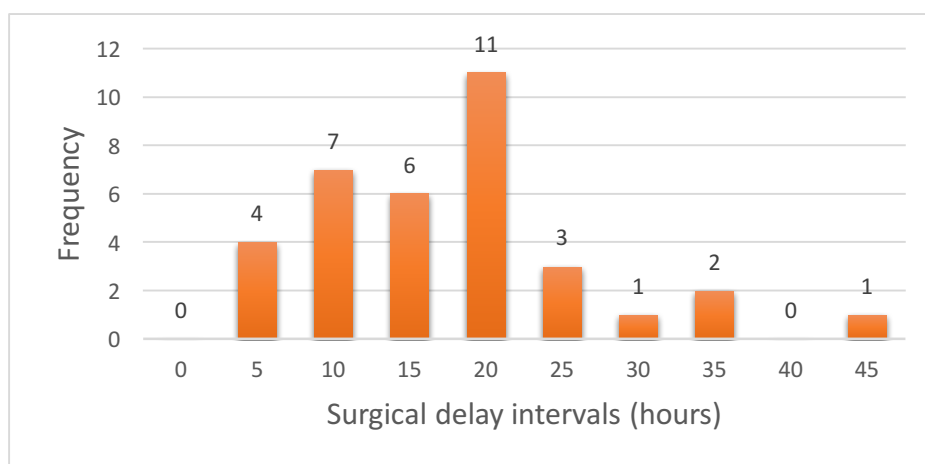
#### **5.2.4 Results**

Table 5.1 summarizes the outcome measures and the algorithm input parameters that were considered for analyses. Among the 35 patients, 13 (37.14%) demonstrated recovery of at least 1 AIS grade, 19 (54.29%) demonstrated recovery of at least 1 NLI and 10 (29.41%) demonstrated recovery of at least 10 points on the total MS. The median age (IQR) admission was 43 years (33–55) and median surgical delay was 20.00 h (13.73–22.52).

| Outcome measures                |              |                     |
|---------------------------------|--------------|---------------------|
| 1 or more AIS grade improvement | %            | 37.14               |
| 1 or more NLI improvement       | %            | 54.29               |
| 10 or more total MS improvement | %            | 29.41               |
| Input parameters                |              |                     |
| Age, years                      | Median (IQR) | 43 (33-55)          |
| Initial AIS grade               | AIS A, n     | 28                  |
|                                 | AIS B, n     | 7                   |
| Surgical delay, hours           | Median (IQR) | 20.00 (13.73-22.52) |
| Energy                          | % High       | 60.0                |
|                                 | % Low        | 40.0                |
| MCC, %                          | Median (IQR) | 55.2 (44.8-70.0)    |

**Table 5.1:** Summary of outcomes and predictor variables considered

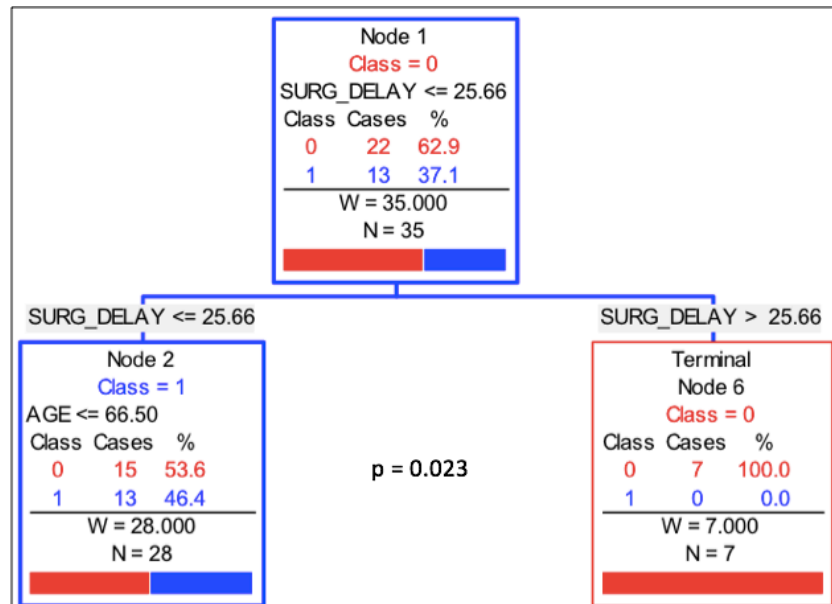
Figure 5.2 shows the distribution of surgical delay across the population. Most of the traumatic events (60%) were classified as high energy, and the median MCC (IQR) was 55.2% (44.8–70.0). The majority of patients (80%) were classified with motor and sensory complete lesion (AIS A) at admission. Table 2 depicts the AIS grade change over the follow-up period.



**Figure 5.2:** Number of patients operated in surgical delay intervals

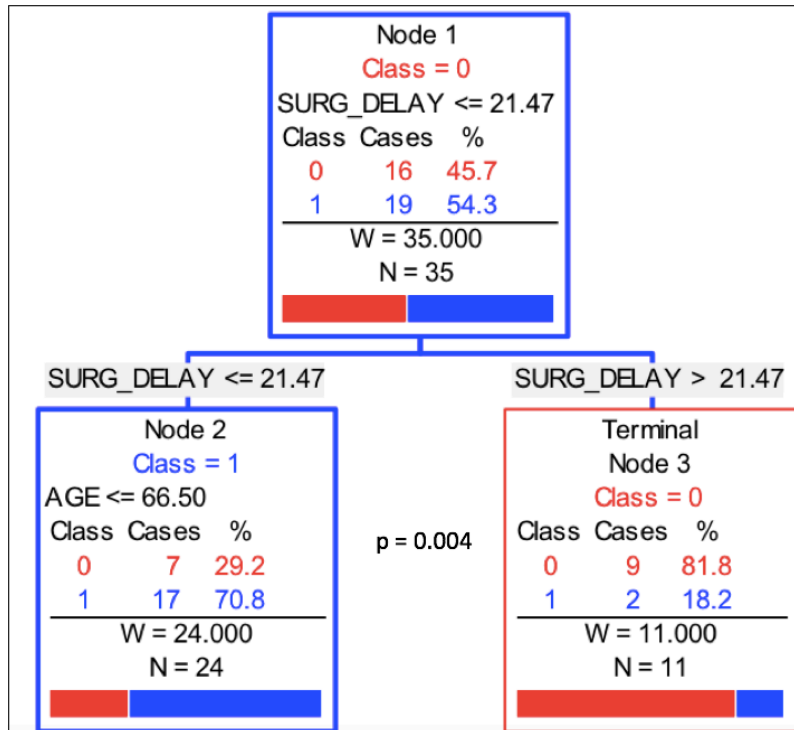
Figure 5.3 portrays the classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least one AIS grade as the dependent variable. Surgical delay was the

single most important predictor of improvement in AIS grade. The 35 patients were split in two subgroups according to a surgical delay threshold of 25.66 h. Of the 28 patients operated before this cut-off, 13 (46%) showed neurological recovery, compared with 0 (0%) of the 7 patients operated after. Chi-square test showed significant difference in the proportions of patients showing neurological recovery ( $p=0.023$ ).



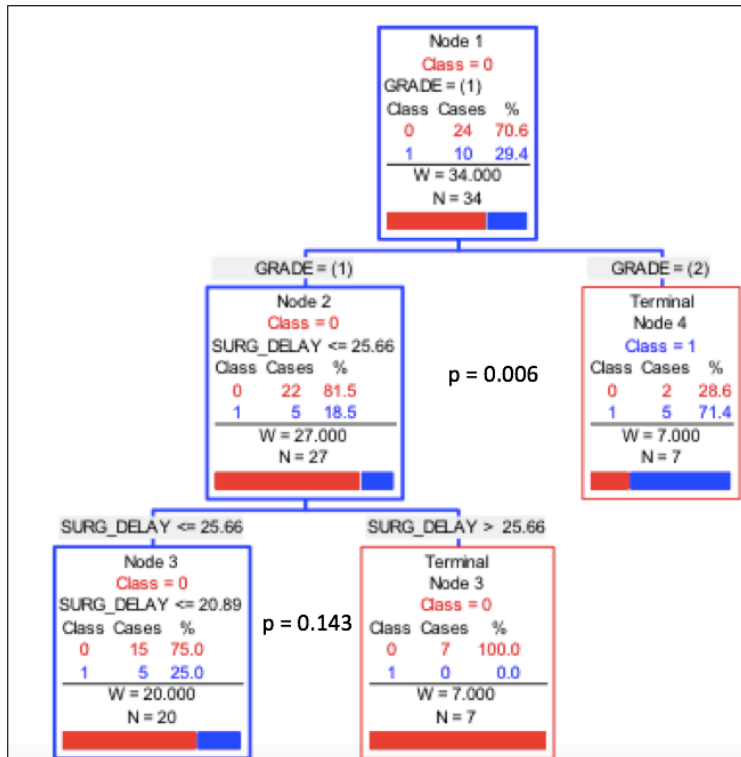
**Figure 5.3:** Classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least one AIS grade as the dependent variable, with corresponding p-value

Figure 5.4 portrays the classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least one NLI as the dependent variable. Surgical delay was the single most important predictor of improvement in NLI. The 35 patients were split in two subgroups according to a surgical delay threshold of 21.47 h. Of the 24 patients operated before this cut-off, 17 (71%) showed neurological recovery, compared with 2 (18%) of the 11 patients operated after. Chi-square test showed significant difference in the proportion of patients showing neurological recovery ( $p= 0.004$ ).



**Figure 5.4:** Classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least one NLI as the dependent variable, with corresponding p-value

Figure 5.5 portrays the classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least 10 points on the total MS as the dependent variable. The data for 34 patients were available. They were first split according to the AIS grade. Of the 27 AIS A patients, only 5 (19%) showed neurological recovery, compared with 5 (71%) of the 7 AIS B patients. Chi-square test showed significant difference in the proportion of patients showing neurological recovery ( $p = 0.006$ ). The 27 AIS A patients were then split according to a surgical delay threshold of 25.66 h. Of the 20 patients operated before this cut-off, 5 (25%) showed neurological recovery, compared with 0 (0%) of the 7 patients operated after. Chi-square test did not show significant difference in the proportion of patients showing neurological recovery at this level of the classification tree ( $p = 0.143$ ).



**Figure 5.5:** Classification tree obtained when considering a neurological improvement of at least 10 points on the total MS as the dependent variable, with corresponding p-values

## 5.2.5 Discussion

This article is the first to determine objectively which optimal surgical delay cutoff should be adopted when managing thoracolumbar spinal injuries with neurological deficit. Even if most surgeons believe that thoracolumbar SCI patients should be operated in a timely manner [6, 19], there is no clear literature supporting a specific timing threshold for this population [1, 3]. No studies thoroughly evaluated optimal timing for decompression and stabilization surgery in paraplegic patients. Considering the wide variability in the definition of early surgery throughout the literature, this study is not only important for surgical planning but also for research purposes to better account for the influence of surgical timing in multivariable studies of outcome predictors in TSCI. The investigation for an optimal timing for surgical care in TSCI patients is not easily amenable to randomization for ethical and practical reasons. In addition, the use of statistical tools such as CART allows to identify objectively unbiased cutoffs for surgical timing using a

retrospective review of prospective data design. The results of this study demonstrate that a surgical intervention within 21.5 h after trauma increases the likelihood of improving by at least one NLI, while improvement by at least one AIS grade and by 10 points on the MS are more likely with surgical intervention within 25.6 h of the TSCI. The discrepancies in surgical timing cutoffs for our three outcomes also mirror the variability in previous studies on surgical timing, as the optimal timing may depend on the targeted outcome. While various outcomes can be selected to determine neurological recovery, our study relies on three outcomes typically recognized as important clinically for assessing neurological improvement [20]. Interestingly, our objective cutoffs (21.5– 25.6 h) are close to the subjective 24-h threshold for early surgery commonly proposed by surgeons and in the literature [21]. This finding is important because authors generally consider that a time window after the TSCI close to 24 h is realistic in a clinical setting to allow for optimal performance of the surgery (transfer to a specialized SCI center, medical evaluation and stabilization, preoperative imaging, surgical planning, etc) [22, 23]. Accordingly, we believe that performing surgery within 21.5 h will be feasible in the great majority of patients, and that this cutoff could be used as a reference for clinicians and decision-makers dealing with SCI patients, especially since this cutoff was determined regardless of the burden of associated injuries in our patient population. It is known that factors other than surgical timing can also influence neurological recovery in the setting of a TSCI. We also included the AIS grade, age, energy of the trauma and the MCC in our analyses since they have previously been reported as potential predictors in the literature [24]. Although the initial neurological status is often recognized as the most important predictor of neurological recovery [25], our analyses suggest that specifically for motor-complete thoracolumbar TSCI, surgical delay was the most important predictor for recovery in terms of AIS grade and NLI. This finding also relates to the fact that we have targeted a specific population with a characteristic initial severity of the neurological injury (motor-complete thoracolumbar TSCI). As for the improvement in MS, the initial AIS grade was most important, but surgical delay remained predictive for recovery in AIS grade A patients. These findings strongly support the clinical relevance of early surgery as an important modifiable factor for which defining objective cutoffs is key to facilitate surgical planning.

## **Limitations**

The main limitation of this study relates to the small number of patients. However, our small cohort was sufficient to observe a significant association between surgical timing and neurological recovery. Significance was also reached for the influence of the initial neurological status, as this is a recognized predictor for neurological recovery. The number of patients with very early surgery within 8 h of the TSCI is particularly small, which limits the conclusion of this study, considering that previous studies suggest that very early surgery would be even more effective. This small subgroup of patients relates to the multiple barriers to early surgery in real clinical setting [22]. Accordingly, the surgical delay from trauma to surgical intervention in our cohort is similar to that typically observed in other observational studies depicting the real case scenario in a clinical environment [6, 19]. We acknowledge the potential concern regarding instability of initial neurologic examination. Examination is performed by treating surgeons and orthopedic spine surgery trained residents and fellows. The timing of preoperative initial AIS grading from the traumatic event remains a potential confounding variable that is merely impossible to control in the clinical context, especially when early surgical care is warranted.

### **5.2.6 Conclusion**

This article bridges the gap in the literature in providing an objective surgical timing cutoff of 21.5 h for optimal neurological recovery in motor-complete TSCI at the thoracolumbar level. This timeframe would serve not only to guide management but also as a reference for defining “early” surgery in other studies pertaining to outcome predictors in this group of TSCI patients.

## 5.2.7 References

1. Van Middendorp JJ, Hosman AJF, Doi ASR. The effects of the timing of spinal surgery after traumatic spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis. *J Neurotrauma*. 2013;30:1781–94.
2. Iorio-Morin C, Noonan VK, White B, Noreau L, Leblond J, Dumont FS, et al. Quality of life and health utility scores among Canadians living with traumatic spinal cord injury – a national cross-sectional study. *Spine (Philos Pa 1976)*. 2018;43:999–1006.
3. El Tecle NE, Dahdaleh NS, Hitchon PW. Timing of surgery in spinal cord injury. *Spine (Philos Pa 1976)*. 2016;41:995–1004.
4. Cengiz SL, Kalkan E, Bayir A, Ilik K, Basefer A. Timing of thoracolumbar spine stabilization in trauma patients; impact on neurological outcome and clinical course. A real prospective (rct) randomized controlled study. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2008;128:959–66.
5. Tator CH, Fehlings MG, Thorpe K, Taylor W. Current use and timing of spinal surgery for management of acute spinal cord injury in North America: results of a retrospective multicenter study. *J Neurosurg*. 1999;91:12–8.
6. Glennie RA, Bailey CS, Tsai EC, Noonan VK, Rivers CS, Fourny DR, et al. An analysis of ideal and actual time to surgery after traumatic spinal cord injury in Canada. *Spinal Cord*. 2017;55:618–23.
7. McLain RF, Benson DR. Urgent stabilization of spinal fractures in polytrauma patients. *Spine (Philos Pa 1976)*. 1999;24:1646–54.



8. Burke JF, Yue JK, Ngwenya LB, Winkler EA, Talbott J, Pan J, et al. Ultra-early (<12 h) decompression improves recovery after spinal cord injury compared to early (12–24 h) decompression. *Clin Neurosurg*. 2016;63:172.
9. Clohisy JC, Akbarnia BA, Bucholz RD, Burkus JK, Backer RJ. Neurologic recovery associated with anterior decompression of spine fractures at the thoracolumbar junction (T12-L1). *Spine (Philo Pa 1976)*. 1992;17:325–30.
10. Landi A, Marotta N, Ambrosone A, Prizio E, Mancarella C, Gregori F, et al. Correlation between timing of surgery and outcome in thoracolumbar fractures: does early surgery influence neurological recovery and functional restoration? A multivariate analysis of results in our experience. *Acta Neurochir Suppl*. 2017;124:231–8.
11. Duh MS, Shepard MJ, Wilberger JE, Bracken MB. The effectiveness of surgery on the treatment of acute spinal cord injury and its relation to pharmacological treatment. *Neurosurgery*. 1994;35:240–9.
12. Croce MA, Bee TK, Pritchard E, Miller PR, Fabian TC. Does optimal timing for spine fracture fixation exist? *Ann Surg*. 2001;233:851–8.
13. McKinley W, Meade MA, Kirshblum S, Barnard B. Outcomes of early surgical management versus late or no surgical intervention after acute spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil*. 2004;85:1818–25.
14. Chipman JG, Deuser WE, Beilman GJ. Early surgery for thoracolumbar spine injuries decreases complications. *J Trauma*. 2004;56:52–57.
15. Wilson JR, Cadotte DW, Fehlings MG. Clinical predictors of neurological outcome, functional status, and survival after traumatic spinal cord injury: a systematic review. *J Neurosurg Spine*. 2012;17:11–26.

16. Furlan JC, Fehlings MG, Massicotte EM, Aarabi B, Vaccaro AR, Bono CM. A quantitative and reproducible method to assess cord compression and canal stenosis after cervical spine trauma: a study of interrater and intrarater reliability. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007;32:2083–91.
17. Facchinello Y, Beauséjour M, Richard-Denis A, Thompson C, Mac-Thiong J-M. The use of regression tree analysis for predicting the functional outcome following traumatic spinal cord injury. *J Neurotrauma*. 2017. <https://doi.org/10.1089/neu.2017.5321>. [Epub ahead of print].
18. Facchinello Y, Richard-Denis A, Beauséjour M, Thompson C, Mac-Thiong J-M. The use of classification tree analysis to assess the influence of surgical timing on neurological recovery following severe cervical traumatic spinal cord injury. *Spinal Cord*. 2018;56:687–94.
19. Kato S, Murray JC, Kwon BK, Schroeder GD, Vaccaro AR, Fehlings MG. Does surgical intervention or timing of surgery have an effect on neurological recovery in the setting of a thoracolumbar burst fracture? *J Orthop Trauma*. 2017;31:38–44.
20. Steeves JD, Lammertse D, Curt A, Fawcett JW, Tuszynski MH, Ditunno JF, et al. Guidelines for the conduct of clinical trials for spinal cord injury (SCI) as developed by the ICCP panel: clinical trial outcome measures. *Spinal Cord*. 2007;45:206–21.
21. Fehlings MG, Vaccaro A, Wilson JR, Singh A, Cadotte D, Harrop JS, et al. Early versus delayed decompression for traumatic cervical spinal cord injury: results of the Surgical Timing in Acute Spinal Cord Injury Study (STASCIS). *PLoS ONE*. 2012;7:e32037.
22. Thompson C, Feldman DE, Mac-Thiong J-M. Surgical management of patients following traumatic spinal cord injury: identifying barriers to early surgery in a specialized spinal cord injury center. *J Spinal Cord Med*. 2016;41:1–7.

23. Wilson JR, Grossman RG, Frankowski RF, Kiss A, Davis AM, Kulkarni AV, et al. A clinical prediction model for long-term functional outcome after traumatic spinal cord injury based on acute clinical and imaging factors. *J Neurotrauma*. 2012;29:1–9.
24. Magu A, Singh D, Yadav RK, Bala M. Evaluation of traumatic spine by magnetic resonance imaging and correlation with neurological recovery. *Asian Spine J*. 2015;9:748–56.
25. Bourassa-Moreau E, Mac-Thiong J-M, Li A, Feldman DE, Gagnon DH, Thompson C, et al. Do patients with complete spinal cord injury benefit from early surgical decompression? Analysis of neurological improvement in a prospective cohort study. *J Neurotrauma*. 2016;33:301–6.

## **Chapitre 6 Article 2**

### **6.1 Situation et description de l'article 2**

Le deuxième article proposé dans ce mémoire concerne l'étude des scans préopératoires des patients atteints de paralysie motrice sévère suite à une fracture thoraco-lombaire de type « burst ». Il vise à répondre aux objectifs du volet 2 « paramètres ». Cet article fait le lien entre les différents paramètres morphologiques et la récupération neurologique des patients, et compare le potentiel prédictif de ceux-ci avec l'évaluation neurologique clinique initiale. L'article est publié dans la revue European Spine Journal (<https://doi.org/10.1007/s00586-020-06420-9>).

## **6.2 Article 2 Morphological features of thoracolumbar burst fractures associated with neurological outcome in traumatic spinal cord injury**

### **6.2.1 Abstract**

**Purpose:** To identify specific morphological characteristics in thoracolumbar burst fractures associated with neurological outcome after severe traumatic spinal cord injury (TSCI).

**Methods:** We retrospectively analyzed the clinical and radiological (CT-Scan morphological characteristics specific to burst fractures) data of 25 consecutive patients admitted for TSCI secondary to a burst fracture at levels from T11 to L2 between 2010 and 2017 in single level-1 trauma center. We included severe TSCI, defined as American Spinal Injury Association Impairment Scale (AIS) grade A, B or C.

**Results:** Among the 25 patients with severe TSCI, 14 were AIS A, 5 were AIS B and 6 were AIS C upon initial preoperative neurological evaluation. The AIS grade and the burden of associated injuries (Injury Severity Score, ISS) were the only clinical factors significantly associated severe with poor neurological recovery. The trauma level of energy was not associated with neurological outcome. Several fractures parameters were independently related to neurological recovery: the postero-inferior corner translation, presence of retropulsed fragment comminution and complete lamina fracture. The magnitude of sagittal kyphosis angle, vertebral kyphosis index and vertebral body comminution were not associated with the neurological outcome.

**Conclusions:** Morphological features of the bony structures involving the spinal canal in thoracolumbar burst fractures with severe TSCI are associated to the chronic neurological outcome and could provide more insight than the AIS clinical grading. The fracture pattern may better reflect the actual level of energy transferred to the spinal cord than distinguishing between low- and high-energy trauma.

Keywords: Burst fracture; thoracolumbar trauma; neurological outcome; spinal cord injury.

### **6.2.2 Introduction**

A better understanding of predictors of neurological recovery in traumatic spinal cord injury (TSCI) enables clinicians to deliver accurate information to patients and families, justify treatment decisions to administrators, optimize resources utilization and create specific rehabilitation programs according to the expected outcome [1].

The baseline neurological status is recognized as the single most important clinical predictor of neurological recovery [2, 3]

After clinical evaluation, surgeons will often scrutinize computed tomography scan (CT-scan) reconstruction images to assess for pattern of injury and plan surgical management, as the great majority of patients with spinal injuries will undergo CT-scan imaging.

The pattern of injury in the setting of TSCI is an important factor to consider when looking at long-term neurological outcomes. It has been demonstrated that such outcomes are less favorable in flexion distraction injuries in the cervical spine TSCI. However, studies on thoracolumbar TSCI examining potential prognostic factors have never specifically focused on a single type of injury [4]. Because neurological outcomes in thoracolumbar TSCI secondary to burst fractures are known to be different than distraction or shear injuries [5, 6], we deemed useful to independently revisit evaluation of these severe injuries.

Morphological characteristics related to the pattern of thoracolumbar injuries have been widely used for establishing classification schemes because these parameters can usually be obtained from readily available imaging studies. With respect to burst fractures in the thoracolumbar area, many morphological characteristics have been proposed to determine the relationship between the fracture and the intrinsic remaining stability. The loss of vertebral body height and corresponding local or segmental kyphosis [7] are widely used

by clinicians and radiologists to describe these injuries. Although studies often analysed these fracture parameters to provide insight on the occurrence of posterior ligamentous complex [8] or concomitant neurological injury at presentation [9], these measurements were never considered to predict the potential for neurological recovery [2, 6].

Therefore, it remains unclear from the literature if the morphological pattern of burst fracture is associated with neurological recovery. In addition, there is no consensus on which parameter clinicians should use to describe the fracture pattern amongst all the descriptors that have been proposed in the past.

Our objective is to identify specific morphological descriptors in thoracolumbar burst fractures associated with neurological outcome after severe TSCI. We hypothesize that specific features are related to the extent of irreversible injury to the spinal cord and thus the likelihood of neurological recovery in this patient population.

### **6.2.3 Methods**

#### **Patients**

We conducted a retrospective analysis of a prospective cohort of SCI patients from a level 1 trauma centre specialized in SCI care. We screened patients that were consecutively admitted from April 2010 to April 2017 with the following inclusion criteria: 1) patients age over 18 years old; 2) CT-scan performed preoperatively; 3) TSCI associated with unstable thoracolumbar burst fracture from T11 to L2, classified as A3 or A4 according to the AO Spine morphologic classification of thoracolumbar injury [7]; 4) severe neurologic deficit defined as an American Spinal Injury Association Impairment Scale (AIS) grade A, B or C at the neurological evaluation performed preoperatively according to the International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury (ISNCSCI) ; 5) surgical intervention that included decompression and spinal stabilization performed within 3 days (72 hours) of the traumatic event; 6) minimum follow-up of 12 months post-operatively with neurological assessment according to ISNCSCI standards. Patients were

excluded if they were operated in another centre, had adjacent vertebral injuries precluding adequate measurement of normal canal diameter above and below the level of injury, and had TSCI from a penetrating injury. AIS D patients were excluded for a ceiling effect purpose, as their neurological outcome being more predictable overall [10].

## **Data collection**

Neurological recovery was set as the main dependent variable and was defined as an improvement of at least one AIS grade from admission to follow-up at least 6 months after surgical intervention. The energy of the traumatic event was considered as low (trivial trauma, fall from standing height) or high (motor-vehicle or motorcycle accident, pedestrian hit by vehicle, fall from more than 3 meters, high-velocity contact sport injuries).

According to the Advanced Trauma Life Support (ATLS) protocols, all patients were safely transferred from the trauma stretcher and positioned supine on a semi-rigid spinal board for the pre-operative CT-scan duration only. Several parameters characterizing the fracture were measured on the axial, coronal and sagittal reconstructions (Figure 6.1). The following seven parameters characterizing the burst fracture were measured by a single observer.

-Maximal canal compromise (MCC) [11], calculated according to the formula as shown in section D of Figure 6.1.

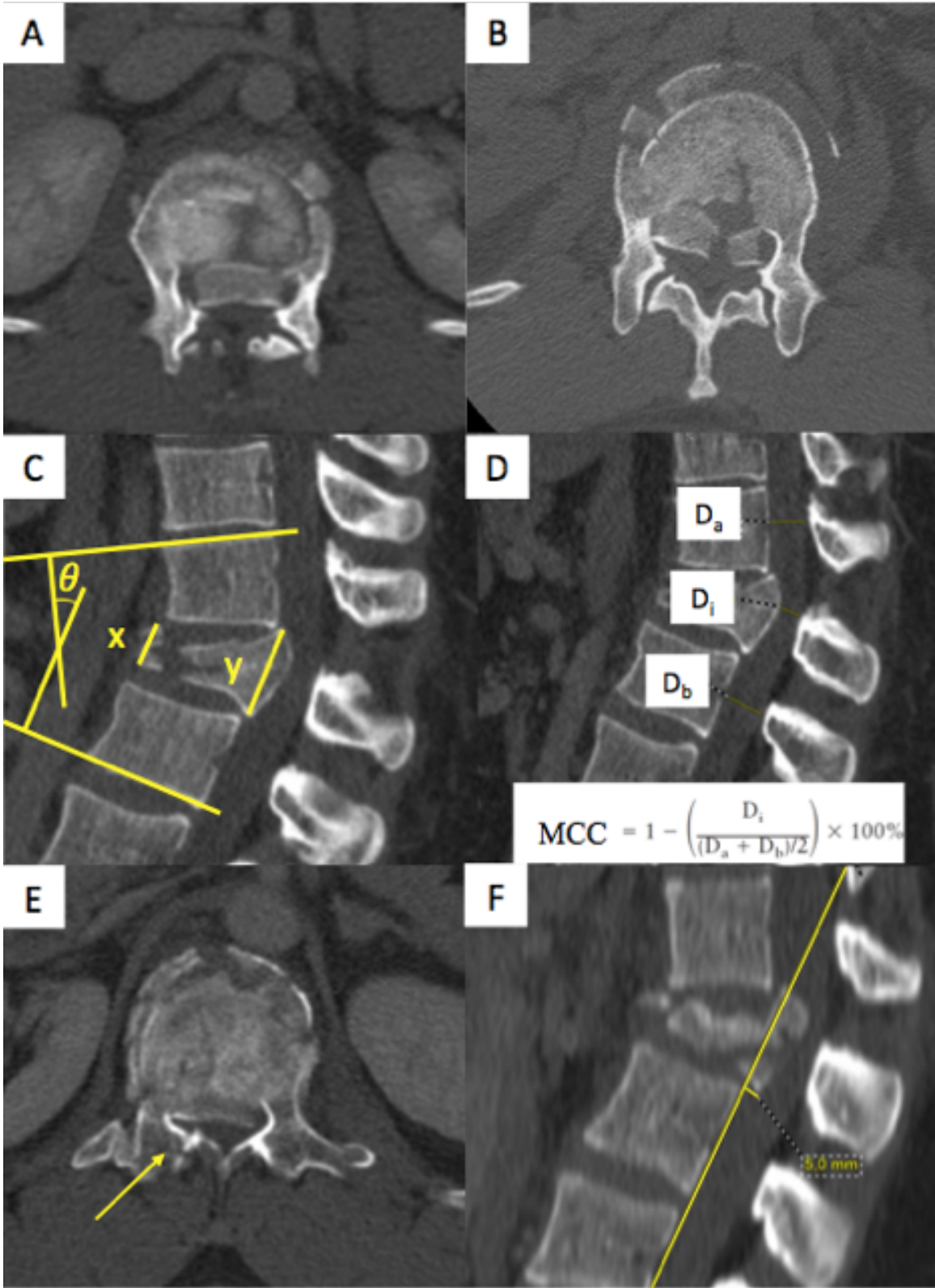
-The presence of comminution of the retropulsed vertebral body fragment reported as a dichotomous variable, defined by the presence of more than one intracanal bony fragment.

-Magnitude of posterior-inferior corner translation [9], measured as the distance in millimeters rounded to the closest integer between the postero-inferior corner of the injured vertebral body and the posterior vertebral line extending from the lower adjacent uninjured level.

-Presence of complete lamina fracture, defined as complete disruption of the lamina in both axial and coronal reconstructions.



- The vertebral body kyphosis index [9], calculated as a ratio between anterior and posterior vertebral body height at the injured level.
- The segmental kyphosis angle between the upper endplate of the vertebrae above and the lower endplate of the vertebra below the injured level.
- The vertebral body comminution according to McCormack et al. [12], described as little (<30 %), more (30 to 60%) or gross (> 60 %) comminution.



### **Figure 6.1** Morphological parameters assessed in article 1

- A. An axial reconstruction demonstrating a non-comminuted retropulsed fragment
- B. An axial reconstruction demonstrating a comminuted retropulsed fragment
- C. A sagittal reconstruction showing the segmental kyphosis angle ( $\theta$ ) and the anterior (x) and posterior (y) vertebral body height measurements
- D. A sagittal reconstruction showing the different mid-sagittal canal diameters used to calculate the MCC with the corresponding formulae
- E. An axial reconstruction with the arrow pointing to a complete lamina fracture
- F. A sagittal reconstruction with representation of the method used to measure the postero-inferior vertebral body corner translation

### **Statistical analysis**

Descriptive statistics were used to outline patient's characteristics. Categorical data are presented with percentages and proportions and compared using chi-square tests. Continuous variables are presented with mean and standard deviation and compared using Mann-Whitney U tests. Univariate binary logistic regression analyses were applied to assess for the association between candidate predictors (descriptors of burst fracture pattern and clinical variables) and neurological recovery. Results are presented as odd ratios with 95 % confidence interval and associated p-value. A receiver operating characteristic (ROC) curve was constructed to assess for the area under the curve as a measure of the postero-inferior corner translation discriminative ability. All the statistical analyses were performed using SPSS Statistic version 24.0 (IBM Corp, NY). Statistical significance was considered when p-value reached  $< 0.05$ .

### **6.2.4 Results**

A total of 31 eligible patients with a severe TSCI due to a thoracolumbar burst fracture were identified from our database. Of those, 4 were excluded because of insufficient follow-up data; 2 patients were excluded because of a concomitant burst fracture at L3.

Therefore, 25 patients were included in the statistical analyses, among which 14 were AIS A, 5 were AIS B and 6 were AIS C upon initial preoperative neurological evaluation.

Table 6.1 describes sociodemographic and clinical characteristics of the final cohort. Patients with and without neurological recovery were similar in terms of age, gender, surgical delay, trauma subtypes and vertebral level injury. Only 1 patient (AIS C) was operated after 24 hours (25.6 hours). The mean Injury Severity Score (ISS) was higher in patients without neurological recovery ( $p = 0.02$ ).

|                            | No recovery   | Recovery      | p    |
|----------------------------|---------------|---------------|------|
| N                          | 10            | 15            |      |
| Age (SD)                   | 50.00 (20.47) | 43.13 (16.20) | 0.41 |
| Initial AIS grade          |               |               |      |
| A                          | 8             | 6             | 0.03 |
| B                          | 2             | 3             |      |
| C                          | 0             | 6             |      |
| Gender (% male)            | 70.0          | 80.0          | 0.57 |
| ISS (SD)                   | 27.44 (7.27)  | 20.93 (5.20)  | 0.02 |
| Surgical delay, hours (SD) | 15.63 (4.55)  | 17.86 (4.99)  | 0.22 |
| Energy (% high energy)     | 50.6          | 66.6          | 0.62 |
| Mechanism of trauma        |               |               |      |
| Sport accident             | 2             | 3             | 0.96 |
| Blunt trauma               | 1             | 2             |      |
| Penetrating trauma         | 0             | 0             |      |
| Fall                       | 5             | 6             |      |
| Vehicule accident          | 2             | 4             |      |
| Level of spinal injury     |               |               |      |
| T11                        | 0             | 1             | 0.56 |
| T12                        | 3             | 6             |      |
| L1                         | 7             | 7             |      |
| L2                         | 0             | 1             |      |

**Table 6.1:** Patient population demographic and clinical characteristics

Table 6.2 outlines the conversion of AIS grade according to the initial neurologic examination for patients with and without neurological recovery. At the yearly follow-up,

6 of the 14 AIS A patients and 3 of the 5 AIS B patients demonstrated recovery. All 6 AIS C patients recovered and 1 was considered neurologically intact at 12 months.

| Follow-up AIS grade |   | A | B | C | D | E | Total |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|-------|
| Initial AIS         | A | 8 | 4 | 0 | 2 | 0 | 14    |
|                     | B | 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 5     |
|                     | C | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 6     |

**Table 6.2:** Neurological status at admission and follow-up

Results from the univariate logistic regressions are shown in Table 6.3 and 6.4. Amongst the clinical variables, the initial AIS grade and ISS were both related to neurological recovery ( $p = 0.04$ ). The initial AIS grade resulted in the highest odds ratio ( $OR=4.64$ ) among clinical parameters. All features involving the morphology of the spinal canal were significantly related to neurological recovery, except for the MCC.

|                   | OR   | C.I. (95%)     | p-value |
|-------------------|------|----------------|---------|
| Age               | 0.98 | [0.93 – 1.03]  | 0.35    |
| Initial AIS grade | 4.64 | [1.07 – 20.03] | 0.04    |
| ISS               | 0.82 | [0.69 – 0.99]  | 0.04    |
| Surgical delay    | 1.11 | [0.93 – 1.32]  | 0.26    |
| Energy            | 1.50 | [0.30 – 7.53]  | 0.62    |

**Table 6.3:** Univariate binary logistic regressions with clinical variables and AIS grade conversion as outcome

|   | OR   | C.I. (95%)      | p-value |
|---|------|-----------------|---------|
| Maximal Canal Compromise (%)                    | 1.01 | [0.96 – 1.06]   | 0.80    |
| Retropulsed fragment comminution                | 0.06 | [0.01 – 0.46]   | 0.01    |
| Postero-inferior corner translation $\geq$ 4 mm | 0.02 | [0.002 – 0.27]  | 0.003   |
| Complete lamina fracture                        | 0.03 | [0.007 – 0.745] | 0.03    |
| Vertebral body kyphosis index                   | 0.01 | [0.00 – 9.35]   | 0.17    |
| Segmental kyphosis angle                        | 1.17 | [0.99 – 1.38]   | 0.06    |
| Vertebral body comminution                      | 4.00 | [0.45 – 35.79]  | 0.22    |

**Table 6.4:** Univariate binary logistic regressions with morphological parameters and AIS grade conversion as outcome

ROC curve analysis calculated a discriminating cut-off value of 3,50 mm for significant postero-inferior corner translation with the optimal combination of 93,3 % specificity and 77,8 % sensitivity. The AUC was calculated at 0,900 which is in the range of [0,8 – 0,9], “good” accuracy. We established the rounded off threshold value at 4 mm for further analysis given the measurement precision on CT-scan sagittal reconstructions. Postero-inferior corner translation of  $\geq$  4 mm displayed the greatest odds ratio (OR=49.00) for absence of neurological recovery followed by retropulsed fragment comminution (OR=16.00), complete lamina fracture (OR 13.50), initial AIS grade (OR=4.64), and ISS (OR=1.21).

### 6.2.5 Discussion

This study is the first to specifically assess the impact of morphological features in thoracolumbar burst fracture on the chronic neurological recovery in SCI patients. An interesting aspect associated with these parameters is related to the fact that they are readily available for most patients since CT-scan is routinely obtained for most patients after severe spine injuries. Results of this study point out morphological characteristics of burst fractures that should be considered when assessing acute thoracolumbar SCI. We evaluated a cohort of patients with injuries that can cause significant long-term distress to both patient and family, and of which outcomes are important to study. We presented the largest cohort of patients with such injuries and adequate long-term follow-up.

We identified 3 morphological characteristics significantly associated to a poor likelihood of neurological recovery. A postero-inferior corner translation  $\geq 4$  mm, complete lamina fracture and comminution of the retropulsed fragment all are radiological signs that are easy to define and available on the initial CT-scan reconstructions. Although postero-inferior corner translation has been shown previously to correlate with the initial ASIA motor score deficit by Radcliff et al [9], this study is the first to assess its relationship with neurological outcome in the chronic period. Moreover, we have identified the relevance of a specific objective threshold value for the postero-inferior corner translation. Its relevance could also lie in the fact that it displayed an odds ratio 10 times higher than the initial AIS grade for absence of neurological recovery, and can be assessed for any patient, contrasting with the clinical evaluation at presentation which can be difficult to perform for sedated/unresponsive patients or those with multiple associated injuries.

When assessing the potential for neurological recovery, our results show that evaluating parameters involving the spinal canal is more helpful than the loss of vertebral body height, kyphosis or vertebral body comminution which do not directly consider spinal canal disruption. Our results suggest that these traditional morphological features describing thoracolumbar burst fractures [13] are not significantly related to neurological recovery in thoracolumbar TSCI.

The MCC and the postero-inferior corner translation are parameters that portray the final position of the damaged vertebral body fragments. It is generally understood that supine CT-scan measures of fragment position underestimate the severity of compression sustained during the trauma [14, 15]. In line with most previous studies [16] the position of the retropulsed fragments evaluated by the MCC was not predictive of neurological recovery in our study. The MCC almost invariably implicate measurement of the displacement of the postero-superior wall, or so called delta fragment. The retropulsion of this fragment during the traumatic event is more likely to compress the spinal canal content against the soft tissue structures of the interlaminar space. However, the magnitude of the postero-inferior wall translation was related to the absence of neurological recovery. Even though it bears the same interpretation limitations as the MCC, it provides more insight on which level of the posterior spinal canal the neural elements may have been compressed against. The retropulsion of the postero-inferior wall during the traumatic event is more likely to compress the spinal content against the bony lamina, therefore potentially amplifying the amount of energy directly transferred to the neural elements. This hypothesis has been supported by a recently published numerical model study [27].

Complete lamina fracture and comminution of the retropulsed fragment are static descriptors that could indicate high energy transfer in structures adjacent to the neural elements. With respect to lamina fractures, several studies suggested that its presence was linked to the occurrence of neurological injury at presentation after burst fractures [17] and to the overall severity of trauma. We present the first results assessing its relationship with worst neurological outcome. The complete lamina fracture is produced either by a greater local energy level, completing a greenstick fracture [18] or by compressive forces directed more posteriorly during the trauma [19]. Both hypotheses involve a greater amount of energy being dissipated in the posterior elements of the spinal column in close proximity of the spinal cord. We interpret the comminution of the retropulsed fragment in a similar manner. Notably, this radiological sign has not previously been described nor studied as a morphological characteristic of burst fractures.



It is understood from biomechanical studies [14, 20] that the amount of energy that is transferred to the neural elements by the bony fragments of the burst fracture during the trauma dictates the tissue destruction hence the neurological deficit. Still, assessing the external level of energy by separating low from high-energy mechanisms is difficult and neglects the wide variability in the level of energy, trauma mechanisms and biomechanical conditions involved during the traumatic event. Therefore, the ISS is utilized as an indicator of the amount of energy distributed inside the body of the polytraumatized patient (internal energy). However, the ISS is not specific to the evaluation of the spine and spinal cord, considering that other body regions are equally considered. In addition, the previous studies on TSCI outcomes that include ISS remain inconsistent [21]. Nevertheless, these reports included cervical and thoracic TSCI with variable pattern of spinal injury and were not specific to thoracolumbar trauma. In our cohort, higher ISS was related to absence of neurological recovery, but with weaker OR than the other variables. Consequently, local morphological features of the fracture are likely to better indicate the local energy sustained by the spinal cord during the trauma and hence the potential for irreversible spinal cord damage.

## **Limitations**

The main limitation of our retrospective study is the small number of patients included, which precluded the possibility for multivariate analysis. Despite a small cohort, patients included in this study displayed a similar AIS conversion rate as shown in other larger scale SCI studies [22]. Again, AIS A showed poorer rate of conversion and AIS C showed the best conversion rate. Other authors provided insight on thoracolumbar burst fractures with similar stratification between severe (AIS A, B or C) and low or no deficit (AIS D or E) [15]. Also, other studies that evaluate radiological patterns of thoracolumbar burst fracture include smaller number of TSCI patients [8, 9] that would fit the inclusion criteria of this study. In addition, since we present the first study looking at morphological features in relation to neurological recovery over an adequate follow-up period, we intend to identify key elements to evaluate in further large-scale studies.

Evaluating MRI parameters would be of great interest to estimate the trauma sustained by the neural elements [11, 23]. It would be valuable to look for a relationship between MRI signal changes or maximal spinal cord compression (MSCC) and parameters found in this study. Skeers et al [5] found no relation between MSCC and AIS grade improvement based on univariate analyses. Their analysis included a small number of patients showing AIS conversion (n=12, 27% of the cohort) and variable patterns of spinal injury. We acknowledge that accessibility for MRI studies to be performed in trauma situations varies from centre to centre and that lack of correlation with MRI parameters could be considered as a limitation in this study. However, the role of urgent MRI in the radiographic evaluation of spinal cord injury is still debated [24]. Since rapid surgical decompression is our institution's utmost priority, MRI is often not used prior to surgical management in order to minimize the risks of delay [25] with the assumption that the results would have little influence on surgical approach [26]. The delay from trauma to surgical intervention in our cohort is shorter than the standard of care in a Canadian population [12].

### **6.2.6 Conclusion**

Classic parameters like vertebral body kyphosis, comminution and loss of height do not provide insight on the potential for neurological recovery in severe TSCI patients that undergo surgery. Our data show that other morphological features of thoracolumbar burst fractures are related to the neurological outcome in patients sustaining acute AIS A, B or C TSCI. Specifically, we focus on the importance of the amount of posterior translation of the postero-inferior vertebral body wall (>4 mm), comminution of the retropulsed fragment and the presence of a complete lamina fracture as better indicators of poor prognostic for neurological recovery as opposed to clinical predictors of chronic neurological outcome. Further analysis of the implication of these morphological features in more powered studies for multivariate analysis could provide insight on their predictive potential and ultimately be used in future classification schemes.

## 6.2.7 References

1. Wilson JR, Cadotte DW, Fehlings MG (2012) Clinical predictors of neurological outcome, functional status, and survival after traumatic spinal cord injury: a systematic review. *J Neurosurg Spine* 17:11-26. doi: 10.3171/2012.4.AOSPINE1245
2. Wilson JR, Grossman RG, Frankowski RF, Kiss A, Davis AM, Kulkarni AV, Harrop JS, Aarabi B, Vaccaro A, Tator CH, Dvorak M, Shaffrey CI, Harkema S, Guest JD, Fehlings MG (2012) A clinical prediction model for long-term functional outcome after traumatic spinal cord injury based on acute clinical and imaging factors. *Journal of neurotrauma* 29:2263-2271. doi: 10.1089/neu.2012.2417
3. Mputu P, Beauséjour M, Richard-Denis A, Thompson C, Mac-Thiong JM (2018) Early predictors of neurological recovery after traumatic spinal cord injury: A systematic review.
4. van Middendorp JJ, Hosman AJ, Doi SA (2013) The effects of the timing of spinal surgery after traumatic spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis. *Journal of neurotrauma* 30:1781-1794. doi: 10.1089/neu.2013.2932
5. Skeers P, Battistuzzo CR, Clark JM, Bernard S, Freeman BJC, Batchelor PE (2018) Acute Thoracolumbar Spinal Cord Injury: Relationship of Cord Compression to Neurological Outcome. *The Journal of bone and joint surgery American volume* 100:305-315. doi: 10.2106/jbjs.16.00995
6. Dvorak MF, Noonan VK, Fallah N, Fisher CG, Finkelstein J, Kwon BK, Rivers CS, Ahn H, Paquet J, Tsai EC, Townson A, Attabib N, Bailey CS, Christie SD, Drew B, Fourney DR, Fox R, Hurlbert RJ, Johnson MG, Linassi AG, Parent S, Fehlings MG (2015) The influence of time from injury to surgery on motor recovery and length of hospital stay in acute traumatic spinal cord injury: an observational Canadian cohort study. *Journal of neurotrauma* 32:645-654. doi: 10.1089/neu.2014.3632
7. Reinhold M, Audige L, Schnake KJ, Bellabarba C, Dai LY, Oner FC (2013) AO spine injury classification system: a revision proposal for the thoracic and lumbar spine. *European spine journal* : official publication of the European Spine Society, the European

Spinal Deformity Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society 22:2184-2201. doi: 10.1007/s00586-013-2738-0

8. Hiyama A, Watanabe M, Katoh H, Sato M, Nagai T, Mochida J (2015) Relationships between posterior ligamentous complex injury and radiographic parameters in patients with thoracolumbar burst fractures. *Injury* 46:392-398. doi: 10.1016/j.injury.2014.10.047

9. Radcliff K, Su BW, Kepler CK, Rubin T, Shimer AL, Rihn JA, Harrop JA, Albert TJ, Vaccaro AR (2012) Correlation of posterior ligamentous complex injury and neurological injury to loss of vertebral body height, kyphosis, and canal compromise. *Spine* 37:1142-1150. doi: 10.1097/BRS.0b013e318240fed3

10. Whiteneck G, Gassaway J (2012) The SCIR rehab project: what rehabilitation interventions are most strongly associated with positive outcomes after spinal cord injury? *The journal of spinal cord medicine* 35:482-483. doi: 10.1179/2045772312y.0000000083

11. Fehlings MG, Rao SC, Tator CH, Skaf G, Arnold P, Benzel E, Dickman C, Cuddy B, Green B, Hitchon P, Northrup B, Sonntag V, Wagner F, Wilberger J (1999) The optimal radiologic method for assessing spinal canal compromise and cord compression in patients with cervical spinal cord injury. Part II: Results of a multicenter study. *Spine* 24:605-613. doi: 10.1097/00007632-199903150-00023

12. McCormack T, Karaikovic E, Gaines RW (1994) The load sharing classification of spine fractures. *Spine* 19:1741-1744. doi: 10.1097/00007632-199408000-00014

13. Cantor JB, Lebowhl NH, Garvey T, Eismont FJ (1993) Nonoperative management of stable thoracolumbar burst fractures with early ambulation and bracing. *Spine* 18:971-976. doi: 10.1097/00007632-199306150-00004

14. Wilcox RK, Boerger TO, Allen DJ, Barton DC, Limb D, Dickson RA, Hall RM (2003) A dynamic study of thoracolumbar burst fractures. *The Journal of bone and joint surgery American volume* 85:2184-2189. doi: 10.2106/00004623-200311000-00020

15. Yugue I, Aono K, Shiba K, Ueta T, Maeda T, Mori E, Kawano O (2011) Analysis of the risk factors for severity of neurologic status in 216 patients with thoracolumbar and lumbar burst fractures. *Spine* 36:1563-1569. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181f58d56
16. Gupta R, Mittal P, Sandhu P, Saggar K, Gupta K (2014) Correlation of qualitative and quantitative MRI parameters with neurological status: a prospective study on patients with spinal trauma. *Journal of clinical and diagnostic research : JCDR* 8:Rc13-17. doi: 10.7860/jcdr/2014/9471.5181
17. Skiak E, Karakasli A, Harb A, Satoglu IS, Basci O, Havitcioglu H (2015) The effect of laminae lesion on thoraco-lumbar fracture reduction. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research : OTSR* 101:489-494. doi: 10.1016/j.otsr.2015.02.011
18. Ozturk C, Ersozlu S, Aydinli U (2006) Importance of greenstick lamina fractures in low lumbar burst fractures. *Int Orthop* 30:295-298. doi: 10.1007/s00264-005-0052-0
19. Panjabi MM, Crisco JJ, Vasavada A, Oda T, Cholewicki J, Nibu K, Shin E (2001) Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves. *Spine* 26:2692-2700. doi: 10.1097/00007632-200112150-00012
20. Boisclair D, Mac-Thiong JM, Parent S, Petit Y (2013) Compressive loading of the spine may affect the spinal canal encroachment of burst fractures. *J Spinal Disord Tech* 26:342-346. doi: 10.1097/BSD.0b013e318246b180
21. Kaminski L, Cordemans V, Cernat E, M'Bra KI, Mac-Thiong JM (2017) Functional Outcome Prediction after Traumatic Spinal Cord Injury Based on Acute Clinical Factors. *Journal of neurotrauma* 34:2027-2033. doi: 10.1089/neu.2016.4955
22. Fehlings MG, Vaccaro A, Wilson JR, Singh A, D WC, Harrop JS, Aarabi B, Shaffrey C, Dvorak M, Fisher C, Arnold P, Massicotte EM, Lewis S, Rampersaud R (2012) Early versus delayed decompression for traumatic cervical spinal cord injury: results of the Surgical Timing in Acute Spinal Cord Injury Study (STASCIS). *PloS one* 7:e32037. doi: 10.1371/journal.pone.0032037

23. Mabray MC, Talbott JF, Whetstone WD, Dhall SS, Phillips DB, Pan JZ, Manley GT, Bresnahan JC, Beattie MS, Haefeli J, Ferguson AR (2016) Multidimensional Analysis of Magnetic Resonance Imaging Predicts Early Impairment in Thoracic and Thoracolumbar Spinal Cord Injury. *Journal of neurotrauma* 33:954-962. doi: 10.1089/neu.2015.4093
24. Ahuja CS, Schroeder GD, Vaccaro AR, Fehlings MG (2017) Spinal Cord Injury-What Are the Controversies? *J Orthop Trauma* 31 Suppl 4:S7-S13. doi: 10.1097/BOT.0000000000000943
25. Bourassa-Moreau E, Mac-Thiong JM, Feldman DE, Thompson C, Parent S (2013) Non-neurological outcomes after complete traumatic spinal cord injury: the impact of surgical timing. *Journal of neurotrauma* 30:1596-1601. doi: 10.1089/neu.2013.2957
26. Burke JF, Yue JK, Ngwenya LB, Winkler EA, Talbott J, Pan J, Ferguson A, Beattie M, Bresnahan J, Haefeli J, Whetstone W, Suen C, Huang MC, Manley GT, Tarapore PE, Dhall SS (2016). Ultra-Early (<12 Hours) Decompression Improves Recovery After Spinal Cord Injury Compared to Early (12-24 Hours) Decompression. *Neurosurgery* 63. doi: 10.1227/01.neu.0000489751.59414.45
27. Diotalevi L, Bailly N, Wagnac E, Mac-Thiong JM, Goulet J, Petit Y (2020) Dynamics of spinal cord compression with different patterns of thoracolumbar burst fractures: numerical simulations using finite element modelling. *Clinical Biomechanics* 72:186-194. doi : 10.1016/j.clinbiomech.2019.12.023

## Chapitre 7 Analyse complémentaire

Le but de l'analyse complémentaire est d'intégrer les notions dérivées des articles 1 et 2 afin de formuler une réponse à l'objectif complémentaire, qui est de déterminer si l'impact du délai chirurgical sur la récupération neurologique varie en fonction des différentes morphologies post-traumatiques du canal spinal. Le chapitre 7 présente la méthodologie et les résultats de l'analyse : ceux-ci sont interprétés au sein de la discussion générale à la section 8.1.

Les données de la cohorte de l'article 2 furent reprises et analysées à la lumière du seuil chirurgical de 21,47 h tel que démontré à l'article 1. Aucun patient n'a été opéré après le seuil de 25,66 h, significatif pour l'amélioration du grade AIS. Les analyses se concentrent donc sur le lien entre les paramètres morphologiques et la récupération d'un ou plusieurs niveaux neurologiques.

Le test statistique t de Student est utilisé pour la variable continue. Le test de Kolmogorov-Smirnov fut utilisé pour démontrer la distribution normale de cette variable (délai chirurgical). Les tests de Khi-deux de Pearson et exact de Fisher sont utilisés pour les variables nominales en fonction de des effectifs théoriques. Le seuil de signification statistique est fixé à  $\alpha = 0,05$ . Le tableau 6.1 représente les données catégorisées des délais chirurgicaux, des issues neurologiques et des paramètres morphologiques de chacun des 25 patients de la série ainsi que les délais chirurgicaux en heures.

| Patients (no) | Récupération de un ou plusieurs grades AIS | Récupération de un ou plusieurs NLI | Délai chirurgical (heures) | Chirurgie précoce <21,47 h | Fracture complète de lame | Comminution du fragment rétropulsé | Recul >4mm mur postéro-inférieur |
|---------------|--|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1             | 1  | 0                                   | 22,52                      | 0                          | 0                         | 1                                  | 0                                |
| 2             | 1  | 0                                   | 25,58                      | 0                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 3             | 0  | 0                                   | 21,48                      | 0                          | 1                         | 0                                  | 0                                |
| 4             | 1  | 1                                   | 21,50                      | 0                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 5             | 1  | 1                                   | 21,47                      | 0                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 6             | 0  | 0                                   | 12,67                      | 1                          | 1                         | 1                                  | 1                                |
| 7             | 0  | 0                                   | 15,30                      | 1                          | 1                         | 1                                  | 1                                |
| 8             | 1  | 0                                   | 17,00                      | 1                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 9             | 1  | 0                                   | 19,28                      | 1                          | 0                         | 1                                  | 0                                |
| 10            | 0  | 0                                   | 20,60                      | 1                          | 1                         | 1                                  | 1                                |
| 11            | 1  | 0                                   | 15,17                      | 1                          | 0                         | 1                                  | 0                                |
| 12            | 1  | 0                                   | 7,17                       | 1                          | 0                         | 0                                  | 1                                |
| 13            | 0  | 0                                   | 8,18                       | 1                          | 1                         | 1                                  | 1                                |
| 14            | 0  | 1                                   | 14,52                      | 1                          | 0                         | 1                                  | 1                                |
| 15            | 0  | 1                                   | 10,05                      | 1                          | 1                         | 1                                  | 1                                |
| 16            | 1  | 1                                   | 20,62                      | 1                          | 1                         | 0                                  | 0                                |
| 17            | 0  | 1                                   | 20,75                      | 1                          | 1                         | 1                                  | 1                                |
| 18            | 1  | 1                                   | 14,05                      | 1                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 19            | 1  | 1                                   | 20,48                      | 1                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 20            | 0  | 1                                   | 15,10                      | 1                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 21            | 1  | 1                                   | 21,18                      | 1                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 22            | 1  | 1                                   | 9,47                       | 1                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 23            | 0  | 1                                   | 17,67                      | 1                          | 1                         | 1                                  | 1                                |
| 24            | 1  | 1                                   | 15,92                      | 1                          | 0                         | 0                                  | 0                                |
| 25            | 1  | 1                                   | 16,45                      | 1                          | 0                         | 0                                  | 0                                |

**Tableau 7.1** : Données catégorisées et délai chirurgical des 25 patients de la série de l'article 1 ( 0 = absence ; 1 = présence)

Le survol des données du Tableau 7.1 permet d'identifier 5 patients ayant été opérés à plus de 21,47 h de l'évènement traumatique et 20 patients ayant été pris en charge avant ce seuil (sous-groupe chirurgie précoce).

Chez les 14 patients qui démontrent une récupération d'un ou plusieurs NLI, le délai moyen de prise en charge est similaire à celui des 11 patients qui ne récupèrent pas (17,09 h vs 16,81 h,  $p = 0,892$ ). Dans le sous-groupe chirurgie précoce, 12 patients sur 20 (60 %)



démontrent une récupération d'un ou plusieurs niveaux neurologiques versus 2 patients sur 5 (40 %) dans le sous-groupe comparatif.

La comparaison du taux de récupération démontre une tendance vers une meilleure récupération neurologique chez les patients opérés avant 21,47 h ( $p = 0,140$ ) sans atteindre le seuil de signification statistique.

En considérant l'issue de la récupération d'un ou plusieurs grades AIS, 11 patients sur les 20 (55 %) du sous-groupe chirurgie précoce récupèrent versus 4 patient sur les 5 (80%) du groupe comparatif ( $p = 0,615$ ).

Les patients présentant un recul de plus de 4 mm du mur postéro-inférieur ont été opérés en moyenne plus rapidement (14,10 h vs 18,58 h ,  $p = 0,023$ ). Il n'y a pas de lien entre le délai chirurgical et la fracture complète de la lame ( $p = 0,692$ ) et la comminution du fragment rétro pulsé ( $p = 0,421$ ).

Les résultats des analyses des 20 patients ayant été opérés sous le seuil de 21,47 h sont présentées au tableau 6.2. Aucun lien n'est retrouvé entre les paramètres morphologiques et la récupération neurologique chez les patients du sous-groupe chirurgie précoce.

| N                        | Fracture de lame complète |          | Comminution du fragment rétro pulsé |          | Recul > 4 mm du mur postéro-inférieur |          |
|--------------------------|---------------------------|----------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
|                          | Absence                   | Présence | Absence                             | Présence | Absence                               | Présence |
| Absence de récupération  | 4                         | 4        | 2                                   | 6        | 3                                     | 5        |
| Présence de récupération | 8                         | 4        | 8                                   | 4        | 8                                     | 4        |
| p                        | 0,648                     |          | 0,170                               |          | 0,362                                 |          |

**Tableau 7.2** : Analyse par tableaux croisés des paramètres morphologiques en relation avec la récupération d'un ou plusieurs NLI chez les patients opérés sous le seuil de 21,47 heures

Dans cette série, on retrouve au scan préopératoire les trois paramètres morphologiques chez 7 patients. Tous ont été pris en charge sous le seuil des 21,47 h. Aucun de ces patients ne récupèrent au niveau du grade AIS, mais 3 d'entre eux récupèrent au niveau du NLI ( $p = 0,251$ ).

## Chapitre 8 Discussion générale

Ce chapitre récapitule les points de discussion déjà abordés aux chapitres 5.2.5 et 6.2.5, et aborde l'hypothèse complémentaire à la lumière des résultats du chapitre 7. Les principales limitations sont également rappelées et la section Perspectives offre de nouvelles questions de recherche en plus d'introduire l'article 3 à l'Annexe A.

### 8.1 Discussion

Ces travaux sont les premiers à analyser l'issue neurologique à long terme spécifiquement pour une cohorte de blessés médullaires thoraco-lombaires avec paralysie sévère des membres inférieurs. Il s'agit de lésions graves, survenant souvent dans le contexte de polytraumatisme, qui amènent nombre de conséquences à long terme chez le patient. L'étude de sous-populations spécifiques de blessés médullaires, en utilisant par exemple des critères d'inclusion plus strictes au niveau de la sévérité initiale et du niveau neurologique, cadre dans la tendance actuelle qui voit l'émergence d'études prospectives davantage ciblées en réponse aux débats suscités par les essais cliniques jalons, qui ont historiquement inclus de larges populations de patients hétérogènes (1 - Ahuja et al., 2017).

Dans la prise en charge d'un patient ayant subi une LTME, une des premières questions auxquelles fait face le clinicien, qu'elle soit posée par le patient ou la famille, concerne l'évolution de l'état neurologique au long cours. Plusieurs facteurs sont impliqués dans la prédiction de cette importante issue; tel que démontré au chapitre 2, ces différents facteurs sont moins bien explorés pour la population étudiée que pour les blessés médullaires de niveau cervical (El Teclé et al., 2016; Skeers et al., 2018; Mputu et al., 2018).

En contexte traumatique, la décision de procéder à une chirurgie hâtive relève d'une concertation entre le patient et le chirurgien, l'équipe de traumatologie et, au besoin, les intervenants d'autres spécialités médicales. De nombreux facteurs sont pris en compte par les intervenants et le poids de chacun doit être évalué afin de bien évaluer la balance entre le risque de la chirurgie et les bénéfices potentiels qui en découlent.

L'issue neurologique est un concept d'une importance majeure et doit être pris en compte lors de la décision de procéder. Telles que mentionnées au chapitre 2, plusieurs issues peuvent être influencées par une prise en charge chirurgicale précoce. En effet, peu importe le patron de fracture, il est souvent justifié de procéder à une intervention hâtive pour limiter les complications pré et post-opératoires, pour faciliter les soins de la période post-opératoire (positionnement, mobilisation, gestion de la douleur, opérations subséquentes potentielles) et pour diminuer le temps de séjour aux soins intensifs (Croce et al., 2001 ; Cengiz et al., 2008 ; Bourassa-Moreau et al., 2013). Certaines situations obligent les chirurgiens à retarder la prise en charge pour respecter les priorités de réanimation, procéder à des interventions plus urgentes sur le plan vital et ce afin de procéder de façon sécuritaire, de concert avec l'équipe médicale (O'Boynick et al., 2014).

La prédiction de l'issue neurologique devient ainsi primordiale dans l'argumentaire afin de justifier une intervention précoce dans le contexte traumatique où plusieurs organes sont impliqués. L'obtention d'un seuil objectif théorique de délai chirurgical favorise la communication et la concertation entre experts et permet d'organiser le système de soins en conséquence.

L'article 1 répond bien aux objectifs du volet « délai chirurgical » : l'importance du moment de la prise en charge pour la récupération neurologique est soutenue par l'obtention de seuils de délai objectifs spécifiques aux issues neurologiques clés dans l'évaluation à long terme des blessés médullaires. Le seuil de délai chirurgical démontré comme améliorant les perspectives de récupération du grade AIS est de 25,66 heures. Le seuil pour la récupération d'un ou plusieurs niveaux neurologiques est de 21,47 heures. On retrouve le seuil de 25,66 heures pour l'amélioration significative du score moteur chez les patients avec atteinte neurologique complète (ASIA A).

Ces résultats sont particulièrement importants considérant la grande variabilité des seuils utilisés dans la littérature actuelle, allant de moins de 8 heures à moins de 72 heures (Cengiz et al., 2008; Burke et al., 2016; Rutges et al. 2017). Il est important de spécifier que le

consensus sur 24 heures est basé sur une estimation empirique du délai qui prend en considération le temps de prise en charge des soins pré-hospitaliers, le temps de transfert inter-hospitalier, le temps nécessaire pour la stabilisation médicale et l'obtention de l'imagerie pertinente. C'est cette rationnelle qui a soutenu la publication de l'étude STASCIS (Fehlings et al., 2012), telle que décrite au chapitre 2. Les résultats significatifs de cette étude sont retrouvés lors de l'évaluation d'une issue spécifique, l'amélioration de 2 grades AIS, concernant des patients avec des lésions traumatiques cervicales avec un suivi de 6 mois en post-opératoire.

Ainsi, l'article 1 comble le vide dans les connaissances concernant le délai optimal pour la prise en charge chez les LTME, cette fois, en thoraco-lombaire. Sa méthodologie se base notamment sur les travaux du groupe de l'Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal concernant les LTME cervicales, premier à avoir utilisé le concept statistique d'arbres de classification et de régression (CART) pour objectiver un délai chirurgical optimal (Facchinello et al., 2018). Il fut démontré que ce délai objectif varie entre 18 et 20 heures en fonction de l'issue neurologique étudiée. Les trois issues considérées dans cet article étaient l'amélioration d'au moins un grade AIS (délai < 19 heures), l'amélioration de 2 grades AIS (délai < 18 heures) et l'amélioration de 2 niveaux neurologiques (délai < 20 heures). Ces délais sont tous plus courts que le consensus de 24 heures, ce qui concorde avec le concept de « Time is Spine », un concept bien supporté par les modèles animaux de lésion médullaire (1 - Ahuja et al., 2017).

Les patients inclus dans l'article 1 furent pris en charge par un service de traumatologie et de chirurgie spinale dont la philosophie était de translater, lorsque possible, les résultats de l'étude STASCIS aux blessés médullaires d'autres niveaux neurologiques que cervical; la majorité des patients furent recrutés après sa publication en 2012. Cela explique la distribution du délai chirurgical tel que présentée à la Figure 5.2. Les résultats de l'article 1, tout comme ceux de présentés par Facchinello et al., démontrent qu'un seuil de délai encore plus court que 24 heures est une variable primordiale pour optimiser la récupération neurologique.

Les délais optimaux retrouvés dans l'article 1 diffèrent également en fonction de l'issue neurologique étudiée. Il ne fut pas possible d'évaluer l'issue de l'amélioration de 2 grades AIS dans cette population de LTME thoraco-lombaire étant donné que seulement 6 patients sur les 35 patients ont présenté une telle récupération neurologique. Les 3 issues à long terme évaluées, soit l'amélioration d'au moins un grade AIS, d'au moins un niveau neurologique et d'au moins 10 points sur le score moteur sont reconnues comme des seuils valides et cliniquement importants pour le patient (Steeves et al., 2007). Il est donc raisonnable de recommander que la prise en charge chirurgicale soit entamée avant le seuil de délai le plus court objectivé, soit 21,47 heures, lorsque l'on veut optimiser les chances de récupération neurologique significative.

De plus, ce seuil objectif fut déterminé sans tenir compte des lésions associées de chacun des patients, ce qui, de concert avec l'inclusion de multiples types de mécanismes lésionnels, en renforce la validité externe. Il s'agit d'une limite de temps acceptable qu'il est possible, à notre avis, de respecter pour la grande majorité des patients souffrant de LTME thoraco-lombaire dans le contexte du système de santé québécois et canadien (Gleenie et al., 2017). Il est possible que de raccourcir le délai établi comme consensus ouvre la porte à l'obligation de planifier la chirurgie en dehors des heures ouvrables (soirs/nuits) dans un plus grand nombre de cas. Ce type de réorganisation de la pratique et du milieu de soin passe notamment par l'évaluation de la sécurité des patients (Cortegiani et al., 2019). L'impact du moment de la journée auquel la chirurgie est entreprise sur la survenue de complications et/ou sur l'issue neurologique demeure à être démontré dans la littérature (2 - Wilson et al., 2012 ; Grossman et al., 2012 ; Jiang et al., 2019).

L'obtention d'un délai objectif est important pour changer la perspective du seuil optimal à considérer comme étalon d'or. Un seuil étalon n'est pas seulement important pour la planification de la prise en charge chirurgicale : il s'agit d'un concept essentiel pour la bonne allocation des ressources pour une organisation conséquente du système de soins pré-hospitalier et des structures intra-hospitalières ainsi que pour l'homogénéisation des pratiques, afin que les intervenants, mieux éduqués, soient en mesure d'offrir des soins globaux optimaux. Le même concept s'applique dans la gestion d'autres pathologies

nécessitant une prise en charge hyper aigue, comme le traitement des accidents vasculaires cérébraux emboliques, des fractures ouvertes ou des infarctus du myocarde.

Par contre, il est reconnu que de nombreux facteurs peuvent influencer la perspective de récupération neurologique, et que la majorité de ceux-ci, comme les facteurs démographiques ou ceux liés aux caractéristiques même du traumatisme, sont non-modifiables. Pour le chirurgien, il est donc important de rechercher et connaître les interactions possibles entre ces facteurs non-modifiables et les autres sur lesquels il est en mesure d'agir. Certains patients, malgré une prise en charge sous le seuil de délai objectif démontré à l'article 1, n'ont pas démontré de récupération neurologique entre l'évaluation initiale et les 12 mois de suivi. Dans un contexte de soins aigus, il est donc nécessaire de rechercher quels patients bénéficieraient davantage que d'autres d'une chirurgie précoce, et de savoir les caractériser. L'exemple hypothétique de la nécessité de choisir qui opérer en premier lors de la prise en charge simultanée de deux patients arborant le même type de traumatisme et le même déficit à examen clinique initial peut être soulevé.

Ici, l'utilisation du scan préopératoire à la recherche de facteurs pronostics est judicieuse car cet examen radiologique, peu coûteux et rapide, est requis dans l'évaluation radiologique de tous les patients. L'article 2 répond aux objectifs du volet « paramètres » : on y découvre de nouveaux paramètres morphologiques, qui se distancient de ceux déjà utilisés dans les classifications actuelles des fractures de types « burst », et qui offrent une meilleure appréciation du traumatisme subit par les éléments neuraux de par leur proximité avec le canal spinal et leur lien avec le pronostic de récupération du grade AIS. De plus, ils sont par définition de nature qualitative et faciles à mesurer chez tous les patients, à l'opposé de l'évaluation clinique initiale chez le polytraumatisé, qui peut être compliquée par la sédation, le coma, la douleur ou les traumas appendiculaires associés.

Les trois paramètres morphologiques retrouvés sont la translation postérieure du mur postéro-inférieur du corps vertébral, la présence d'une fracture complète de la lame, et la présence de comminution du fragment du corps vertébral rétropulsé. De plus, nous avons pu documenter une valeur seuil de 4 mm de translation du mur postéro-inférieur, qui

démontre un ratio de cote d'association avec l'absence de récupération neurologique 10 fois supérieur à celui de l'examen neurologique initial. Également, cette valeur seuil facilite grandement la mesure du paramètre, une mesure accessible sur tout logiciel de visualisation des images scanographiques. Ces paramètres clés diffèrent grandement, de par leur localisation entourant le canal spinal, des indices souvent décrits dans le rapport radiologique concernant l'atteinte du corps vertébral, comme la cyphose locale, la cyphose segmentaire ou la comminution globale du corps vertébral. La magnitude de ces derniers paramètres n'est pas reliée à la présence ou non de récupération neurologique.

La mesure du recul postérieur de la portion postéro-inférieure du corps vertébral, dans le cadre de l'évaluation radiologique de la fracture de type « burst », souffre de la même limitation importante que la mesure du MCC : il s'agit d'une mesure rapportant la position finale d'un fragment ayant pu se déplacer davantage durant l'évènement traumatique que reflété par l'image statique retrouvée sur le scan pré-opératoire (Wilcox et al., 2003). Malgré cela, la présence d'une forte association avec un pauvre pronostic de récupération neurologique, contrairement à l'absence de telle association devant la magnitude du MCC, renseigne sur l'importance potentielle de la direction des fragments et de la dissipation de l'énergie sur la moelle épinière. En effet, le calcul du MCC implique la mesure du plus petit diamètre du canal spinal au niveau lésé, qui s'effectue presque invariablement au niveau du fragment postéro-supérieur. Ce fragment a davantage de chances de comprimer le sac dural contre les tissus mous de l'espace interlaminaire, plutôt que contre la lame en soi. Tel que mentionné plus bas dans la section perspective, les trouvailles de l'article 2 suggèrent l'étude de la direction des fragments rétro-pulsés est capitale dans la compréhension de la dissipation de l'énergie sur la moelle épinière et l'impact sur la sévérité de la lésion neurologique. La démonstration numérique de l'article 3 présenté à l'Annexe A confirme l'importance du recul du mur postéro-inférieur sur les contraintes subies par la moelle épinière en comparaison avec celle du recul du mur postéro-supérieur.

L'article 2 a démontré le lien entre des paramètres morphologiques spécifiques aux fractures de type « burst » et l'issue neurologique à long terme. Étant donné que tous les patients de cette série furent opérés sous le seuil de délai chirurgical démontré par l'article



2 pour la même issue (25,66 h, amélioration d'un ou plusieurs grade AIS), répondre à l'objectif complémentaire n'est possible qu'en regard de l'amélioration d'un ou plusieurs niveaux neurologiques. Aucun lien ne fut retrouvé entre la présence des paramètres morphologiques et cette issue neurologique chez les patients ayant bénéficié d'une chirurgie précoce, sous les 21,47 h. Cela suggère que l'effet de la chirurgie précoce sur l'issue neurologique semble être indépendant du patron de fracture. Ainsi, à la lumière de ces résultats, il n'y a pas de sous-groupe de patients, catégorisés en fonction de la morphologie de la fracture, qui bénéficie davantage que d'autres d'une chirurgie précoce. En bref, l'effet d'une chirurgie précoce ne semble pas modifié par la présence de paramètres morphologiques pertinents sur le plan neurologique.

Il est intéressant de noter la différence entre les issues retrouvées chez les 5 patients opérés après le seuil de 21,47 h. La différence entre les taux de récupération du grade AIS (80 %) et du NLI (40 %) retrouvée apparaît contre-intuitive. Similairement à la variabilité des seuils de délai chirurgical retrouvés dans la littérature, tel que discuté à l'article 2 au chapitre 5.2.5, les conclusions à tirer de l'exploration de ce type de données semblent varier en fonction de l'issue neurologique visée.

Ainsi, il est important d'utiliser ces résultats pour éviter d'adopter une attitude fataliste devant la présence de paramètres morphologiques liés à un pauvre pronostic de récupération (Bourassa-Moreau et al., 2016). En effet, l'analyse démontre que malgré la présence de plusieurs paramètres morphologiques aggravants le pronostic de la récupération du grade AIS, 60 % des patients du sous-groupe ayant bénéficié d'une chirurgie précoce montrent une récupération d'un ou plusieurs niveaux neurologiques. Ce résultat est considéré comme excellent pour une cohorte de blessés médullaires avec atteinte motrice sévère lorsque comparé à d'autres cohortes avec des délais plus importants (McLain et al., 1999 ; Chipman et al., 2004 ; McKinley et al., 2004). Ainsi, la recommandation à retenir pour la planification de la chirurgie de décompression et de stabilisation est de respecter le seuil de délai chirurgical suggéré à l'article 1, sans être défaitiste devant la présence de paramètres morphologiques de mauvais pronostic.

Cette recommandation est particulièrement valide lorsqu'on observe la quantité d'articles dans la littérature voulant décrire et documenter l'impact de la compression résiduelle telle que mesurée par le MCC (Tableau 2.1). Un comblement important du canal par les fragments osseux demeure un signe radiologique impressionnant qui a suscité beaucoup d'intérêt et de publications, particulièrement en ce qui concerne le traumatisme du rachis cervical (Furlan et al., 2007). L'article 1 a inclus le MCC comme variable prédictive potentielle dans le modèle statistique d'arbre de régression et de classification. L'article 2 a permis de faire une comparaison relative de l'importance du MCC versus d'autres paramètres morphologiques clés. Les deux articles ne révèlent pas de lien entre la magnitude du MCC et le potentiel de récupération neurologique. Ces trouvailles vont dans le même sens que plusieurs articles récents réfutant le rôle du MCC dans la prédiction de la récupération neurologique (Skeers et al., 2018) ou même dans la sévérité initiale de la lésion médullaire (Mabray et al., 2016). Bien que l'évaluation de l'intégrité et de l'anatomie du mur postérieur du corps vertébral soit importante pour planifier certains gestes techniques pour la décompression chirurgicale du sac dural, nous suggérons que l'évaluation du MCC tel que décrit, sur le scan pré-opératoire, ne soit pas pris en compte comme variable potentielle dans les futures études voulant aborder des modèles de prédiction de la récupération neurologique à long terme.

## 8.2 Limitations

La limitation la plus importante demeure le petit nombre de patients inclus dans ces études. Le nombre de patients limite la portée et la faisabilité d'analyses multivariées, qui n'ont donc pas pu être conduites dans le cadre de ces travaux. Notamment, le petit nombre de patients avec fracture de type « burst » opérés après le seuil de 21,47 h limite la possibilité de créer des sous-groupes comparatifs de taille similaire. Également, à l'article 1, le modèle prédictif par CART, par manque d'effectifs pour la création d'embranchements, n'a pu discriminer un seuil de délai chirurgical spécifique à chacun des mécanismes traumatiques impliqués (Reinhold et al., 2010). De plus, une étude à plus grand déploiement permettrait de raffiner le seuil objectif, de consolider davantage le concept voulant qu'une chirurgie de décompression précoce améliore l'issue neurologique à long terme, et de solidifier les conclusions de l'article 1 afin de modifier à la baisse le délai optimal subjectif faisant consensus à l'heure actuelle.

Par contre, l'article 2 étudie la plus grande série de LTME sévères secondaire à une fracture de type « burst » thoraco-lombaires, avec un suivi clinique de 12 mois minimum. Il en va de même pour la série de patients de l'article 1; en effet, la majorité des articles qui étudient l'issue neurologique en fonction du délai chirurgical incluent des LTME des niveaux cervical (Fehlings et al., 2012), thoracique (Bourassa-Moreau et al., 2016) ou lombaire (Croce et al., 2001 ; McKinley et al., 2004). Aucun n'offre une analyse spécifique sur autant de LMTE thoraco-lombaire avec caractéristiques similaires que celles présentées dans les articles 1 et 2. Il s'agit donc des conclusions les plus précises dans un corps de littérature qui rassemble principalement des revues de cas rétrospectives (van Middendorp et al., 2013 ; El Teclé et al., 2016). Il est donc avisé d'utiliser ces résultats comme point de départ pour l'exploration à plus grande échelle des différentes issues neurologiques chez ces patients.

Une autre limitation relève du design des études, qui sont des séries de cas prospectives. L'utilisation d'une méthode observationnelle est notamment justifiée par le caractère non-éthique de la randomisation du délai chirurgical chez les LTME (Bourassa-Moreau et al., 2016) dans le contexte de soins actuel.

### 8.3 Perspectives

Il est primordial d'établir la fiabilité et la validité d'un paramètre radiologique avant d'en faire une utilisation étendue (Keynan et al., 2006). Les paramètres cliniquement importants démontrés à l'article 2, (la fracture complète de la lame, la comminution du fragment rétro-pulsé et la présence de recul de plus de 4 mm du mur postéro-inférieur) sont qualitatifs et faciles à déterminer pour le chirurgien ou le radiologue. Il est important de préciser que la mesure du recul du mur postéro-inférieur est simple à effectuer, accessible pour tout clinicien et mesurable à l'aide d'un logiciel standard de visualisation d'images tel que disponible dans les départements d'urgence et de chirurgie. L'erreur sur la précision de la mesure est déjà prise en compte dans le critère de 4 mm, tel que précisé au chapitre 6.2.4. Cela permettra de simplifier une étude de fiabilité subséquente via l'utilisation de la statistique kappa de Cohen.

L'utilisation de ces paramètres est ainsi validée pour l'étape clinique de prédiction de l'issue neurologique à long terme en ce qui a trait au score AIS. Des analyses subséquentes devront être faites pour inclure davantage d'issues neurologiques, tel que l'amélioration à long terme du niveau neurologique et du score moteur. De cette façon, il sera possible d'établir une meilleure évaluation du rôle des paramètres morphologiques à l'imagerie, reflets de la lésion primaire, sur le potentiel de récupération. Il sera intéressant de poursuivre les investigations amorcées en faisant la promotion de l'inclusion d'un nombre plus important de patients. Ainsi, il serait possible de mener des études de corrélation avec d'autres paramètres d'imagerie, tel que l'œdème de la moelle épinière ou les caractéristiques morphologiques de l'étendue des hémorragies de la moelle épinière retrouvés à l'IRM (Mabray et al., 2016). Cela permettrait de solidifier la pertinence des paramètres retrouvés à l'examen tomodensitométrique. Ces paramètres devront être inclus dans l'évaluation radiologique des patients recrutés à titre prospectifs dans les bases de données multicentriques de blessés médullaires. L'influence du délai chirurgical sur les différents sous-types morphologiques de fractures de type « burst » demeurant à être démontrée, l'obtention ici d'un critère objectif de définition de chirurgie précoce bonifie une étude future à plus grand déploiement.

Par ailleurs, il est à mentionner que ces paramètres furent démontrés chez des patients sévèrement atteints au niveau neurologique, patients chez qui l'indication chirurgicale fait consensus. Tel que discuté au chapitre 6.2.5, ces paramètres sont associés à une dissipation d'énergie plus importante de par le retentissement sur l'issue neurologique, et sont davantage fiables en ce sens que les indices d'énergie globale du traumatisme tel que mesurée notamment par l'ISS. Il est donc utile de translater la pertinence de ces paramètres sur le potentiel d'instabilité mécanique de la fracture. La mise en évidence de nouveaux paramètres morphologiques mécaniquement importants permet, dans les suites de ces travaux, de s'intéresser aux conséquences de leur présence sur les issues non-neurologiques et chez une population de patients plus large. Par exemple, il sera intéressant d'évaluer le scan-préopératoire des patients ayant subi une fracture de type « burst » sans atteinte neurologique, à la recherche d'issues telles que l'échec aigu du traitement conservateur avec ou sans corset ou la pseudarthrose suite à un traitement conservateur. Ces paramètres pourraient ainsi être utilisés pour le pronostic de stabilité de la lésion et aider le chirurgien dans la pose d'indication chirurgicale chez cette population de patients (Vaccaro et al., 2016).

Également, si l'indication chirurgicale est posée, l'exploration d'issues telle que la nécessité de reprise chirurgicale pour échec mécanique (débricolage, perte de correction, bris de matériel, évidence de pseudarthrose) permettra de guider le chirurgien dans le choix de la méthode de fixation. Ces paramètres pourront apporter des réponses qui ultimement guideront le chirurgien dans l'exécution, c'est-à-dire dans son choix de la technique chirurgicale (ostéosynthèse sans arthrodèse ou arthrodèse segmentaire, avec ou sans augmentation), l'approche chirurgicale (antérieure, postérieure ouverte, postérieure percutanée, combinée) (Reinhold et al., 2010 ; Gumussuyu et al., 2019) ainsi que le nombre de niveaux à stabiliser ou fusionner selon l'approche et la technique optimale choisie (Parker et al., 2000 ; Aono et al., 2016)

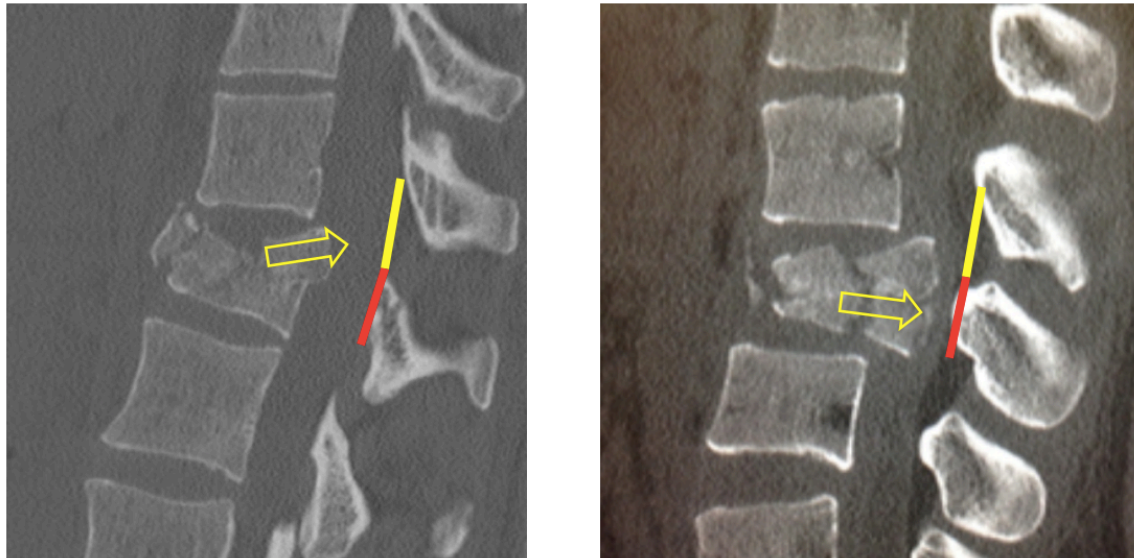
Tel que discuté au chapitre 2, la décompression chirurgicale pour les patients avec atteinte neurologique est jugée essentielle pour limiter les dommages ischémiques et

inflammatoires de la lésion secondaire. Une décompression indirecte par distraction postérieure et ligamentotaxie peut faire partie des stratégies chirurgicales pour libérer les éléments neuraux si le ligament longitudinal postérieur (LLP) est patent. Un geste de décompression directe, par voie postérieure ou antérieure, est nécessaire le cas contraire (Mueller et al., 2006 ; Steudel et al., 2011). La présence de caractéristiques de la fracture comme la comminution du fragment rétropulsé et le recul de la portion inférieure du mur postérieur, suggérant un fort transfert d'énergie en direction postérieure, soulève la question de l'intégrité du LLP. Celle-ci, qui peut notamment être évaluée par résonance magnétique, constitue un élément anatomique clé pour le choix de cette technique de réduction de la fracture (Brightman et al., 1992 ; Peng et al., 2015). Bien que plusieurs études contemporaines évaluent la relation entre les paramètres scanographiques et la probabilité de rupture du LLP, aucune ne traite des paramètres importants évoqués à l'article 2 (Tan et al., 2015 ; Hu et al., 2015 ; Wang et al., 2017 ; Jang et al., 2018 ; Chen et al., 2019). Il est raisonnable de poser l'hypothèse que ces paramètres soient important pour suspecter une atteinte du LLP. Ils pourraient dans le futur être inclus dans des protocoles d'analyses corrélant le CT-scan préopératoire aux résultats de l'IRM, et ainsi permettraient de guider la technique en conséquence pour assurer une décompression chirurgicale adéquate.

Une autre application directe de l'article 2 est le transfert de ces nouvelles connaissances vers l'étude numérique. En effet, l'article 3, inclus à l'annexe 1, propose de déterminer l'impact potentiel des paramètres cliniques trouvés sur la dissipation de l'énergie vers les éléments neuraux. Sa conceptualisation comprend la simulation d'une atteinte médullaire traumatique par recul du mur postérieur. Les paramètres choisis pour les différents scénarios de simulations sont directement issus des trouvailles de l'article 2, ce qui a permis d'améliorer la modélisation numérique des fractures de type « burst ». La simulation numérique permet de mieux comprendre le comportement des différentes structures, notamment celui des éléments neuraux et la magnitude des contraintes qui y sont subies. Cette étude a également permis de développer de nouveaux concepts et ainsi de poser de nouvelles questions de recherche.

Dans la modélisation numérique, il fut constaté, de par les caractéristiques données aux différents éléments du segment vertébral étudié, que le fragment de corps vertébral ne pouvait se diriger davantage postérieurement une fois le contact établi avec la portion antérieure de chacune des lames de la vertèbre. Ainsi fut soulevé le rôle potentiel de la forme préexistante du canal spinal : quel serait l'impact de l'angulation native des lames dans le plan transverse sur la magnitude possible du recul du mur postérieur qui survient durant le traumatisme? Certaines formes de canal spinal pourraient jouer un rôle protecteur sur les éléments neuraux, et pourraient plus précisément être investiguées comme élément participant à la diminution de l'énergie transmise en direction postérieure et faire office de facteur de bon pronostic de récupération neurologique.

D'autre part, il sera intéressant d'investiguer quel serait le rôle de la direction du recul du fragment postérieur. Est-il possible qu'un fragment se dirigeant crânialement, vers l'espace interlameaire, entraîne un moindre transfert d'énergie vers les éléments neuraux? Comment démontrer qu'un fragment qui comprimerait le sac dural contre les lames entraînerait des lésions plus importantes que s'il le comprimait contre les tissus mous ligamentaires de l'espace interlameaire? Quelles sont les variantes des vecteurs de compression, au moment du trauma, qui influencent la direction du recul du fragment? Quel serait le meilleur modèle, numérique ou biomécanique, pour le démontrer? Sera-t-il possible d'adapter des éléments externes de protection pour optimiser ces vecteurs dans le cadre d'emplois ou d'activités à risque? Ces questions sont issues de la translation des concepts issus de l'évaluation du mouvement des fragments que permet l'étude numérique annexée, et permettront de justifier et créer de nouveaux protocoles pour faire avancer les connaissances sur les nombreuses composantes de ce type de traumatisme spinal fréquemment rencontré en clinique.



**Figure 8.1** Représentation schématique de la direction des fragments rétropropulsés dans le canal spinal. L'image de gauche représente un fragment de corps vertébral postéro-supérieur rétropropulsé en direction de l'espace interlaminaire. L'image de droite représente un fragment de corps vertébral postéro-inférieur rétropropulsé en direction des lames vertébrales.

Par ailleurs, dans notre système de santé, la prise en charge de la réhabilitation, en subaiguë et en chronique, est assurée par les médecins spécialistes en physiatrie en centres spécialisés. La communication entre le chirurgien du rachis, comme intervenant de la phase aiguë de la prise en charge, et le physiatre se trouve améliorée par les résultats présentés dans ce mémoire. L'obtention d'une meilleure description des patrons de fracture ainsi qu'un seuil de délai chirurgical objectif constitue une étape cruciale dans l'élaboration d'un modèle de prédiction de récupération neurologique pour cette population spécifique.

Une meilleure compréhension des facteurs prédictifs de récupération neurologique permet au clinicien de livrer de l'information adéquate au patient et à sa famille, d'optimiser l'utilisation des ressources et de créer des programmes de réhabilitation spécifique (Wilson et al., 2012). Les bases de l'étude de la relation entre les facteurs modifiables et non modifiables de récupération neurologique s'en trouve également solidifiée (1- Richard-Denis et al., 2018). Une fois que l'importance de ces nouveaux



paramètres radiologiques, qui bonifient la compréhension de l'atteinte neurologique, auront été validés par des études multicentriques, ceux-ci pourraient être inclus dans un modèle prédictif multivarié (2- Richard-Denis et al., 2018).

## Chapitre 9 Conclusions et recommandations

Chez les LTME thoraco-lombaires secondaires à une fracture de type « burst », la présence d'une fracture complète de la lame, de comminution du fragment rétro-pulsé ou du recul de plus de 4 mm du mur postéro-inférieur est liée à un pauvre pronostic de récupération du grade AIS à long terme. Il est recommandé d'inclure ces paramètres dans le cadre d'analyses futures portant sur la prédiction de l'issue neurologique, et à plus grande échelle dans le cadre d'analyses sur le risque de complications mécaniques chez cette population de patients.

Parce que l'effet de la chirurgie précoce sur l'amélioration du NLI semble être indépendant de la morphologie de la fracture, il est suggéré de ne pas tenir compte des paramètres morphologiques de la fracture dans la planification du moment de la prise en charge chirurgicale.

Cette prise en charge devrait s'effectuer dans les 21,47 h de l'évènement traumatique afin d'optimiser la récupération d'un ou plusieurs NLI. Ce seuil de délai chirurgical fut obtenu de manière objective et il est recommandé qu'il soit utilisé comme définition de la « chirurgie précoce » dans les études subséquentes portant sur la prédiction de l'issue neurologique.

## Bibliographie

**1 - Ahuja C.S.,** Schroeder G.D., Vaccaro A.R., Fehlings M.G. Spinal Cord Injury - What Are the Controversies? J Orthop Trauma 2017, 31;4:S7-S13

**2 - Ahuja C.S.,** Wilson J., Nori S. et al. Traumatic spinal cord injury. Nat Rev Dis Primers 2017, 3:17018

**Aono H.,** Tobimatsu H., Ariga K. et al. Surgical outcomes of temporary short-segment instrumentation without augmentation for thoracolumbar burst fractures. Injury 2016, 47 ;6:1337-1344

**ATLS -** Advanced Trauma Life Support. Chicago, Ill.: American College of Surgeons, Committee on Trauma, 2012

**Aydinli U.,** Karaeminogullari O., Tiskaya K., Oztürk C. Dural tears in lumbar burst fractures with greenstick lamina fractures. Spine (Phila Pa 1976) 2001, 26:E410-E415

**Batchelor P.E.,** Wills T.E., Skeers P., Battistuzzo C.R., Macleod M.R., Howells D.W., Sena E.S. Meta-analysis of pre-clinical studies of early decompression in acute spinal cord injury: a battle of time and pressure. PLoS One 2013, 8;8:E72659

**Benson D.R.,** Burkus J.K., Montesano P.X., Sutherland T.B., McLain R.F. Unstable thoracolumbar and lumbar burst fractures treated with the AO fixateur interne. J Spinal Disord 1992, 5:335–343

**Berkowitz M.,** O’Leary P.K., Kruse D.L., Harvey C. Spinal cord injury: an analysis of medical and social costs. New York: Demos Medical Publishing; 1998

**Bliemel C.,** Lefering R., Buecking B. et al. Early or delayed stabilization in severely injured patients with spinal fractures? Current surgical objectivity according to the Trauma

Registry of DGU: treatment of spine injuries in polytrauma patients. *J Trauma Acute Care Surg* 2014, 76:366–373

**Bourassa-Moreau E.**, Mac-Thiong J.M., Feldman D.E., Thompson C., Parent S. Non-neurological outcomes after complete traumatic spinal cord injury: the impact of surgical timing. *Journal of Neurotrauma* 2013, 30:1596-1601

**Bourassa-Moreau E.**, Mac-Thiong J.-M., Li A., Feldman D.E., Gagnon D.H., Thompson C. et al. Do patients with complete spinal cord injury benefit from early surgical decompression? Analysis of neurological improvement in a prospective cohort study. *J Neurotrauma* 2016, 33:301–6

**Brandolini N.**, Kapur N. and Hall R.M. Dynamics of interpedicular widening in spinal burst fractures: an in vitro investigation. *Spine Journal* 2014, 14 ;9 :2164-2171

**Brightman R.P.**, Miller C.A., Rea G.L., Chakeres D.W., Hunt W.E. Magnetic resonance imaging of trauma to the thoracic and lumbar spine. The importance of the posterior longitudinal ligament. *Spine (Phila Pa 1976)* 1992, 17;5:541-550

**Burke J.F.**, Yue J.K., Ngwenya L.B., Winkler E.A., Talbott J., Pan J., et al. Ultra-early (<12 h) decompression improves recovery after spinal cord injury compared to early (12–24 h) decompression. *Clin Neurosurg.* 2016;63:172

**Caffaro M.F.S.**, Avanzi O. Can the interpedicular distance reliably assess the severity of thoracolumbar burst fractures? *Spine* 2012, 37:E231-236

**Cammisa F.P. Jr.**, Eismont F.J., Green B.A. Dural laceration occurring with burst fractures and associated laminar fractures. *J Bone Joint Surg Am* 1989, 71:1044-1052.

**Celik** H., Koktekir E., Karatay M. et al. Along term evaluation of result of surgically treated lower cervical spine trauma of 83 patients: a restrospective study. *J Neurol Sci Turk* 2013 30:740–7

**Cengiz**, S.L., Kalkan, E., Bayir, A., Ilik, K., and Basefer, A. Timing of thoracolumbar spine stabilization in trauma patients; impact on neurological outcome and clinical course. A real prospective (rct) randomized controlled study. *Arch Orthop Trauma Surg* 2008, 128, 959–966

**Chen** F., Shi T., Li Y. et al. Multiple parameters for evaluating posterior longitudinal ligaments in thoracolumbar burst fractures. *Orthopäde* 2019, 48:420–425

**Chipman** J.G., Deuser W.E., Beilman G.J. Early surgery for thoracolumbar spine injuries decreases complications. *J Trauma* 2004, 56:52–57

**Croce** M.A., Bee T.K., Pritchard E., Miller P.R., Fabian T.C. Does optimal timing for spine fracture fixation exist? *Ann Surg* 2001, 233:851–858

**Dai** L.Y., Jin W.J. Interobserver and intraobserver reliability in the load sharing classification of the assessment of thoracolumbar burst fractures  
*Spine* 2005, 30:354-358

**Dai** L.Y., Wang X.-Y., Jiang L.-S. Neurologic recovery from thoracolumbar burst fractures: is it predicted by the amount of initial canal encroachment and kyphotic deformity? *Surgical Neurology* 2007, 67:232-238

**Denis** F., The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine* 1983, 8;8:817-831

**Diotalevi L.**, Bailly N., Wagnac E., Mac-Thiong J.-M., Goulet J., Petit Y. Dynamics of spinal cord compression with different patterns of thoracolumbar burst fractures: numerical simulations using finite element modelling. *Clinical Biomechanics* 2020, 72:186-194

**Duh M.S.**, et al. The effectiveness of surgery on the treatment of acute spinal cord injury and its relation to pharmacological treatment. *Neurosurgery* 1994, 35;2:240-249

**Dvorak M.F.**, et al. The influence of time from injury to surgery on motor recovery and length of hospital stay in acute traumatic spinal cord injury: an observational Canadian cohort study. *J Neurotrauma* 2015, 32 ;9:645-54

**El Teele N.E.**, Dahdaleh N.S., Hitchon P.W. Timing of surgery in spinal cord injury. *Spine (Philos Pa 1976)* 2016, 41:995–1004

**Elzinga M.**, Segers M, Siebenga J, Heilbron E, de Lange-de Klerk ES, Bakker F. Inter- and intraobserver agreement on the Load Sharing Classification of thoracolumbar spine fractures. *Injury* 2012, 43;4:416-422

**Facchinello Y.**, Richard-Denis A., Beauséjour M., Thompson C., Mac-Thiong J.-M. The use of classification tree analysis to assess the influence of surgical timing on neurological recovery following severe cervical traumatic spinal cord injury. *Spinal Cord* 2018, 56:687–94

**Fehlings M.G.**, Rao S.C., Tator C.H., Skaf G., Arnold P., Benzel E., Dickman C., Cuddy B., Green B., Hitchon P., Northrup B., Sonntag V., Wagner F., Wilberger J. The optimal radiologic method for assessing spinal canal compromise and cord compression in patients with cervical spinal cord injury. Part II: Results of a multicenter study. *Spine* 1999, 24:605-613

**Fehlings M.G.**, Rabin D., Sears W., et al. Current practice in the timing of surgical intervention in spinal cord injury. *Spine (Phila Pa 1976)* 2010, 35:166–173

**Fehlings** M.G., Vaccaro A., Wilson J.R., Singh A., Cadotte D., Harrop J.S., et al. Early versus delayed decompression for traumatic cervical spinal cord injury: results of the Surgical Timing in Acute Spinal Cord Injury Study (STASCIS). *PLoS ONE*. 2012;7: E32037.

**Fontijne** W.P.J., DeKlerk L.W.L., Braakman R., Stijnen T., Tanghe H.L.J., Steenbeek R., VanLinge B. CT scan prediction of neurological deficit in thoracolumbar burst fractures. *J Bone Joint Surg (Br)* 1992, 74-B:683-685

**Furlan** J.C., Fehlings M.G., Massicotte E.M., Aarabi B., Vaccaro A.R., Bono C.M. A quantitative and reproducible method to assess cord compression and canal stenosis after cervical spine trauma: a study of interrater and intrarater reliability. *Spine (Philo Pa 1976)* 2007, 32:2083–91

**Glennie** R.A., Bailey C.S., Tsai E.C., Noonan V.K., Rivers C.S., Fourney D.R. et al. An analysis of ideal and actual time to surgery after traumatic spinal cord injury in Canada. *Spinal Cord* 2017, 55:618–23

**Goulet** J., Richard-Denis A., Thompson C., Mac-Thiong J.-M. Relationships between specific functional abilities and health-related quality of life in chronic traumatic spinal cord injury. *Am J Phys Med Rehab* 2019, 98;1:14-19

**Grossman** R.G., Frankowski R.F., Burau K.D., Toups E.G., Crommett J.W., Johnson M.M., Fehlings M.G., Tator C.H., Shaffrey C.I., Harkema S.J., Hodes J.E., Aarabi B., Rosner M.K., Guest J.D., Harrop J.S. Incidence and severity of acute complications after spinal cord injury. *J Neurosurg Spine* 2012, 17(Suppl1):119-128

**Gumussuyu** G., Islam N.C., Kose O., Gungor M., Ozcan H. Comparison of Two Segment Combined Instrumentation and Fusion versus Three Segment Posterior Instrumentation in

Thoracolumbar Burst Fractures: A Randomized Clinical Trial with 10 Years of Follow Up. Turk Neurosurg 2019, 29;4:555-563

**Gupta R.**, Mittal P., Sandhu P., Saggar K., Gupta K. Correlation of qualitative and quantitative MRI parameters with neurological status: a prospective study on patients with spinal trauma. J Clin Diagn Res 2014, 8:13-17

**Harrop J.S.** et al. Neurologic improvement after thoracic, thoracolumbar, and lumbar spinal cord (conus medullaris) injuries. Spine (Phila Pa 1976) 2011, 36;1:21-25

**Hitchon P.W.**, Torner J.C., Haddad S.F. et al. Management options in thoracolumbar burst fractures. Surg Neurol 1998, 49:619-626

**Hiyama A.**, Watanabe M., Katoh H., Sato M., Nagai T., Mochida J. Relationships between posterior ligamentous complex injury and radiographic parameters in patients with thoracolumbar burst fractures. Injury 2015, 46:392-398

**Holdsworth F.**, Fractures, dislocations, and fracture-dislocations of the spine. J Bone Joint Surg 1970, 52-A;8:1534-1551

**Horn S.D.**, Smout R.J., DeJong G., Dijkers M.P., Hsieh C.H., Lammertse D., Whiteneck G. Association of various comorbidity measures with spinal cord injury rehabilitation outcomes. Arch Phys Med Rehab 2013, 94:S75-86

**Hu Z.**, Zhou Y., Li N., Xie X. Correlations between posterior longitudinal ligament status and size of bone fragment in thoracolumbar burst fractures. Int J Clin Exp Med 2015, 8;2:2754-2759

**Jang H.D.**, Bang C., Lee J.C. et al. Risk factor analysis for predicting vertebral body re-collapse after posterior instrumented fusion in thoracolumbar burst fracture. Spine J 2018, 18;2:285-293



**Jiang F.**, Jaja B., Kurpad S., Badhiwala J., Aarabi B., Grossman R. et al. Acute Adverse Events After Spinal Cord Injury and Their Relationship to Long-term Neurologic and Functional Outcomes: Analysis From the North American Clinical Trials Network for Spinal Cord Injury. *Critical Care Medicine* 2019, 47;11:854-862

**Kaminski L.**, Cordemans V., Cernat E., M'Bra K.I., Mac-Thiong J.-M. Functional Outcome Prediction after Traumatic Spinal Cord Injury Based on Acute Clinical Factors. *J Neurotrauma* 2017, 34:2027-2033

**Kato S.**, Murray J.C., Kwon B.K., Schroeder G.D., Vaccaro A.R., Fehlings M.G. Does surgical intervention or timing of surgery have an effect on neurological recovery in the setting of a thoracolumbar burst fracture? *J Orthop Trauma* 2017, 31:38–44

**Kerwin A.J.**, Frykberg E.R., Schinco M.A. et al. The effect of early surgical treatment of traumatic spine injuries on patient mortality. *J Trauma* 2007, 63:1308–1313

**Keynan O.**, Fisher C.G., Vaccaro A., Fehlings M.G., Oner F.C., Dietz J., Kwon B., Rampersaud R., Bono C., France J., Dvorak M. Radiographic measurement parameters in thoracolumbar fractures: a systematic review and consensus statement of the spine trauma study group. *Spine* 2006, 31;5:E156-165

**Krueger H.**, Noonan V.K., Trenaman L.M., Joshi P., Rivers C.S. The economic burden of traumatic spinal cord injury in Canada. *Chronic Diseases and Injuries in Canada* 2013, 33;3:113-122

**Mabray M.C.**, Talbott J.F., Whetstone W.D., Dhall S.S., Phillips D.B., Pan J.Z., Manley G.T., Bresnahan J.C., Beattie M.S., Haefeli J., Ferguson A.R. Multidimensional Analysis of Magnetic Resonance Imaging Predicts Early Impairment in Thoracic and Thoracolumbar Spinal Cord Injury. *J Neurotrauma* 2016, 33:954-962

**Magerl E.**, Aebi M., Harms J., Nazarian S. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *Eur Spine J* 1994, 3:184-201

**Magu A.**, Singh D., Yadav R.K., Bala M. Evaluation of traumatic spine by magnetic resonance imaging and correlation with neurological recovery. *Asian Spine J* 2015, 9:748–756

**Marino R.J.**, Ditunno Jr J.F., Donovan W.H., Maynard Jr F. Neurologic recovery after traumatic spinal cord injury: data from the Model Spinal Cord Injury Systems. *Arch Phys Med Rehabil* 1999, 80:1391-1396

**Martineau J.**, Goulet J., Richard-Denis A., Mac-Thiong J.-M. The relevance of MRI for predicting neurological recovery following cervical traumatic spinal cord injury. *Spinal Cord* 2018, 57:866-873

**McCormack T.**, Karaikovic E., Gaines R.W. The load sharing classification of spine fractures. *Spine* 1994, 19:1741-1744

**McKinley W.**, Meade M.A., Kirshblum S., Barnard B. Outcomes of early surgical management versus late or no surgical intervention after acute spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil* 2004, 85:1818–1825

**McLain R.F.**, Benson D.R. Urgent stabilization of spinal fractures in polytrauma patients. *Spine (Philos Pa 1976)* 1999, 24:1646–1654

**Meves R.**, Avanzi, O. Correlation among canal compromise, neurologic deficit, and injury severity in thoracolumbar burst fractures. *Spine* 2006 31;18 :2137-2141

**Mitchell J.**, Nunnerley J., Frampton C., Croot T., Patel A., Schouten R. Epidemiology\_of traumatic\_spinal\_cord\_injury\_in New Zealand (2007-2016). *N Z Med J.* 2020, 133(1509):47-57

**Miyanji**, F. et al. Acute cervical traumatic spinal cord injury: MR imaging findings correlated with neurologic outcome--prospective study with 100 consecutive patients. *Radiology* 2007, 243;3:820-827

**Mohanty** S.P., Venkatram N. Does neurological recovery in thoracolumbar and lumbar burst fractures depend on the extend of canal compromise? *Spinal Cord* 2002, 40:295-299

**Mputu** P., Beauséjour M., Richard-Denis A., Thompson C., Mac-Thiong J.-M. (2018) Early predictors of neurological recovery after traumatic spinal cord injury: A systematic review. Submitted.

**Mueller** L.A., Mueller L.P., Schmidt R., Forst R., Rudig L. The phenomenon and efficiency of ligamentotaxis after dorsal stabilization of thoracolumbar burst fractures. *Arch Orthop Trauma Surg* 2006, 126;6:364-368

**Nicoll** E.A., Fractures of the dorso-lumbar spine. *J Bone Joint Surg* 1949, 31-B;3:376-394

**NSCISC**, National Spinal Cord Injury Statistical Center. Facts and Figures at a Glance. Birmingham, AL: University of Alabama at Birmingham, 2016

**O'Boynick** C.P., Kurd M.F., Darden II B.V., Vaccaro A.R., Fehlings M.G. Timing of surgery in thoracolumbar trauma: is early intervention safe? *Neurosurg Focus* 2014, 37;1:E7

**Ozturk** C., Ersozlu S., Aydinli U. Importance of greenstick lamina fractures in low lumbar burst fractures. *Int Orthop* 2006, 30:295-298

**Panjabi** M.M., Kato Y., Hoffman H., Cholewicki J. Canal and intervertebral foramen encroachments of a burst fracture. Effects from the center of rotation. *Spine* 2001, 26;11:1231-1237

**Parker J.W.**, Lane J.R., Karaikovic E.E., Gaines R.W. Successful short-segment instrumentation and fusion for thoracolumbar spine fractures: a consecutive 4 1/2-year series. *Spine (Phila Pa 1976)* 2000, 25;9:1157-1170

**Peng Y.**, Zhang L., Shi T., Lv H., Zhang L., Tang P. Relationship between fracture-relevant parameters of thoracolumbar burst fractures and the reduction of intra-canal fracture fragment. *J Orthop Surg Res* 2015, 10:131

**Pickett G.**, Campos-Benitez M., Keller J., Duggal N. Epidemiology of traumatic spinal cord injury in Canada. *Spine* 2006, 31;7:799–805

**Radcliff K.**, Su B.W., Kepler C.K., Rubin T., Shimer A.L., Rihn J.A., Harrop J.A., Albert T.J., Vaccaro A.R. Correlation of posterior ligamentous complex injury and neurological injury to loss of vertebral body height, kyphosis, and canal compromise. *Spine* 2012, 37:1142-1150

**Rahimi-Movaghar V.**, Niakan A., Haghnegahdar A., Shahlaee A., Saadat S., Barzideh E. Early versus late surgical decompression for traumatic thoracic/thoracolumbar (T1-L1) spinal cord injured patients. Primary results of a randomized controlled trial at one year follow-up. *Neurosciences (Riyadh)* 2014, 19:183-191

**Reid D.C.**, Hu R., Davis L.A., Saboe L.A. The nonoperative treatment of burst fractures of the thoracolumbar junction. *J Trauma* 1988, 28;8 :1188-1194

**Reinhold M.**, Knop C., Beisse R. et al. Operative treatment of 733 patients with acute thoracolumbar spinal injuries: comprehensive results from the second, prospective, internet-based multicenter study of the Spine Study Group of the German Association of Trauma Surgery. *Eur Spine J* 2010, 19:1657–1676

**Reinhold M.**, Audige L., Schnake K.J., Bellabarba C., Dai L.Y., Oner F.C. AO spine injury classification system: a revision proposal for the thoracic and lumbar spine. *Eur Spine J* 2013, 22:2184-2201

**1- Richard-Denis A.**, Beauséjour M., Thompson C., Nguyen B.H., Mac-Thiong J.M. Early predictors of global functional outcome after traumatic spinal cord injury: a systematic review. *Journal of Neurotrauma* 2018, 35;15:1705-1725

**2- Richard-Denis A.**, Feldman D., Thompson C., Mac-Thiong J.-M. Prediction of functional recovery six months following traumatic spinal cord injury during acute care hospitalization. *J Spinal Cord Med* 2018, 41;3:309-317

**Rutges J.P.H.J.**, Kwon B.K., Heran M., Ailon T., Street J.T., Dvorak M.F. A prospective serial MRI study following acute traumatic cervical spinal cord injury. *Eur Spine J* 2017, 26;9:2324-2332

**Skeers P.**, Battistuzzo C.R., Clark J.M., Bernard S., Freeman B.J.C., Batchelor P.E. Acute Thoracolumbar Spinal Cord Injury: Relationship of Cord Compression to Neurological Outcome. *J Bone Joint Surg (Am)* 2018, 100:305-315

**Skiak E.**, Karakasli A., Harb A., Satoglu I.S., Basci O., Havitcioglu H. The effect of laminae lesion on thoraco-lumbar fracture reduction. *Orthop Trauma Surg Res* 2015, 101:489-494

**Stuedel W.I.**, Nabhan A., Shariat K. Intraoperative CT in spine surgery. *Acta Neurochir Suppl* 2011, 109:169-174

**Tan J.**, Shen L., Fang L. et al. Correlations between posterior longitudinal injury and parameters of vertebral body damage. *J Surg Res* 2015, 199;2:552-556

**Tan T.**, Donohoe T. J., Huang M. S., Rutges J., Marion T., Mathew J., Fitzgerald M., Tee J. Does Combined Anterior-Posterior Approach Improve Outcomes Compared with Posterioronly Approach in Traumatic Thoracolumbar Burst Fractures?: A Systematic Review. *Asian Spine J* 2020, 14;3:388–398

**Tator C.H.**, Fehlings M.G., Thorpe K., Taylor W. Current use and timing of spinal surgery for management of acute spinal cord injury in North America: results of a retrospective multicenter study. *J Neurosurg.* 1999;91:12–18

**Tator C.H.** Review of treatment trials in human spinal cord injury: issues, difficulties, and recommendations. *Neurosurgery* 2006, 59:957–987

**Tisot R.A.**, Avanzi O. Laminar fractures as a severity marker in burst fractures of the thoracolumbar spine. *J Orthop Surg* 2009, 17;3:261-264

**Umerani M.S.**, Abbas A., Sharif S. Clinical outcome in patients with early versus delayed decompression in cervical spine trauma. *Asian Spine J* 2014; 8:427–434

**Vaccaro A.R.**, Schroeder G.D., Kepler C.K. et al. The surgical algorithm for the AOSpine thoracolumbar spine injury classification system. *Eur Spine J* 2016, 25:1087–1094

**Van Middendorp J.J.**, Hosman A.J.F., Doi A.S.R. The effects of the timing of spinal surgery after traumatic spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis. *J Neurotrauma* 2013, 30:1781–1794

**Wagnac, E.**, Mac-Thiong, J.-M., Arnoux, P.-J., Desrosiers, j.-M., Ménard, A.-L., Petit, Y., 2019. Traumatic spinal cord injuries with fractures in a Québec level I trauma center. *Can J Neurol Sci* 2019, 46 ;6 :727-734

**Wang X.B.**, Lu G.H., Li J., Wang B., Lu C., Phan K. Posterior Distraction and Instrumentation Cannot Always Reduce Displaced and Rotated Posterosuperior Fracture Fragments in Thoracolumbar Burst Fracture. *Clin Spine Surg* 2017, 30;3:E317-E322

**Whiteneck G.**, Gassaway J., Dijkers M.P., Heinemann A.W., Kreider S.E. Relationship of patient characteristics and rehabilitation services to outcomes following spinal cord injury: the SCIR rehab project. *J Spinal Cord Med* 2012, 35:484-502

**Wilcox R.K.**, Boerger T.O., Allen D.J., Barton D.C., Limb D., Dickson R.A., Hall R.M. A dynamic study of thoracolumbar burst fractures. *J Bone Joint Surg (Am)* 2003, 85:2184-2189

1 - **Wilson J.R.**, Arnold P.M., Singh A., Kalsi-Ryan S., Fehlings M.G. Clinical prediction model for acute inpatient complications after traumatic cervical spinal cord injury: a subanalysis from the Surgical Timing in Acute Spinal Cord Injury Study. *Journal of Neurosurgery: Spine* 2012, 17(Suppl1):46-51

2 - **Wilson J.R.**, Cadotte D.W., Fehlings M.G. Clinical predictors of neurological outcome, functional status, and survival after traumatic spinal cord injury: a systematic review. *J Neurosurg Spine*. 2012;17:11–26

**Wilson J.R.**, Witiw C.D., Badhiwala J., Kwon B.K., Fehlings M.G., Harrop J.S. Early Surgery for Traumatic Spinal Cord Injury: Where Are We Now? *Global Spine J* 2020, 10:84S-91S

**Xing D.**, Chen Y., Ma J.X., Song D.H., Wang J., Yang Y. et al. A methodological systematic review of early versus late stabilization of thoracolumbar spine fractures. *Eur Spine J* 2013, 22:2157–2166

**Xu J.X.**, Zhou C.-W., Tang Q., Wang C.-G., Li J.W., Zhang L.-L., Xu H.-Z., Tian N.-F. The correlation between vertical laminar fractures and the severity of associated burst fractures. *World Neurosurgery* 2018, 109:E829-834

**Yue J.K.**, Winkler E.A., Rick J.W., Deng H., Partow C.P., Upadhyayula P.S., Birk H.S., Chan A.K., Dhall S.S. Update on critical care for acute spinal cord injury in the setting of polytrauma. *Neurosurg Focus* 2017, 43;5:E19

**Yugue I.**, Aono K., Shiba K., Ueta T., Maeda T., Mori E., Kawano O. Analysis of the risk factors for severity of neurologic status in 216 patients with thoracolumbar and lumbar burst fractures. *Spine* 2011, 36:1563-1569



## **Annexe A Article 3 : Trauma thoraco-lombaire : modèle à éléments finis pour simulation numérique de compression médullaire selon différents patrons de fracture de type « burst »**

### **A.1 Situation et description de l'article 3 :**

L'article 3 est présenté en annexe de ces travaux pour démontrer l'impact direct des trouvailles de l'article 2 sur la suite de la recherche concernant l'exploration de la transmission d'énergie du trauma vers les éléments neuraux.

Cet article cadre dans la quête vers une meilleure compréhension de la blessure primaire induite par l'impact initial des fragments osseux sur les éléments neuraux.

Il est logique de poursuivre les investigations de l'article 2 par la modélisation du comportement de la moelle épinière sous l'action des différents paramètres dont on a démontré l'importance clinique.

L'article 3 présente un modèle par éléments finis de la région thoraco-lombaire grâce auquel sont mesurés les stress, contraintes et pressions au sein de la moelle épinière en fonction de différents scénarios de rétroimpulsion des fragments du corps vertébral. Les scénarios ont été conceptualisés majoritairement à partir des trouvailles de l'article 2.

L'article 3 apporte de nouvelles connaissances qui aideront à lier les événements du trauma avec les caractéristiques de l'imagerie et éventuellement permettre d'identifier quels éléments apportent le plus d'informations pour la prédiction de la récupération neurologique chez les blessés médullaires.

Cet article est publié dans le journal *Clinical Biomechanics*.

(10.1016/j.clinbiomech.2019.12.023)

## **A.2 Article 3: Dynamics of spinal cord compression with different patterns of thoracolumbar burst fractures: numerical simulations using finite element modelling**

### **A.2.1 Structured abstract**

**Background:** In thoracolumbar burst fractures, spinal cord primary injury involves a direct impact and energy transfer from bone fragments to the spinal cord. Unfortunately, imaging studies performed after the injury only depict the residual bone fragments position and pattern of spinal cord compression, with little insight on the dynamics involved during traumas. Knowledge of underlying mechanisms could be helpful in determining the severity of the primary injury, hence the extent of spinal cord damage and associated potential for recovery. Finite element models are often used to study dynamic processes, but have never been used specifically to simulate different severities of thoracolumbar burst fractures.

**Methods:** Previously developed thoracolumbar spine and spinal cord finite element models were used and further validated, and representative vertebral fragments were modelled. A full factorial design was used to investigate the effects of comminution of the superior fragment, presence of an inferior fragment, fragments rotation and velocity, on maximum Von Mises stress and strain, maximum major strain, and pressure in the spinal cord.

**Findings:** Fragment velocity clearly was the most influential factor. Fragments rotation and presence of an inferior fragment increased pressure, but rotation decreased both strains outputs. Although significant for both strains outputs, comminution of the superior fragment isn't estimated to influence outputs.

**Interpretation:** This study is the first, to the authors' knowledge, to examine a detailed spinal cord model impacted in situ by fragments from burst fractures. This numeric model could be used in the future to comprehensively link traumatic events or imaging study characteristics to known spinal cord injuries severity and potential for recovery.

## **A.2.2 Introduction**

Annually, 150,000 spine fractures are treated in the United States. Amongst those, 10,000 to 17,000 are associated with spinal cord injuries (SCI) (Buchowski et al., 2008) and 25,000 are classified as “burst fractures” (Wood et al., 2014). A burst fracture typically involves fracture of the anterior and middle columns, commonly inducing retropulsion of the posterior wall of the vertebral body into the spinal canal. They are responsible for 15 % of cases with SCI and mainly occur in the thoracolumbar spine (Denis, 1983; Wood et al., 2014).

Several authors have assessed the relationship between neurological deficits and morphological characteristics of fractured spine, as observed on imaging studies (Meves and Avanzi, 2006; Mohanty et al., 2008; Tang et al., 2016; Yugue et al., 2011). Although these associations remain limited (Limb et al., 1995; Meves and Avanzi, 2006; Mohanty et al., 2008; Radcliff et al., 2012; Tang et al., 2016; Yugue et al., 2011) some morphological features seem to provide more insight than others on the potential for neurological recovery (Goulet et al., 2019; Keynan et al., 2006). Imaging performed after the traumatic event only depicts a static overview of the residual spinal cord compression following the initial trauma, neglecting the dynamics and associated stresses/strains sustained by the spinal cord involved during the primary injury. Accordingly, research focusing on the implication of key morphological features is necessary in developing a better understanding of this subset of SCI. Previous studies (Panjabi et al., 1995; Wilcox et al., 2003b) have attempted to gain insights on the dynamics of burst fractures, but the spinal cord was either not included (Panjabi et al., 1995) or was represented by a synthetic surrogate inserted into a bovine spinal segment (Wilcox et al., 2003b), which are not fully representative of thoracolumbar burst fractures associated with SCI in humans. However, both studies strongly suggest that relying on imaging to visualise the static residual compression after a burst fracture associated with SCI does not reflect the dynamic spinal cord compression during trauma. Therefore, further understanding of the mechanisms associated with primary injury occurring during the traumatic event is necessary to provide insight on the potential spinal cord damages.

Finite element models (FEM) were also used to explore these mechanisms. On one hand, spine segments with detailed vertebrae, intervertebral disks and ligaments have been modelled (El-Rich et al., 2009; Garo et al., 2011; Qiu et al., 2006; Wagnac et al., 2012; Wilcox et al., 2004; Wilcox et al., 2003b), but either lacked or oversimplified the spinal cord, rendering these models unfit for the study of SCI. On the other hand, spinal cord models have been proposed (Fradet et al., 2016a; Jones et al., 2008; Sparrey et al., 2009; Yan et al., 2012), but the presence of cerebrospinal fluid (CSF) and/or surrounding spinal canal was missing and/or the spinal anatomy was oversimplified. Considering these limitations of previous FEM, the biomechanical conditions affecting the spinal cord following a thoracolumbar burst fracture remain partially unknown.

To overcome these limitations, this study proposes a detailed FEM of the spinal cord and spine to better replicate SCI occurring with spine fractures observed clinically in humans. Accordingly, the current objective is to compare different case scenarios for thoracolumbar burst fractures regarding the stresses and strains sustained by the spinal cord. More specifically, the proposed FEM will be used to observe the stresses and strains sustained by the spinal cord by varying the comminution, speed and rotation of the postero-superior fragment retropulsed into the spinal canal, as well as to analyse the role of the postero-inferior vertebral body wall involvement.

### **A.2.3 Materials and methods**

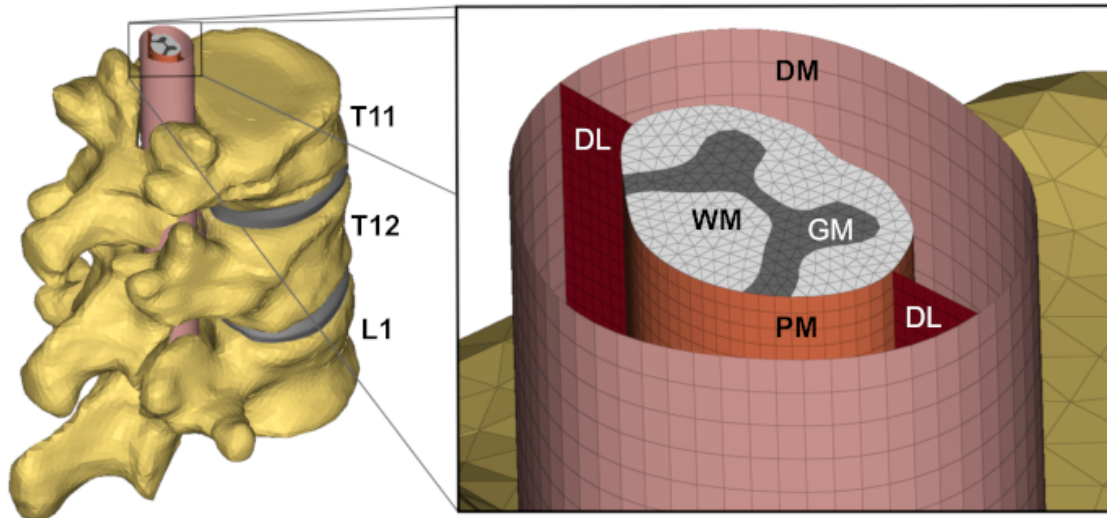
#### **Geometric modeling and meshing**

A thoracolumbar (T11-L1) segment was isolated from a 50<sup>th</sup> percentile spine FEM (Spine Model for Safety and Surgery – SM2S) (El-Rich et al., 2009; Garo et al., 2011; Wagnac et al., 2012). Vertebrae and disks (Figure A.1) were defined as rigid bodies. Definition of material laws and properties, as well as meshing parameters are described in Table A.1.

|                      | Type of elements | Characteristic length (mm) | Number of elements | Material laws                  | Material properties                                | Rigid Body |
|----------------------|------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------------|--|------------|
| Gray matter          | Pentahedral      | 0.38                       | 32,032             | Stress-strain tabulated        | Fradet et al. (2016a)                              | No         |
| White matter         | Pentahedral      | 0.38                       | 74,464             | Stress-strain tabulated        | Fradet et al. (2016a)                              | No         |
| Pia mater            | Quadratic        | 0.38                       | 12,480             | Linear elastic                 | $\rho = 0.001$<br>$\nu = 0.45$<br>$E = 2.3$        | No         |
| Dura mater           | Quadratic        | 0.66                       | 6240               | Linear elastic                 | $\rho = 0.001$<br>$\nu = 0.45$<br>$E = 5$          | No         |
| CSF                  | Cubic            | 0.5                        | 98,936             | Arbitrary Langrangian-Eulerian | $\rho = 0.001$<br>$C_l = 2089$<br>$\nu_l = 8.9e-4$ | No         |
| Denticulate ligament | Quadratic        | 0.3                        | 3328               | Linear elastic                 | $\rho = 0.00$<br>$\nu = 0.45$<br>$E = 10$          | No         |
| Lower fragment       | Tetrahedral      | 0.8                        | 6072               | Linear elastic                 | $\rho = 0.002$<br>$\nu = 0.3$<br>$E = 2656.6$      | Yes        |
| Upper fragment       | Tetrahedral      | 0.8                        | 6194               | Linear elastic                 | $\rho = 0.002$<br>$\nu = 0.3$<br>$E = 2656.6$      | Yes        |
| Upper right fragment | Tetrahedral      | 0.8                        | 3324               | Linear elastic                 | $\rho = 0.002$<br>$\nu = 0.3$<br>$E = 2656.6$      | Yes        |
| Upper left fragment  | Tetrahedral      | 0.8                        | 3149               | Linear elastic                 | $\rho = 0.002$<br>$\nu = 0.3$<br>$E = 2656.6$      | Yes        |
| Disks                | Hexahedral       | 0.6                        | 40,870             | Wagnac et al. (2012)           | Wagnac et al. (2012)                               | Yes        |
| Vertebrae            | Tetrahedral      | 1.3                        | 141,732            | Wagnac et al. (2012)           | Wagnac et al. (2012)                               | Yes        |

**Table A.1** Meshing and materials features in the thoracolumbar FEM, with: E, Young's modulus (MPa);  $\rho$ , Density ( $\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$ );  $\nu$ , Poisson's ratio;  $C_l$ , liquid bulk modulus (MPa);  $\nu_l$ , shear kinematic viscosity ( $\text{mm}^2\cdot\text{ms}^{-1}$ )

The strain rate dependant, non-linear elastic, spinal cord FEM (Figure 1) was based on the FEM presented by Fradet et al. (2016a). However, the model geometry was modified by extruding an outline of the spinal cord components, based on the spinal cord cross-section at mid-T12. Meshing of the spinal cord model was defined as follows: pia mater, dura mater and denticulate ligaments were meshed with quadrilateral (4 nodes) 2D elements, white and gray matters were meshed with pentahedral (6 nodes) 3D elements, and CSF was meshed with cubic (8 nodes) 3D elements. Material laws and properties were described previously by Fradet et al. (2016a) (Table A.1). The cranial 5 mm of the spinal cord were defined as a rigid body and bounded with the upper extremity of the spinal segment.



**Figure A.1** Finite element model, with: T11, T12 and L1 vertebrae and their associated disks; DL, the denticulate ligaments; DM, the dura mater; GM, the gray matter; PM, the pia mater; WM, the white matter

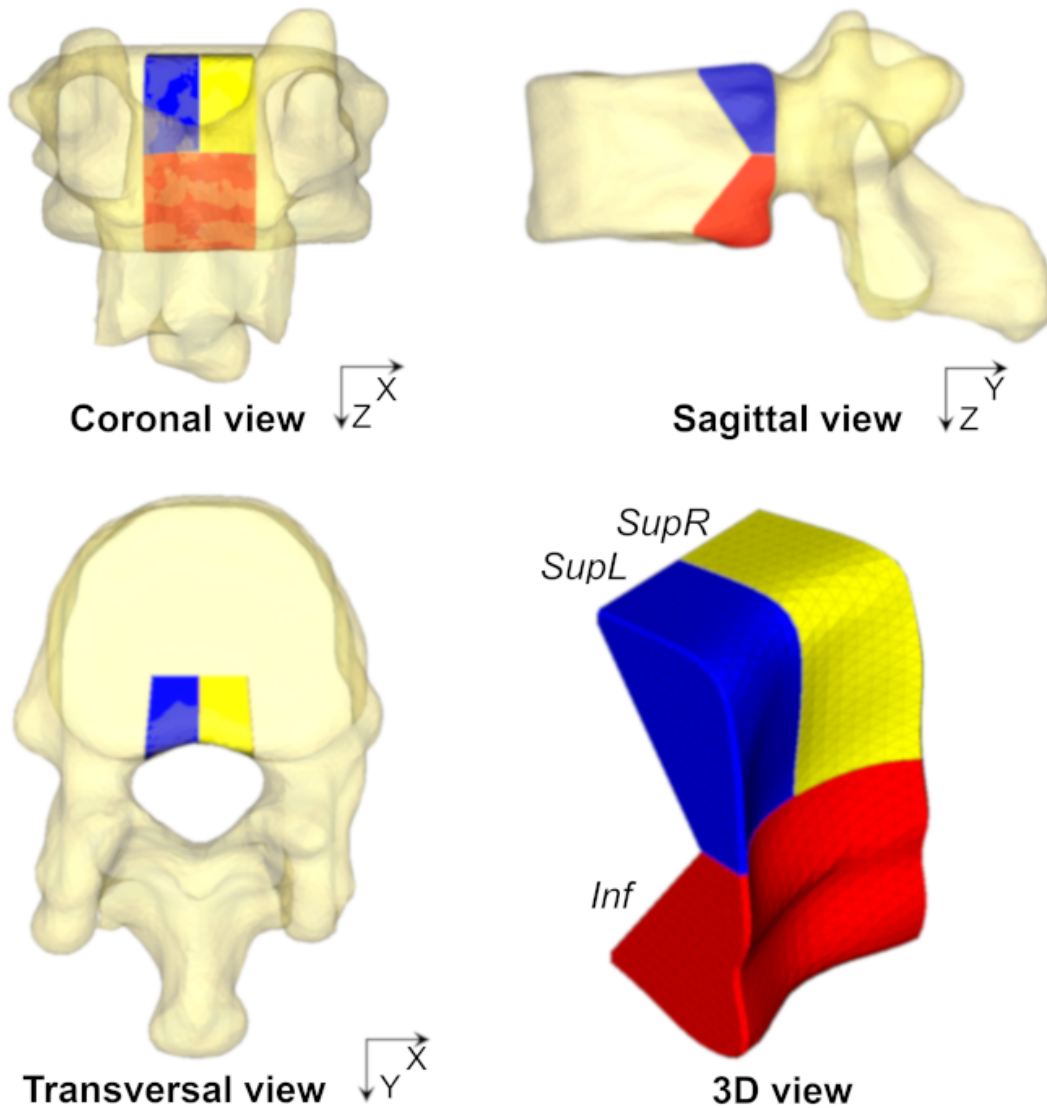
Fractured bony fragments were carved into T12, from the aforementioned spine FEM. Key geometric features of bony fragments were based on typical thoracolumbar burst fractures, associated with SCI, retrieved from our institution's database (Thompson et al., 2015). Four bone fragments were defined (Figure A.2). A superior fragment consisted of the typical delta fragment fractured from the supero-posterior portion of the vertebral body and located between the pedicles. The depth of the superior fragment was defined as one fourth of the sagittal diameter of the vertebral body, while its height was defined as half of the vertebral body height. In addition to modelling the superior fragment as a single fragment, comminution of the superior fragment was also modelled by splitting it in two equal halves (SupR and SupL, Figure A.2). An inferior fragment consisting of the fragment fractured from the infero-posterior portion of the vertebral body was also modelled. For both superior and inferior fragments, the lateral sides were then undercut with a 5° angle (Figure 2, transversal view) and their edges trimmed with a 0.25 mm and 45° chamfer (best seen from the sagittal view), to mimic typical fractures lines and avoid any numerical issues regarding to sharp edges impacts during dynamic simulations. Each fragment was defined

as a rigid body and meshed with tetrahedral (4 nodes) elements. Their material laws and properties are provided in Table A.1.

### **Loading and boundary conditions**

The CSF was defined as being in contact with the dura mater and pia mater, filling the subarachnoid space (Fradet et al., 2016a). For the CSF to move throughout simulations, the FEM was immersed into a volume of air meshed with elements similar to the CSF. Details about contact interfaces between components of the spinal cord can be found in Fradet et al. (2016a). Frictionless contact interfaces were also defined between fragments when retropulsed into the canal. Frictionless damping contact interfaces between the fragments and the posterior wall of the canal were also defined. Finally, frictionless contact interfaces were defined between the dura mater and canal walls, as well as with fragments.

Disks, vertebrae and the cranial 5 mm of the spinal cord were fixed in space, to provide a stable environment for deformable components. Modelled fragments were given an initial translational velocity, along the Y axis (i.e. the antero-posterior axis) (Figure A.2), as well as an initial rotational velocity, around the X axis (i.e. the mediolateral axis) (Figure A.2), to mimic the retropulsion of fragments within the spinal canal. No boundary condition was applied to fragments.



**Figure A.2** Geometry of the fragments, with: SupL, the left superior fragment; SupR, the right superior fragment; Inf, the inferior fragment

### Spinal cord model validation

Due to geometrical simplifications of the spinal cord, as well as modification of the elements type from Fradet et al. (2016a), the spinal cord FEM had to undergo validation. It was achieved both in transverse compression and uniaxial tension. Transverse compression validation of the model was achieved by replicating Fradet et al. (2016b)



experimentations on 25 mm long samples of porcine spinal cords. The impactor was modelled with a similar geometry (cylindrical, 5 mm of diameter), defined as a rigid body, meshed with cubic elements of 0.3 mm characteristic length. The bottom plate was modelled as an infinite rigid plane. No boundary condition was applied to the spinal cord. Compression was induced by an imposed displacement of the impactor, up to 90 % of compression based on the anteroposterior diameter of the spinal cord segment. Three compression rates were simulated: 0.5, 5 and 50  $.s^{-1}$ .

As for uniaxial tension validation, the same segment of spinal cord have been deprived of its dura mater. As literature is usually unclear on whether or not the pia mater is removed or altered for the purpose of uniaxial tension testing, both cases were simulated. Both extremities of the spinal cord segment were defined as rigid bodies. One extremity fixed, while the other was constrained to only allow axial translations. Uniaxial tension was induced by an imposed displacement of the free extremity by 40 % of the total length of the segment, at a strain rate of 0.05  $.s^{-1}$  in order to replicate quasi-static conditions.

### Factorial design

Effects of different fracture patterns on the spinal cord mechanical behaviour were explored using a full  $2^4$  factorial experiment. Four factors were established as follows: absence or presence of comminution of the superior fragment (A), absence or presence of an inferior fragment retropulsion (B), rotation of fragment(s) (C) and fragment(s) initial velocity (D) (Table A.2).

| Factors  | A                                    |     | B                             |     | C                     |     | D                                |                                 |
|----------|--------------------------------------|-----|-------------------------------|-----|-----------------------|-----|----------------------------------|---------------------------------|
|          | Comminution of the superior fragment |     | Presence of inferior fragment |     | Rotation of fragments |     | Fragments initial velocity       |                                 |
| Modality | -1                                   | 1   | -1                            | 1   | -1                    | 1   | -1                               | 1                               |
|          | No                                   | Yes | No                            | Yes | No                    | Yes | 5 $m.s^{-1}$<br>0.5 $rad.s^{-1}$ | 10 $m.s^{-1}$<br>1 $rad.s^{-1}$ |

**Table A.2** Definition of factors for the factorial plan

Factors A, B and C were designed according to actual scenarios of burst fractures (Goulet et al., 2019) retrieved from our institution's database (Thompson et al., 2015; Wagnac et al., 2019). Initial translational fragment velocities were chosen as 50 and 100 % of the range simulated in the literature (Wilcox et al., 2003b – Table II). The value of 50 % of the full range was chosen such as fragments still have a full capacity to impact the spinal cord. Indeed, Wilcox et al. (2003b – Table II) found that fragments repulsed at 50 % of their velocities range were still able to penetrate the spinal cord by 2.1 mm, whereas they could just penetrate their spinal cord by 0.5 mm at their minimum velocity. These values of spinal cord penetration were both calculated by subtracting the reported maximum fragment displacement without spinal cord and dura mater by the maximum displacement with a spinal cord and dura mater present in the spinal canal (Wilcox et al., 2003b – Table II). Initial rotational fragment velocities were chosen to allow at least 15° of rotation before hitting the vertebral posterior elements and was therefore proportional to the translational velocity (500 and 1000 rad.s<sup>-1</sup> of angular velocity for 5 and 10 m.s<sup>-1</sup> of translational velocity respectively).

Therefore, 16 simulations were performed with an explicit solver (RADIOSS v.14.0, Altair Engineering Inc., U.S.A.) for 20 ms each. Output measurements for the factorial design were: maximum von Mises (VM) stress, maximum pressure, maximum major strain and maximum VM strain. Each measurement was observed into white and gray matters and was assumed to reflect the odds of SCI occurrence (Chang et al., 1994; Fradet et al., 2016a; Fradet et al., 2016b; Hall et al., 2006; Jarzem et al., 1992; Jones et al., 2008; Sparrey et al., 2009; Wilcox et al., 2003b; Yan et al., 2012).

## **Analysis**

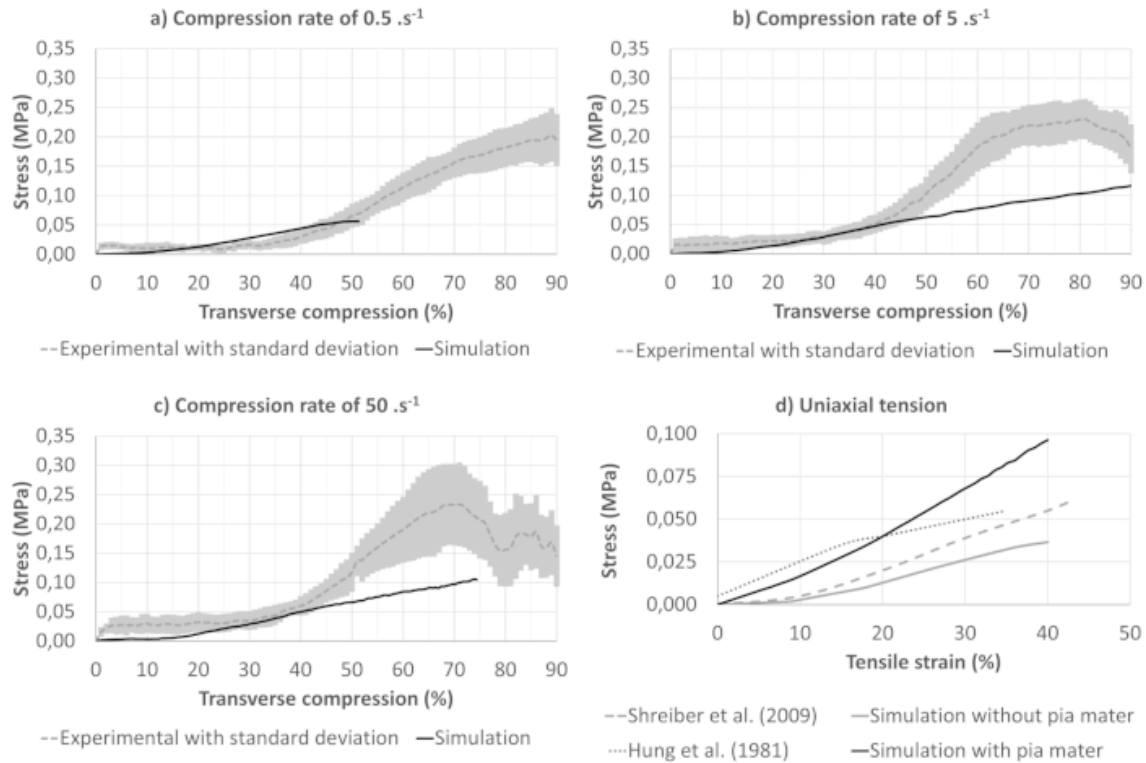
Statistical analysis of the factorial experiment was performed with an advanced analytics software package (Statistica v.7.1, Dell Software, U.S.A.). Graphical analysis of residuals was done on each set of answers of the factorial design, to ensure validity of analysis and check for any eventual necessity to apply transformation on data sets.

Each output was measured by nodes, in the FEM, and simple averaging of their values was performed by summing studied tensor invariants (for the main major strain) or tensor equivalent invariant (for the VM stress and strain) measured at the finite elements corner adjacent to the studied node, then dividing them by the number of finite elements corners adjacent to this node. This method was used as a tool to avoid mathematical aberrations on results.

#### **A.2.4 Results**

##### **Spinal cord model validation**

Simulated stress-deformation diagrams fits within one and a half standard variation from experimental data (Fradet et al., 2016b) up to 50 % of compression amongst the following strain rates: 0.5, 5 and 50  $.s^{-1}$  (Figure A.3(a-c)). Unfortunately, simulations could not converge over 51 % and 75 % of transverse compression for the strain rates of 0.5 and 50  $.s^{-1}$  respectively. Additionally, compared to large-magnitude tension data from the literature (Hung and Chang, 1981; Shreiber et al., 2009), simulated stress-elongation diagrams exhibit similar stiffness (Figure A.3(c)). However, the diagram plotted from the simulation with pia mater lacks a typical toe region as compared to experimental results.



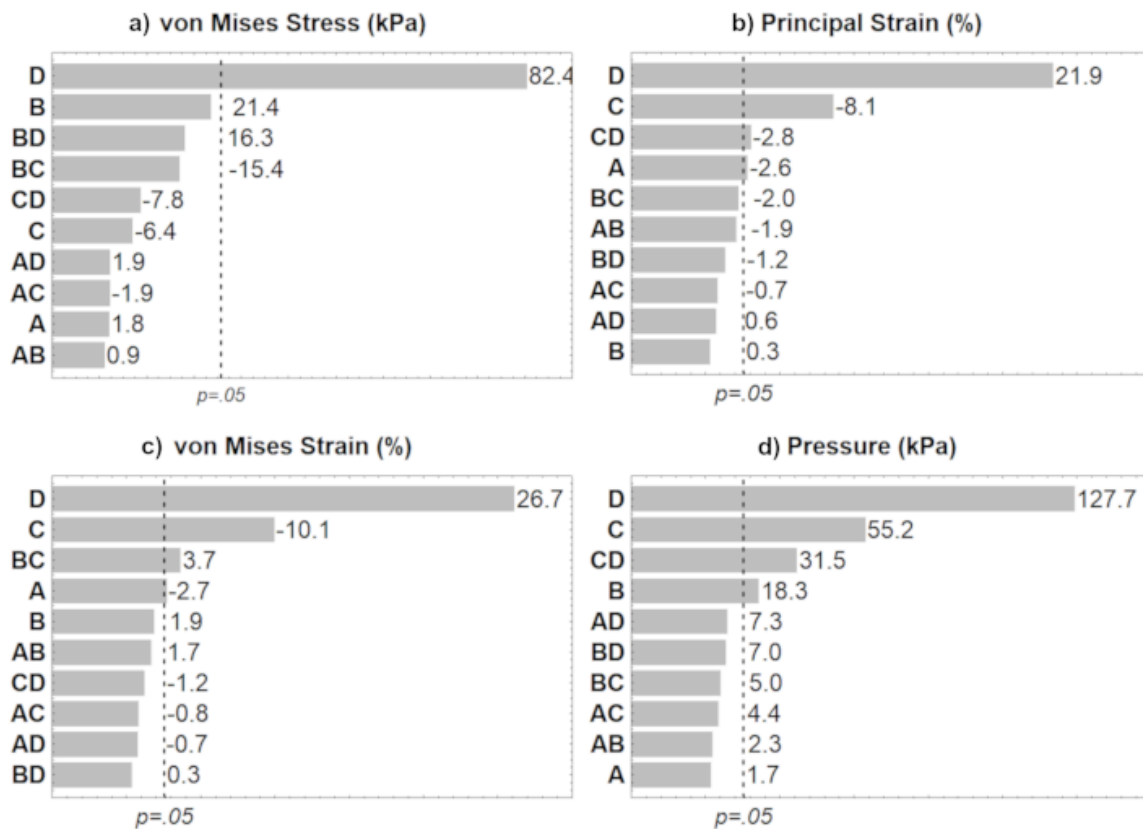
**Figure A.3** Simulated stress-deformation diagrams for the spinal cord model validation compared to experimental results in transverse compression at a)  $0.5 \text{ s}^{-1}$ , b)  $5 \text{ s}^{-1}$  and  $50 \text{ s}^{-1}$ , as well as in c) uniaxial tension

### Factorial design

For each studied output of the factorial experiment, hypothesis of homoscedasticity, independence of trials and normality of results were valid, allowing for the design to be analysed. No data transformation was required.

Up to four factors or two-way interactions proved to significantly affect the outputs. They were sorted from the most to the least influential factor on each output (Figure A.4). Fragment initial velocity (D) significantly increased measurements amongst the whole set of outputs and was the only significant factor for the VM stress. Its effect magnitude also trumped the effect magnitude of every other significant factor and factorial interactions for all other outputs. Fragment rotation (C) significantly increased pressure in the spinal cord,

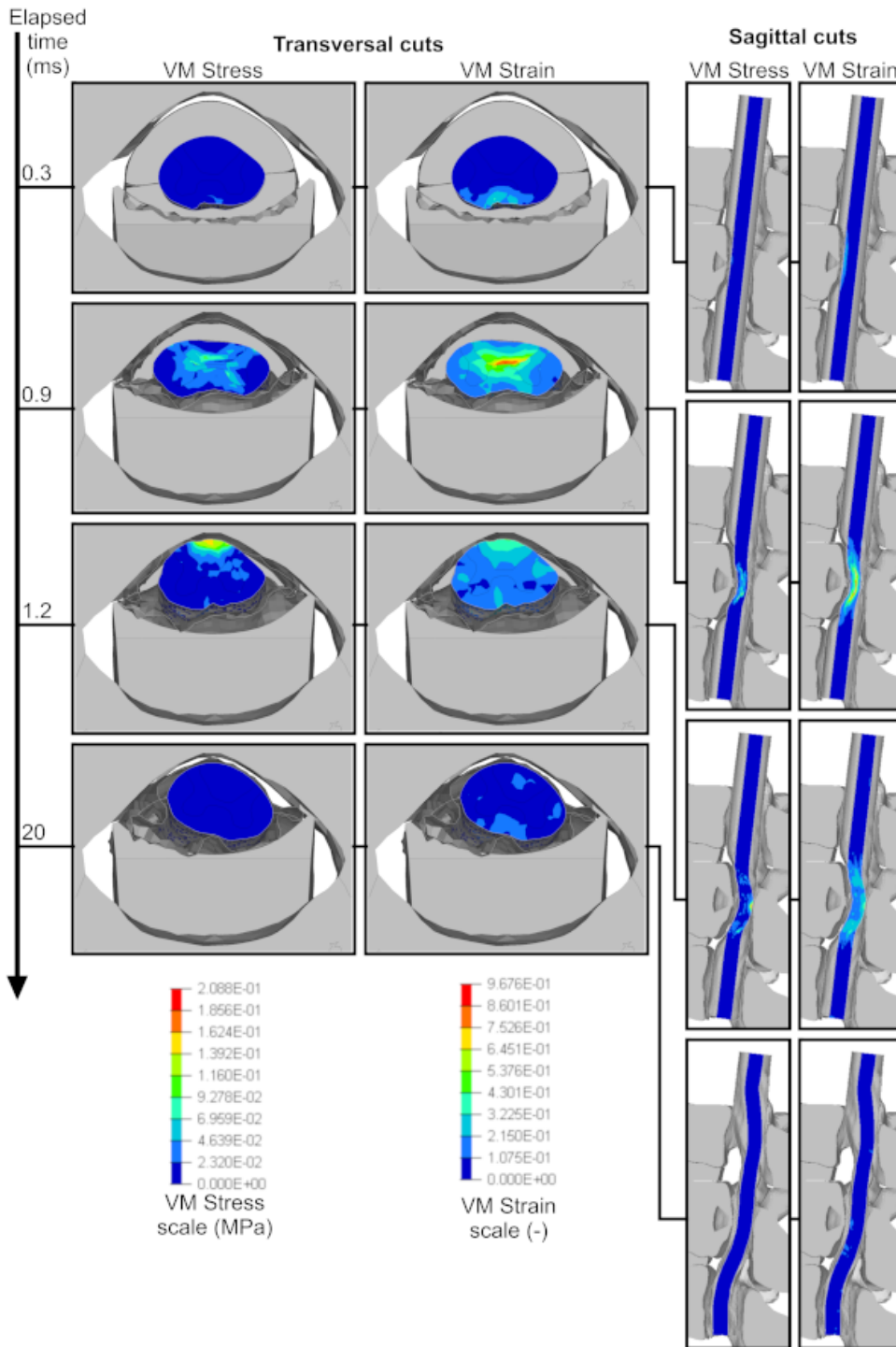
but significantly decreased VM and principal strain. Comminution of the superior fragment (A) significantly decreased both the VM and principal strain, but at low magnitudes (2.7 and 2.6 % of strain, respectively). Presence of an inferior fragment (B) only had a significant impact on the pressure, but its interaction with fragment rotation (BC) also significantly increased the VM strain. Interaction between fragment rotation and initial velocity (CD) significantly increased pressure, but significantly decreased the principal strain.



**Figure A.4** Sorted effects of factors and their interactions on a) von Mises Stress, b) Principal Strain, c) von Mises Strain, and d) Pressure. The vertical dashed line is the statistical significance threshold ( $p=0.05$ ). Factor A relates to comminution of the superior fragment, factor B relates to the presence of an inferior fragment, factor C relates to the rotation of fragment and factor D relates to the initial retropulsion velocity of fragments

Comminuted superior fragments moved laterally away from one another when retropulsed into the canal. However, there was not enough space in the canal for them to have a noticeably different trajectory from the full superior fragment, at the considered velocities.

Sagittal cross-sections were made at the midsection of the vertebral bodies and spinal cord. Transversal cross-sections were made at the midsection of the vertebral body, normal to the Z axis (Figure A.2), looking downward (Figure A.5). Through time, both VM stresses and strains evolved as a wave. High values of stress and strain briefly appeared on the anterior aspect of the spinal cord, progressed on the Y axis until bouncing back, and then dissipated alongside the rostrocaudal axis (Figure A.5). Moreover, the maximum VM strain reached values above 0.9, albeit the spinal cord was never sagittally compressed to such an amount of strain, as fragments were posteriorly blocked due to the spinal canal geometry. The observed maximal transverse compression of the spinal cord was indeed between 19.2 and 43.6 % for the simulated cases.



**Figure A.5** Cross sections of the model, exposing the distribution of VM stress and strain in the spinal cord (every factor set to +1)

### **A.2.5 Discussion**

A detailed FEM of the spinal cord, including pia mater, dura mater, white matter, gray matter, denticulate ligaments and CSF has been implemented into a detailed FEM of the thoracolumbar spine (T11-L1) to simulate 16 typical clinical scenarios of thoracolumbar burst fractures associated with SCI. This innovative work and model gives a whole new perspective on the study of SCI through FEM, providing important insight on the bone fragments and spinal cord interactions –therefore, on the primary injury to the spinal cord – during the traumatic event.

Maximum VM stresses, strains, pressure and major strains were used as output measurements to assess the spinal cord response to different scenarios of bone fragments retropulsed into the spinal canal. All of the scenarios simulated in this study were chosen based on actual cases from a spinal trauma database exhibiting SCI. Moreover, the output measurements being considered to be related to odds of occurrence and severity of SCI during traumatic events in the literature (Chang et al., 1994; Fradet et al., 2016a; Fradet et al., 2016b; Hall et al., 2006; Jarzem et al., 1992; Jones et al., 2008; Sparrey et al., 2009; Wilcox et al., 2003b; Yan et al., 2012), it can safely be assumed that factors influencing these outputs would also influence the severity of SCI.

The behaviour of the spinal cord FEM was shown to be valid both in uniaxial tension and transverse compression at various strain rates, up to 50 % of compression. The lack of toe region in uniaxial tension, for the simulation where the pia mater was kept, is explained by the linear-elastic material law given to the pia mater (Fradet et al., 2016a). However, as the spinal cord overall stiffness was in range with the literature for both simulations, the FEM is considered valid in uniaxial tension. Although pia and dura mater are known to be orthotropic tissues, these tissues are both given linear-elastic property, where their isotropic Young's moduli is equal to their documented axial Young's moduli (Fradet et al., 2016a). However, as their circumferential Young moduli can be dramatically higher than their axial one (Patin et al., 1993; Runza et al., 1999; Wilcox et al., 2003a) and the simulated transverse compression inducing high circumferential deformation, it might explain the



FEM inability to replicate experimental data beyond 50 % of compression. Thus, care should be taken not to use the model over this lever of compression without any further improvement. As the burst fracture simulations never exhibited transverse compression above a value of 42.6 %, the mechanical behaviour of the model was deemed valid in transverse compression for the purpose of this study. Finally, no formal validation of the loading conditions was performed, as no comprehensive data on the dynamics of complex burst fracture patterns can be found. It is however estimated that the model can still be considered adequate, as fragments were modeled from patients' images and repulsed at documented translational velocities (Wilcox et al., 2003b).

Fragments repulsion velocity significantly increased every output, at high effect magnitudes, supporting experimental studies that found higher contusion velocity as predictors of increased severity of SCI (Sparrey et al., 2008). As higher fragment velocities are also linked to higher energy transfers to the spinal cord (Sparrey et al., 2008), it can safely be assumed that high energy traumas are more severe. It could also corroborate the difficulties of surgeons to evaluate a patient's condition based on medical images, as the effect of velocity overwhelm the effects of fracture patterns. Fragment rotation, as well as presence of an inferior fragment, can be considered as strong predictors of increased pressures sustained by the spinal cord during the initial impact. However, as comminution of the superior fragment appears to have low effect magnitudes when significant, it is not likely to be an important predictor of SCI severity under the conditions of these simulations.

The discrepancy of the fragment rotation increasing the maximum pressure, but decreasing VM strains can be explained by the physical interpretation of these outputs. Indeed, the VM criterium relates more to local distortions of bodies at a constant volume, whereas pressure relates more to volume variations. However, it isn't known whether local distortion, or volume variation, is more prone to induce lesions to the spinal cord. It isn't known either if these two considerations could have distinctive lesion modes on the spinal cord tissues and cells. Furthermore, raw pressures, stresses and strains may not be sufficient criteria for SCI studies, as they do not carry information on the duration of the impact on

the spinal cord. Criteria such as accelerations, used in brain studies (Rowson et al., 2012; Zhang et al., 2004), or momentum, could be explored in further studies to assess probability of SCI, as well as their severity.

Distribution of stress and strain within the spinal cord exposed that they progress quickly into the spinal cord, as a wave bouncing back and forth, and promptly dissipates alongside the rostrocaudal axis. Therefore, albeit the primary injury in traumatic SCI is due to compression of the spinal cord in thoracolumbar burst fractures, shear and longitudinal strains may also significantly contribute to the primary injury, immediately after impact. Moreover, shear stresses and strains are already measured, alongside tensor invariants, in brain FEM, and considered as important predictors of brain injuries (Chatelin et al., 2011; Zhang et al., 2004).

Though this study used a combination of two documented FEM (El-Rich et al., 2009; Fradet et al., 2016a; Garo et al., 2011; Wagnac et al., 2012), limitations still arise from them both. Geometry of the spinal cord model was based on histological reports and may be geometrically biased, in addition to neglect spinal cord features such as eccentricity within the spinal canal, nerve roots anchoring and presence of epidural tissues. This model was however stated to be suitable for relative comparison of mechanical stimulations (Fradet et al., 2016a).

Although the spine FEM used in this study was suitable for deformation under different loading rates (Wagnac et al., 2012), it was here defined as a rigid body. Consequently, the spine can't be deformed by the traumatic event when it should (Wood et al., 2014). This simplification might impact the kinematics of fragments, as well as global strains applied to the anteroposterior diameter of the spinal cord. Indeed, the loading cases of simulations were the initial velocities imposed to fragments, whereas fragments displacements would rather be induced by the spine deformations, fracture and compression. Nevertheless, the results remain valid since this study focused on the relative effects of different fracture patterns on the spinal cord mechanical behaviour, rather than the absolute effects. Although

the spine was set as a rigid body, such a detailed model was still necessary for the geometrical adequacy of *in situ* study of burst fractures.

Fracture patterns of the vertebral body were studied at T12 level in a 50<sup>th</sup> percentile spine model (Wagnac et al., 2012). However, this level was reported to exhibit less severe SCI than L1 (Yugue et al., 2011). As it is impossible to judge for the viability of the results for different thoracolumbar levels, due to the variability of spinal cord and vertebral geometry and anatomy (Cho, 2015), further investigation should be performed. Future studies should be performed using patient-specific cases, as well as spine and spinal cord geometries, to further gain insight on the relative effects of functional anatomy as compared to the biomechanical conditions sustained by the spinal cord during traumatic SCI. It could also be beneficial to look for and study additional primary factors of burst fractures.

#### **A.2.6 Conclusion**

Key features of fracture patterns related to SCI were identified in this study from 16 scenarios of thoracolumbar burst fractures. These important findings shed light on effects of burst fracture patterns of the vertebral body on the spinal cord mechanical behaviour and can be used as a starting point for the better understanding of the primary injury from the *in situ* biomechanical loading of the spinal cord during traumatic events.

Material and methods presented in this work should be replicated at different thoracolumbar levels of deformable spine FEM, to account for the overall dynamics and interaction of spine, spinal cord and fragments. Furthermore, patient-specific burst scenarios and geometry should be replicated in order to comprehensively link traumatic events, radiographs and known SCI severity and recovery.

### **A.2.7 Authorship contribution statement and acknowledgements**

Lucien Diotalevi: conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, validation, writing - original draft.

Nicolas Bailly: conceptualization, investigation, writing - original draft.

Éric Wagnac: validation, writing - review & editing.

Jean-Marc Mac-Thiong: conceptualization, methodology, writing - review & editing, supervision, funding acquisition.

Julien Goulet: conceptualization, writing - review & editing.

Yvan Petit: conceptualization, methodology, validation, writing - review & editing, supervision, funding acquisition, project administration.

No conflicts of interest were declared for any author. This study was funded by the Canada Research Chair for engineering innovation in spinal trauma and Medtronic research chair on spinal trauma at Université de Montréal.

### **A.2.8 References**

Buchowski, J.M., Kuhns, C.A., Bridwell, K.H., Lenke, L.G., 2008. Surgical management of posttraumatic thoracolumbar kyphosis. *Spine J* 8, 666-677.

Chang, D.G., Tencer, A.F., Ching, R.P., Treece, B., Senft, D., Anderson, P.A., 1994. Geometric changes in the cervical spinal canal during impact. *Spine* 19, 973-980.

Chatelin, S., Deck, C., Renard, F., Kremer, S., Heinrich, C., Armspach, J.-P., Willinger, R., 2011. Computation of axonal elongation in head trauma finite element simulation. *J Mech Behav Biomed* 4, 1905-1919.

Cho, T.A., 2015. Spinal cord functional anatomy. *CONTINUUM: Lifelong Learning in Neurology* 21, 13-35.

Denis, F., 1983. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine* 8.

El-Rich, M., Arnoux, P.-J., Wagnac, E., Brunet, C., Aubin, C.-E., 2009. Finite element investigation of the loading rate effect on the spinal load-sharing changes under impact conditions. *J Biomech* 42, 1252-1262.

Fradet, L., Arnoux, P.-J., Callot, V., Petit, Y., 2016a. Geometrical variations in white and gray matter affect the biomechanics of spinal cord injuries more than the arachnoid space. *Adv Mech Eng* 8, 1-8.

Fradet, L., Cliche, F., Petit, Y., Mac-Thiong, J.-M., Arnoux, P.-J., 2016b. Strain rate dependent behavior of the porcine spinal cord under transverse dynamic compression. *P I Mech Eng H* 230, 858-866.

Garo, A., Arnoux, P.J., Wagnac, E., Aubin, C.E., 2011. Calibration of the mechanical properties in a finite element model of a lumbar vertebra under dynamic compression up to failure. *Med Biol Eng Comput* 49, 1371-1379.

Goulet, J., Richard-Denis, A., Petit, Y., Diotalevi, L., Mac-Thiong, J.-M., 2019. Morphological features of thoracolumbar burst fractures associated with neurological outcome in thoracolumbar traumatic spinal cord injury. *European Spine Journal*. Submitted.

Hall, R.M., Oakland, R.J., Wilcox, R.K., Barton, D.C., 2006. Spinal cord–fragment interactions following burst fracture: an in vitro model. *Journal of Neurosurgery: Spine* 5, 243-250.

Hung, T.-K., Chang, G.-L., 1981. Biomechanical and Neurological Response of the Spinal Cord of a Puppy to Uniaxial Tension. *Journal of Biomechanical Engineering* 103, 43-47.

Jarzem, P.F., Quance, D.R., Doyle, D.J., Begin, L.R., Kostuik, J.P., 1992. Spinal cord tissue pressure during spinal cord distraction in dogs. *Spine* 17, S227-234.

Jones, C.F., Kroeker, S.G., Cripton, P.A., Hall, R.M., 2008. The Effect of Cerebrospinal Fluid on the Biomechanics of Spinal Cord: An Ex Vivo Bovine Model Using Bovine and Physical Surrogate Spinal Cord. *Spine* 33, 580-588.

Keynan, O., Fisher, C.G., Vaccaro, A., Fehlings, M.G., Oner, F.C., Dietz, J., Kwon, B., Rampersaud, R., Bono, C., France, J., Dvorak, M., 2006. Radiographic measurement parameters in thoracolumbar fractures: a systematic review and consensus statement of the spine trauma study group. *Spine* 31;5:E156-165

Limb, D., Shaw, D.L., Dickson, R.A., 1995. Neurological injury in thoracolumbar burst fractures. *J Bone Joint Surg BR* 77-B, 774-777.

Meves, R., Avanzi, O., 2006. Correlation among canal compromise, neurologic deficit, and injury severity in thoracolumbar burst fractures. *Spine* 31.

Mohanty, S., Bhat, N., Abraham, R., Keerthi, C.I., 2008. Neurological deficit and canal compromise in thoracolumbar and lumbar burst fractures. *J Orthop Surg* 16.

Panjabi, M.M., Kifune, M., Wen, L., Arand, M., Oxland, T.R., Lin, R.M., Yoon, W.S., Vasavada, A., 1995. Dynamic canal encroachment during thoracolumbar burst fractures. *J Spinal Disord* 8, 39-48.

Patin, D.J., Eckstein, E.C., Harum, K., Pallares, V.S., 1993. Anatomic and biomechanical properties of human lumbar dura mater. *Anesthesia and analgesia* 76, 535-540.

Qiu, T.-X., Tan, K.-W., Lee, V.-S., Teo, E.-C., 2006. Investigation of thoracolumbar T12–L1 burst fracture mechanism using finite element method. *Med Eng Phys* 28, 656-664.

Radcliff, K., Su, B.W., Kepler, C.K., Rubin, T., Shimer, A.L., Rihn, J.A., Harrop, J.A., Albert, T.J., Vaccaro, A.R., 2012. Correlation of posterior ligamentous complex injury and neurological injury to loss of vertebral body height, kyphosis, and canal compromise. *Spine* 37, 1142-1150.

Rowson, S., Duma, S.M., Beckwith, J.G., Chu, J.J., Greenwald, R.M., Crisco, J.J., Brolinson, P.G., Duhaime, A.-C., McAllister, T.W., Maerlender, A.C., 2012. Rotational Head Kinematics in Football Impacts: An Injury Risk Function for Concussion. *Ann Biomed Eng* 40, 1-13.

Runza, M., Pietrabissa, R., Mantero, S., Albani, A., Quaglini, V., Contro, R., 1999. Lumbar dura mater biomechanics: experimental characterization and scanning electron microscopy observations. *Anesthesia & Analgesia* 88, 1317-1321.

Shreiber, D.I., Hao, H., Elias, R.A., 2009. Probing the influence of myelin and glia on the tensile properties of the spinal cord. *Biomechanics and modeling in mechanobiology* 8, 311.

Sparrey, C.J., Choo, A.M., Liu, J., Tetzlaff, W., Oxland, T.R., 2008. The Distribution of Tissue Damage in the Spinal Cord Is Influenced by the Contusion Velocity. *Spine* 33, 812-819.

Sparrey, C.J., Manley, G.T., Keaveny, T.M., 2009. Effects of white, grey, and pia mater properties on tissue level stresses and strains in the compressed spinal cord. *J Neurotrauma* 26, 585-595.

Tang, P., Long, A., Shi, T., Zhang, L., Zhang, L., 2016. Analysis of the independent risk factors of neurologic deficit after thoracolumbar burst fracture. *J Orthop Surg Res* 11, 128.

Thompson, C., Mutch, J., Parent, S., Mac-Thiong, J.-M., 2015. The changing demographics of traumatic spinal cord injury: An 11-year study of 831 patients. *The Journal of Spinal Cord Medicine* 38, 214-223.

Wagnac, E., Arnoux, P.-J., Garo, A., Aubin, C.-E., 2012. Finite element analysis of the influence of loading rate on a model of the full lumbar spine under dynamic loading conditions. *Med Biol Eng Comput* 50, 903-915.

Wagnac, E., Mac-Thiong, J.-M., Arnoux, P.-J., Desrosiers, J.-M., Ménard, A.-L., Petit, Y., 2019. Traumatic spinal cord injuries with fractures in a Québec level I trauma center. *Canadian Journal of Neurological Sciences / Journal Canadien des Sciences Neurologiques*, 1-14. Accepted.

Wilcox, R.K., Allen, D.J., Hall, R.M., Limb, D., Barton, D.C., Dickson, R.A., 2004. A dynamic investigation of the burst fracture process using a combined experimental and finite element approach. *Eur Spine J* 13, 481-488.

Wilcox, R.K., Bilston, L.E., Barton, D.C., Hall, R.M., 2003a. Mathematical model for the viscoelastic properties of dura mater. *Journal of orthopaedic science* 8, 432-434.

Wilcox, R.K., Boerger, T.O., Allen, D.J., Barton, D.C., Limb, D., Dickson, R.A., Hall, R.M., 2003b. A Dynamic Study of Thoracolumbar Burst Fractures. *J Bone Joint Surg* 85, 2184-2189.

Wood, K.B., Li, W., Lebl, D.S., Ploumis, A., 2014. Management of thoracolumbar spine fractures. *Spine J* 14, 145-164.

Yan, Y.-B., Qi, W., Wu, Z.-X., Qiu, T.-X., Teo, E.-C., Lei, W., 2012. Finite Element Study of the Mechanical Response in Spinal Cord during the Thoracolumbar Burst Fracture. *PLOS ONE* 7, e41397.



Yugue, I., Aono, K., Shiba, K., Ueta, T., Maeda, T., Mori, E., Kawano, O., 2011. Analysis of the risk factors for severity of neurologic status in 216 patients with thoracolumbar and lumbar burst fractures. *Spine* 36.

Zhang, L., Yang, K.H., King, A.I., 2004. A Proposed Injury Threshold for Mild Traumatic Brain Injury. *J Biomech Eng* 126, 226-236.

# Annexe B Système de classification AOSpine du trauma vertébral thoraco-lombaire



## AO Spine Thoracolumbar Classification System

| Type A Compression Injuries   | Type B Distraction Injuries  | Type C Translation Injuries  |
|---|--|--|
| <p><b>A0 Minor, nonstructural fractures</b><br/>Fractures, which do not compromise the structural integrity of the spinal column such as transverse process or spinous process fractures.</p>                                 | <p><b>B1 Transosseous tension band disruption Chance fracture</b><br/>Monosegmental pure osseous failure of the posterior tension band. The classical Chance fracture.</p>                                     | <p><b>C Displacement or dislocation</b><br/>There are no subtypes because various configurations are possible due to dissociation/dislocation. Can be combined with subtypes of A or B.</p>  |
| <p><b>A1 Wedge-compression</b><br/>Fracture of a single endplate without involvement of the posterior wall of the vertebral body.</p>   | <p><b>B2 Posterior tension band disruption</b><br/>Bony and/or ligamentary failure of the posterior tension band together with a Type A fracture. Type A fracture should be classified separately.</p>         | <p><b>B3 Hyperextension</b><br/>Injury through the disk or vertebral body leading to a hyperextended position of the spinal column. Commonly seen in ankylosing disorders. Anterior structures, especially the ALL, are ruptured but there is a posterior hinge preventing further displacement.</p> |
| <p><b>A2 Split</b><br/>Fracture of both endplates without involvement of the posterior wall of the vertebral body.</p>  |  |  |
| <p><b>A3 Incomplete burst</b><br/>Fracture with any involvement of the posterior wall; only single endplate fractured. Vertical fracture of the lamina is usually present and does not constitute a tension band failure.</p> | <p><b>A4 Complete burst</b><br/>Fracture with any involvement of the posterior wall and both endplates. Vertical fracture of the lamina is usually present and does not constitute a tension band failure.</p> |  |

### Algorithm for morphologic classification

```

    graph TD
        Start[START] --> Q1{Displacement/Dislocation}
        Q1 -- YES --> C[C Translation]
        Q1 -- NO --> Q2{Tension band injury}
        Q2 -- Anterior --> Q3{Dissemination/dissipation}
        Q2 -- Posterior --> Q4{Mono-segmental osseous disruption}
        Q3 -- YES --> B3[B3 Hyperextension]
        Q3 -- NO --> Q4
        Q4 -- YES --> B1[B1 Pure transosseous disruption]
        Q4 -- NO --> Q5{Vertebral body fracture}
        Q5 -- Both endplates involved --> Q6{Posterior wall involvement}
        Q5 -- NO --> Q6
        Q6 -- YES --> A4[A4 Complete burst]
        Q6 -- NO --> A3[A3 Incomplete burst]
        Q6 -- YES --> A2[A2 Split/Pincer]
        Q6 -- NO --> A1[A1 Wedge/Impaction]
        Q6 -- YES --> A0[A0 Insignificant injury]
        Q6 -- NO --> NoInjury[No injury]
    
```

### Neurology

| Type | Neurological   |
|------|--|
| N0   | Neurology intact   |
| N1   | Transient neurologic deficit                                       |
| N2   | Radicular symptoms   |
| N3   | Incomplete spinal cord injury or any degree of cauda equina injury |
| N4   | Complete spinal cord injury  |
| NX   | Cannot be examined   |
| +    | Continued spinal cord compression                                  |

### Modifiers

| Type | Description   |
|------|---|
| M1   | This modifier is used to designate fractures with an indeterminate injury to the tension band based on spinal imaging with or without MRI. This modifier is important for designating those injuries with stable injuries from a bony standpoint for which ligamentous insufficiency may help determine whether operative stabilization is a consideration. |
| M2   | is used to designate a patient-specific comorbidity, which might argue either for or against surgery for patients with relative surgical indications. Examples of an M2 modifier include ankylosing spondylitis or burns affecting the skin overlying the injured spine.  |

### Classification Nomenclature

Displacement injury of the segment T8-T9 with an incomplete burst fracture of T9, incomplete spinal cord injury, ankylosing spondylitis

**T8-T9: C** (Primary injury)

Complete burst fracture of L1, neurologically intact, PLC status unclear

**L1: A4** (Secondary injury)

**(T9: A3; N3; M2)** (Neurologic status and modifiers)

**(N0; M1)** (Neurologic status and modifiers)

Disclaimer:

1. Vaccaro, A. R., C. Dren, C. K. Kopke, M. Dvorak, C. Schraen, C. Bellabarba, M. Reimold, B. Asari, F. Karndorff, J. Chapman, R. Sharmuganathan, M. Fehlings, L. Viala, A. G. S. C. Injury and Trauma Knowledge 2019. "AO Spine Thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers." *Spine (Phila Pa 1976)* 38(2): 2028-2037.

2. Keeler, C. K., A. R. Vaccaro, J. D. Koenig, M. F. Dvorak, F. Karndorff, S. Rajasekaran, B. Asari, L. R. Viala, M. G. Fehlings, G. D. Schroeder, M. Reimold, K. J. Schraen, C. Bellabarba and F. Cunningham 2015. "Reliability analysis of the AOSpine thoracolumbar spine injury classification system by a worldwide group of native spine surgeons." *Exp Spine (Amst)*.



© 2020 AO Spine International  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.  
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Further information:  
[www.aospine.org/classification](http://www.aospine.org/classification)

# Annexe C Normes internationales pour la classification neurologique des lésions médullaires

Date de l'examen \_\_\_\_\_ Heure de l'examen \_\_\_\_\_

Nom de l'examineur \_\_\_\_\_ Signature \_\_\_\_\_

Nom de l'examineur \_\_\_\_\_ Signature \_\_\_\_\_

PT  Chirurgien rachidien  Physiatre  Infirmière  Autre (spécifiez): \_\_\_\_\_

### DROITE

**MUSCLES-CLÉS MOTEUR**

**MSD** (Membre Supérieur Droit)

Fléchisseurs du coude **C5**

Extenseurs du poignet **C6**

Extenseurs du coude **C7**

Fléchisseurs des doigts **C8**

Abducteurs des doigts (petit doigt) **T1**

**MID** (Membre Inférieur Droit)

Fléchisseurs de la hanche **L2**

Extenseurs du genou **L3**

Dorsifléchisseurs de la cheville **L4**

Extenseurs du gros orteil **L5**

Fléchisseurs plantaires de la cheville **S1**

(CAV) Contraction anale volontaire (Oui/Non)

**TOTAUX DROIT (MAXIMUM)**

(50) (56) (56)

• Points sensitifs-clés

**SENSITIF**

POINTS SENSITIFS-CLÉS

Toucher Léger (TL) Piqure (P)

**SENSITIF**

POINTS SENSITIFS-CLÉS

Toucher Léger (TL) Piqure (P)

**MSG** (Membre Supérieur Gauche)

Fléchisseurs du coude **C5**

Extenseurs du poignet **C6**

Extenseurs du coude **C7**

Fléchisseurs des doigts **C8**

Abducteurs des doigts (petit doigt) **T1**

**MIG** (Membre Inférieur Gauche)

Fléchisseurs de la hanche **L2**

Extenseurs du genou **L3**

Dorsifléchisseurs de la cheville **L4**

Extenseurs du gros orteil **L5**

Fléchisseurs plantaires de la cheville **S1**

(PAP) Pression anale profonde (Oui/Non)

**TOTAUX GAUCHE (MAXIMUM)**

(56) (56) (50)

**Autre déficit neurologique**

Myélopathie

Lésion nerveuse périphérique sans lésion médullaire

Lésion nerveuse périphérique avec lésion médullaire

Aucun

Inconnu

**SOUS-TOTAUX MOTEURS** MSD  + MSG  = **FMMS TOTAL**  (50)

MID  + MIG  = **FMMI TOTAL**  (50)

**SOUS-TOTAUX SENSITIFS** TLD  + TLG  = **TL TOTAL**  (112)

PD  + PG  = **P TOTAL**  (12)

RBC:  Présent  Absent  Inconnu

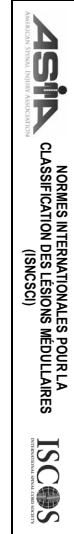
Syndrome de la queue de cheval:  Oui  Non  Inconnu

Besoin d'aide? Outil de classification informatisée disponible à: [www.isncscialgorithm.com](http://www.isncscialgorithm.com)

| NIVEAUX NEUROLOGIQUES |   | 3. NIVEAU NEUROLOGIQUE DE LA LÉSION (NLI) |  | 4. COMPLÈTE OU INCOMPLÈTE? |  | 6. ZONE DE PRÉSERVATION PARTIELLE |   |
|-----------------------|---|---|--|----------------------------|--|-----------------------------------|---|
| 1. SENSITIF           | D <input type="text"/> G <input type="text"/> |   |  |                            |  | SENSITIVE                         | D <input type="text"/> G <input type="text"/> |
| 2. MOTEUR             | D <input type="text"/> G <input type="text"/> |   |  |                            |  | MOTRICE                           | D <input type="text"/> G <input type="text"/> |

Ce formulaire a été modifié à partir de la feuille de travail INSCSCI version REV 04/19 avec la permission de l'American Spinal Injury Association. (Pour les raisons avec absence de fonction motrice ou sensitive au niveau S4-S seulement.) Incomplète = toute fonction sensitive ou motrice au S4-S. Niveau de PNP sans précision.

RH1 Version: V2019-05-07



## Évaluation de la fonction motrice

0 = Paralyse totale

1 = Contraction visible ou palpable

2 = Mouvement actif, pleine amplitude sans gravité

3 = Mouvement actif, pleine amplitude, contre gravité

4 = Mouvement actif, pleine amplitude contre gravité et résistance modérée dans une position musculaire spécifique.

5 = Mouvement actif (normal), pleine amplitude contre gravité et pleine résistance dans une position musculaire fonctionnelle attendue d'un individu sans déficit.

**NÉ** = Non évaluable (i.e. en raison d'une immobilisation, de douleur intense limitant l'évaluation, une amputation d'un membre ou une contracture >50 % de l'amplitude normale).

0\*, 1\*, 2\*, 3\*, 4\*, 5\* = Condition autre que médullaire

## Évaluation de la fonction sensitive

0 = Absente

1 = Altérée, sensation soit diminuée/affectée soit hypersensibilité

2 = Normale

NÉ = Non évaluable

0\*, 1\*, 2\*, 3\*, 4\*, 5\* = Condition autre que médullaire

Note: Les scores moteurs et sensitifs anormaux doivent être identifiés par un \* pour indiquer que la déficience est due à une condition autre que médullaire. La condition autre doit être expliquée dans la zone Commentaires, ainsi que des informations sur la manière dont la mesure est déterminée pour les besoins de classification (au moins normal ou anormal pour la classification)

## Quand évaluer les muscles non-clés

Pour un patient ayant une classification apparente AIS B, la fonction des muscles non-clés doit être testée sur plus de 3 niveaux sous le niveau moteur de chaque côté pour classer la lésion de façon plus précise (différencier les AIS B et C).

| Mouvement   | Racine |
|---|--------|
| <b>Épaule:</b> Flexion, extension, abduction, adduction, rotation interne et externe. | C5     |
| <b>Coude:</b> Supination.   |        |
| <b>Coude:</b> Pronation   | C6     |
| <b>Poignet:</b> Flexion   |        |
| <b>Dolgt:</b> Flexion à l'articulation proximale, extension.                          | C7     |
| <b>Pouce:</b> Flexion, extension et abduction du pouce.                               |        |
| <b>Dolgt:</b> Flexion à l'articulation MCP.   | C8     |
| <b>Pouce:</b> Opposition, adduction et abduction perpendiculaire à la paume.          |        |
| <b>Dolgt:</b> Abduction de l'index.   | T1     |
| <b>Hanche:</b> Adduction.   | L2     |
| <b>Hanche:</b> Rotation externe.  | L3     |
| <b>Hanche:</b> Extension, abduction, rotation interne.                                | L4     |
| <b>Genou:</b> Flexion.  |        |
| <b>Chevilles:</b> Inversion et éversion.  |        |
| <b>Orteil:</b> Extension des articulations MTP et IP.                                 |        |
| <b>Hallux et orteil:</b> Flexion et abduction articulations IPP et IPD.               | L5     |
| <b>Hallux:</b> Adduction.   | S1     |

## Échelle de sévérité ASIA (AIS)

**A = Complète.** Aucune fonction sensitive ou motrice préservée dans les segments S4-S5.

**B = Sensitive incomplète.** La fonction sensitive est préservée sous le niveau neurologique, mais pas la fonction motrice, et inclut les segments sacrés S4-S5 (toucher léger ou piqure en S4-S5 ou pression anale profonde) ET aucune fonction motrice n'est préservée à plus de trois niveaux sous le niveau moteur de chaque côté du corps.

**C = Motrice incomplète.** La fonction motrice est préservée aux segments sacrés les plus caudaux (S4-S5) pour le toucher léger, la piqure et la pression anale profonde) et possède une préservation de la fonction motrice sur plus de trois niveaux sous le niveau moteur ipsilatéral de chaque côté du corps. (Ceci inclut la fonction des muscles clés et non-clés utilisée pour déterminer un statut moteur incomplet). Pour les AIS C, moins de la moitié des muscles clés sous le niveau neurologique a une cote musculaire ≥ à 3.

**D = Motrice incomplète.** La fonction motrice est préservée sous le niveau neurologique, et au moins la moitié (la moitié ou plus) des muscles-clés sous le NNL a une cotation > 3.

**E = Normal.** Si la fonction sensitive et motrice, testée à l'aide du ISNCSCI, est notée comme normale pour tous les segments alors que le patient avait des déficits antérieurs, le niveau de sévérité sur l'AIS est alors de E. Un individu sans LM initiale ne recevra pas de niveau de sévérité sur l'AIS.

Utiliser ND (Non Déterminé) pour documenter les niveaux sensitifs et moteurs, le niveau neurologique, l'échelle de sévérité ASIA et/ou la zone de préservation partielle lorsqu'ils ne peuvent être déterminés à l'aide des résultats de l'examen.



NORMES INTERNATIONALES POUR LA CLASSIFICATION NEUROLOGIQUE DES LÉSIONS MÉDULLAIRES



INTERNATIONAL STANDARDS COMMITTEE

## Étapes de la classification

L'ordre suivant est recommandé afin de déterminer la classification des individus ayant une LM.

### 1. Déterminer les niveaux sensitifs pour les côtés droit et gauche.

Le niveau sensitif est le dermatome intact le plus caudal pour les tests de piqure et de toucher léger.

### 2. Déterminer les niveaux moteurs pour les côtés droit et gauche.

Tel que défini par le muscle-clé le plus bas ayant une cotation d'au moins 3 (en décubitus dorsal), pour autant que la fonction motrice des muscles-clés situés au-dessus de ce niveau soit jugée intacte (cotation de 5).

Note: dans les régions où il n'y a aucun myotome, le niveau moteur est présumé être le même que le niveau sensitif si la fonction motrice située au-dessus de ce niveau est normale.

### 3. Déterminer le niveau neurologique de la lésion (NNL)

Ceci fait référence au segment le plus caudal où les fonctions sensitives sont intactes et la force musculaire contre gravité est présente (3 ou plus), pour autant que les fonctions motrices et sensitives rostrales sont intactes. Le NNL est le plus céphalique des niveaux sensitifs et moteurs déterminés aux étapes 1 et 2.

### 4. Déterminer si la lésion est complète ou incomplète.

(i.e. absence ou présence de fonction au niveau du segment sacré) Si contraction anale volontaire = Non ET tous les scores sensitifs pour les niveaux S4-S5 = 0 ET pression anale profonde = Non, alors la lésion est Complète. Si non la lésion est Incomplète.

### 5. Déterminer le grade selon l'échelle de sévérité ASIA (AIS):

La lésion est-elle complète? Si OUI, AIS-A, et la ZPP peut être enregistrée (dermatome ou myotome le plus bas sur chaque côté avec une certaine préservation)

La lésion est-elle complète au niveau moteur? Si OUI, AIS-B (Non= contraction anale volontaire OU fonction motrice sur plus de trois niveaux sous le niveau moteur d'un côté spécifique si le patient a une lésion incomplète sensitive)

Au moins la moitié (la moitié ou plus) des muscles-clés sous le niveau neurologique de la lésion ont une cotation plus grande ou égale à 3?



Si la fonction sensitive et motrice est normale pour tous les segments, AIS - E  
Note: AIS E est utilisé pour les évaluations effectuées lors des suivis lorsqu'un individu ayant une LM documentée retrouve des fonctions normales. Si aucun déficit n'est trouvé lors de l'évaluation initiale, l'individu est neurologiquement intact et l'échelle ASIA ne s'applique pas.

### 6. Déterminer la zone de préservation partielle.

La ZPP est utilisée uniquement pour les lésions avec absence de fonction motrice (CAV) OU sensitive (pas de PAP, pas de sensibilité TL et pas de sensibilité P) dans les segments sacrés S4-S5 les plus bas, et fait référence aux dermatomes et myotomes partiellement innervés sous les niveaux moteurs et sensitifs. Avec une préservation de la fonction sensitive sacrée, la ZPP sensitive n'est pas applicable et, "NA" est inscrit dans la case. Par conséquent, si CAV est présent, la ZPP motrice n'est pas applicable et est noté NA

**Annexe D Tableau de classification des prédicteurs de l'issue neurologique à long terme chez les blessés médullaire traumatiques**

|   |
|---|
| <b>Category A: Consistent, quality evidence of significant effect of predictor on neurological outcome</b>  |
| Severity of the SCI (AIS grade)<br>ASIA motor score<br>Neurologic level of injury<br>Intramedullary signal abnormality on MRI<br>Age                |
| <b>Category B: Largely studied, but inconsistent, significant effect of predictor on neurological outcome after traumatic SCI</b>                   |
| Time to surgery<br>Surgical management<br>Spine injury pattern<br>Associated injuries<br>Spinal canal compromise<br>Maximum spinal cord compression |
| <b>Category C: Poorly studied, significant effect of predictor on neurological outcome after traumatic SCI</b>                                      |
| ASIA sensory score<br>Type of SCI syndrome,<br>Level of formal education<br>Level of energy associated with injury                                  |
| <b>Category D: No reported or unclear effect</b>  |
| Mechanism of injury<br>Steroid administration<br>Blood alcohol concentration<br>Race<br>Comorbidities   |

**Classification of predictors of neurological outcome**

**Tableau D.1** Tableau de classification des prédicteurs de l'issue neurologique à long terme chez les blessés médullaire traumatiques

Avec la permission de l'auteur correspondant ;  
Référence : **Mputu P**, Beauséjour M, Richard-Denis A, Thompson C, Mac-Thiong JM (2018) Early predictors of neurological recovery after traumatic spinal cord injury: a systematic review. Submitted.

