

EVALUATION DE SIMULATIONS NUMÉRIQUES SUR VERTÈBRES AVEC MÉTASTASES

David Mitton, Aurélie Meysen, Hélène Follet

Partenaires : Marc Gardegaront, Aurélie Levillain, François Bermond, Cyrille Confavreux

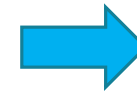
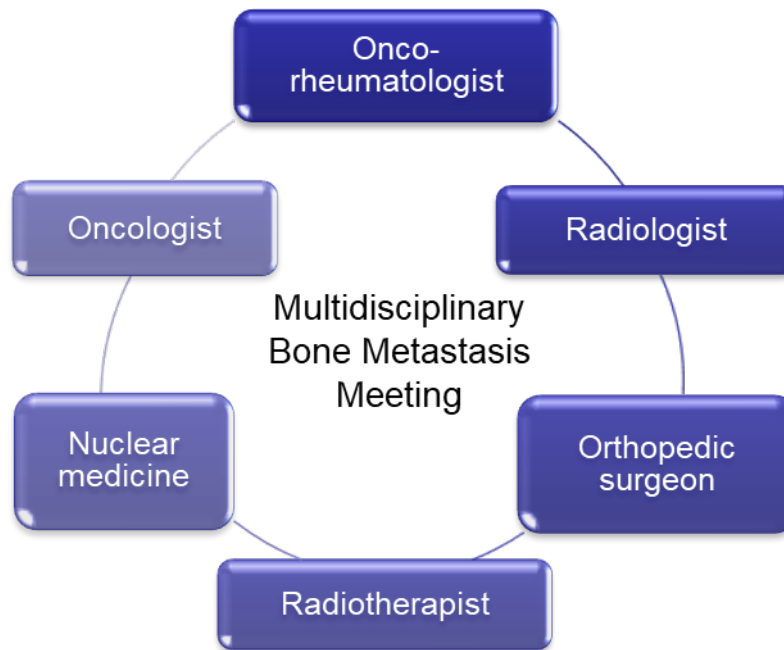
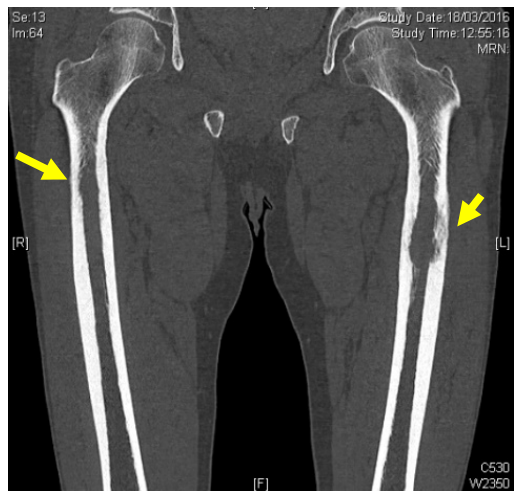
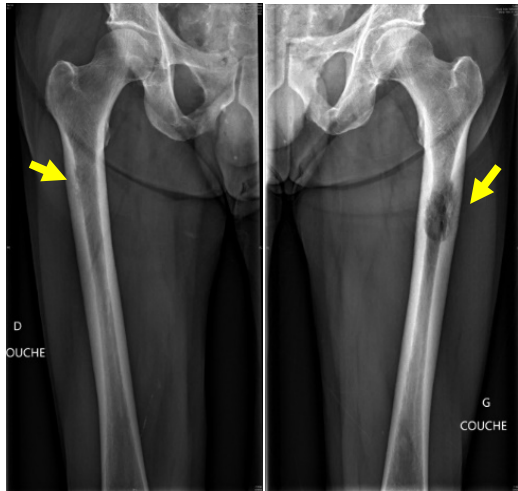


Contexte clinique et enjeux

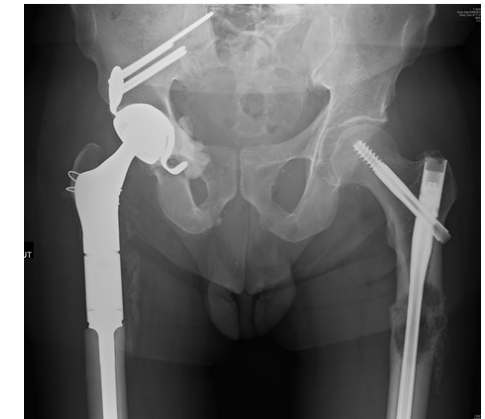
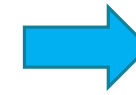


CANCER ET MÉTASTASES OSSEUSES

Question clinique (Pr. C. Confavreux et Pr. J-B Pialat)



3 jours



Estimation du risque de fracture ?

ESTIMATION DU RISQUE

Scores cliniques

Score de Mirels

Score	Site of lesion	Size of lesion	Nature of lesion	Pain
1	Upper limb	< 1/3 of cortex	Blastic	Mild
2	Lower limb	1/3 - 2/3 of cortex	Mixed	Moderate
3	Trochanteric	> 2/3 of cortex	Lytic	Functional

Limites : faibles sensibilité et spécificité (50-70%) et tendance à surestimer le risque de fracture

Damron et al, Clin Orthop Relat Res 2015

Besoin d'une meilleure estimation

MODELE BIOMECANIQUE – ANATOMO-REALISTE



Tomodensitométrie
calibrée



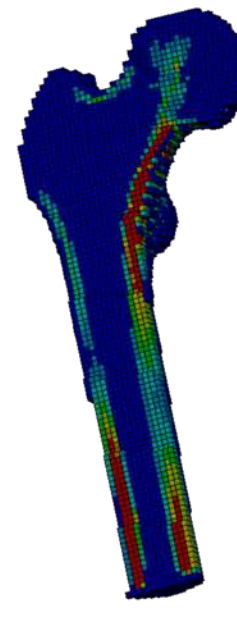
Segmentation



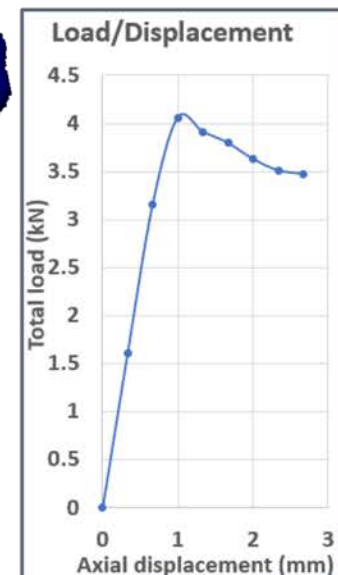
Maillage et
propriétés
mécaniques



Chargement
ex. appui
monopodal



Simulation
effort de rupture



RISQUE DE FRACTURES

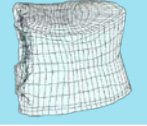
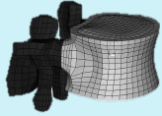
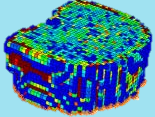
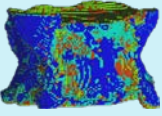
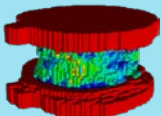
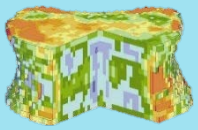
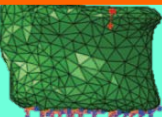
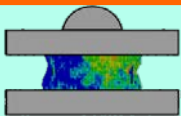
Fémur



Colonne vertébrale



MODÈLES DE CORPS VERTEBRAUX DANS LA LITTÉRATURE

	Modèle	Maillage	Loi de comportement	Critère de rupture	Condition de chargement	R ² par rapport à expérimentation	
PARIS	Choisne et al. 2018 (n = 28 L1 à L3)		hexaèdre linéaire (1/1.5 mm)	élastique linéaire	volume de 1cm ³ d'éléments contigus déformé à 1.5%	excentré	0.95
Sans métastase	Sapin et al. 2012 (n = 14 T11 à L2)		hexaèdre linéaire	élastique linéaire	volume de 1cm ³ d'éléments contigus déformé à 1.5%	excentré	0.80
	Pahr et al. 2014 (n = 37 T12 à L5)		Voxel (1.3 mm)	loi élasto-plastique avec endommagement	1er pic de la courbe force-déplacement	uniforme	0.77
	Prado et al. 2020 (n = 54)		Voxel (0.5 mm)	élasto-plastique linéaire	seuil de déformation	uniforme	0.78
	Buckley et al. 2007 (n = 81 T6 à T10)		Hexaèdre (1 mm)		déformation apparente de 3%	uniforme	0.79
LYON (basé sur)	Wang et al. 2012		Voxel (1 mm ³)	élastique linéaire parfaitement plastique	1.9% déformation globale	uniforme	0.85
Avec métastases	Anitha et al. 2017 (n = 12 T9 à T12)		tétraèdre linéaire (0.25x0.25x0.6 mm)	élasto-plastique linéaire	1er pic de la courbe force-déplacement	uniforme	0.72
BERN	Stadelmann et al. 2020 (n = 38)		Voxel (0.39x0.39x0.5 mm)	élasto-plastique linéaire avec endommagement	1er pic de la courbe force-déplacement	excentré	0.78

VERS UNE APPLICATION CLINIQUE

1 - Evaluation de ces modèles personnalisés sur pièces anatomiques *ex vivo* :

- Etude de sensibilité (Allard et al. SB 2021)
- Etude de reproductibilité (Allard et al. ESB 2023), comparaison de modèles (Allard et al. 2023)
- Comparaison de différents modèles sur différents jeux de données expérimentales

2 – Evaluation de ces modèles personnalisés sur données de patients (projet MEKANOS)

Objectif du stage









OBJECTIF

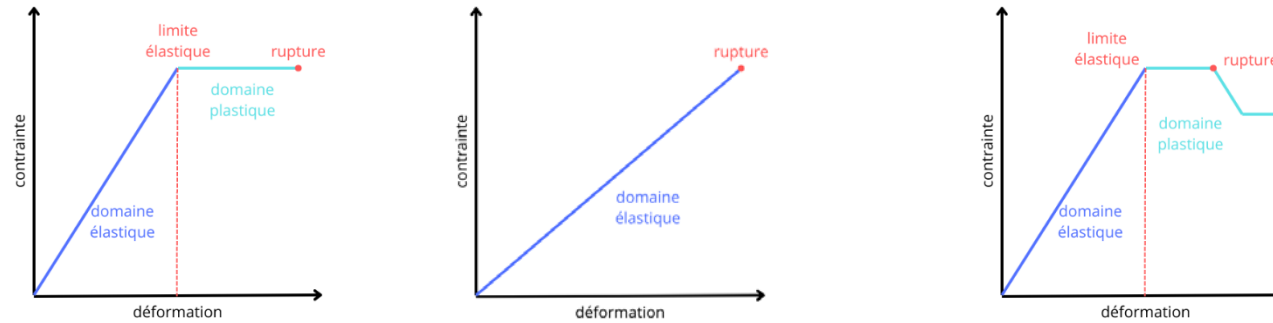
Comparaison entre différents modèles sur
différents ensembles de données

→ Lyon – Bern – Paris

ENSEMBLES DE DONNÉES UTILISÉS

Dataset de Lyon		Dataset de Bern			Dataset de Paris
		[A] 	[B] 	[C] 	
L3 sans défaut	L1 avec défaut	T5 à L5 avec métastases ostéolytiques [A], mixtes [B] et ostéoblastiques [C]			L1 à L3
N = 21 de 21 donneurs	N = 11 de 11 donneurs	N = 38 de 10 donneurs			N = 28 de 11 donneurs
Wegrzyn et al. 2011	Lokbani et al. 2021	Stadelmann et al. 2020			Choisne et al. 2018

MODÈLES UTILISÉS



Modèles	Lyon	Paris (IBHGC)	EL cluster	EL rupture globale	Bern (ARTOG)
Relation densité / module d'Young	$E \text{ (MPa)} = 3230\rho\text{(g/cm}^3) - 34.7$ <i>Kopperdahl et al. (2002)</i>	$E \text{ (MPa)} = 3230\rho\text{(g/cm}^3) - 34.7$ <i>Kopperdahl et al. (2002)</i>	$E \text{ (MPa)} = 3230\rho\text{(g/cm}^3) - 34.7$ <i>Kopperdahl et al. (2002)</i>	$E \text{ (MPa)} = 3230\rho\text{(g/cm}^3) - 34.7$ <i>Kopperdahl et al. (2002)</i>	<i>Pahr et al. (2014)</i>
Loi de comportement	Linéaire élastique parfaitement plastique Limite élastique : 0.7% ou 1.5% de déformation globale (EPP)	Élastique linéaire (EL)	Élastique linéaire (EL)	Élastique linéaire (EL)	Élasto-plastique avec critère d'endommagement <i>Lemaitre and Desmorat 2005</i> <i>Chevalier et al. 2009</i>
Critère de rupture	1.9% de déformation globale <i>Kopperdahl et al. 2014</i>	1 cm ³ d'éléments contigus déformé à 1.5% <i>Choisne et al. 2018</i>	1%, 2%, 3%, 4% ou 5% d'éléments contigus déformé à 1.5%	1.9% de déformation globale <i>Kopperdahl et al. 2014</i>	Accumulation d'endommagement

Nouveaux modèles

WORKFLOW MEKANOS

V. Allard (PhD 2022)

M. Gardegaront (PhD 2023)

E. Saillard (PhD 2025)



Adv. settings Model: Vertebra_Lyon

✓ Load Dicom

✓ Load Mesh or STL Auto segmentation

✗ Automatic orientation (femur only)

Show Scan Show Mesh
Show Mesh slices

Analysis suffix :

Calibration : Density = a * GreyLevel + b

Auto calibration

a :
b :

Boundary Conditions (model specific)
Length of the mesh : 12.49 (Z direction)

Element size :
Young's modulus step :
Height ratio of max displacement :
Slope (Yield strength = slope * E) :
Plastic modulus :
Remote point x coord
Remote point y coord
Remote point z coord
Specific tumor prop.

Show hidden parameters

Show boundary conditions

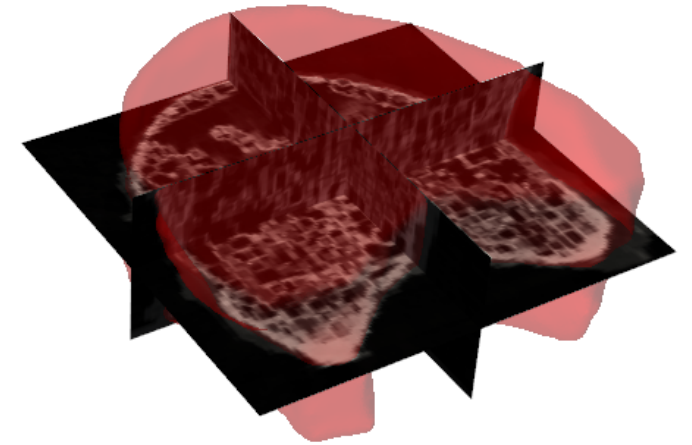
Batch processing

QCTMA FEA
 Automatic segmentation
 Automatic orientation (femur only)

Add to batch Remove selected

0 : Vertebra_Lyon,

Launch batch



X Slice

Y Slice

Z Slice

Résultats obtenus

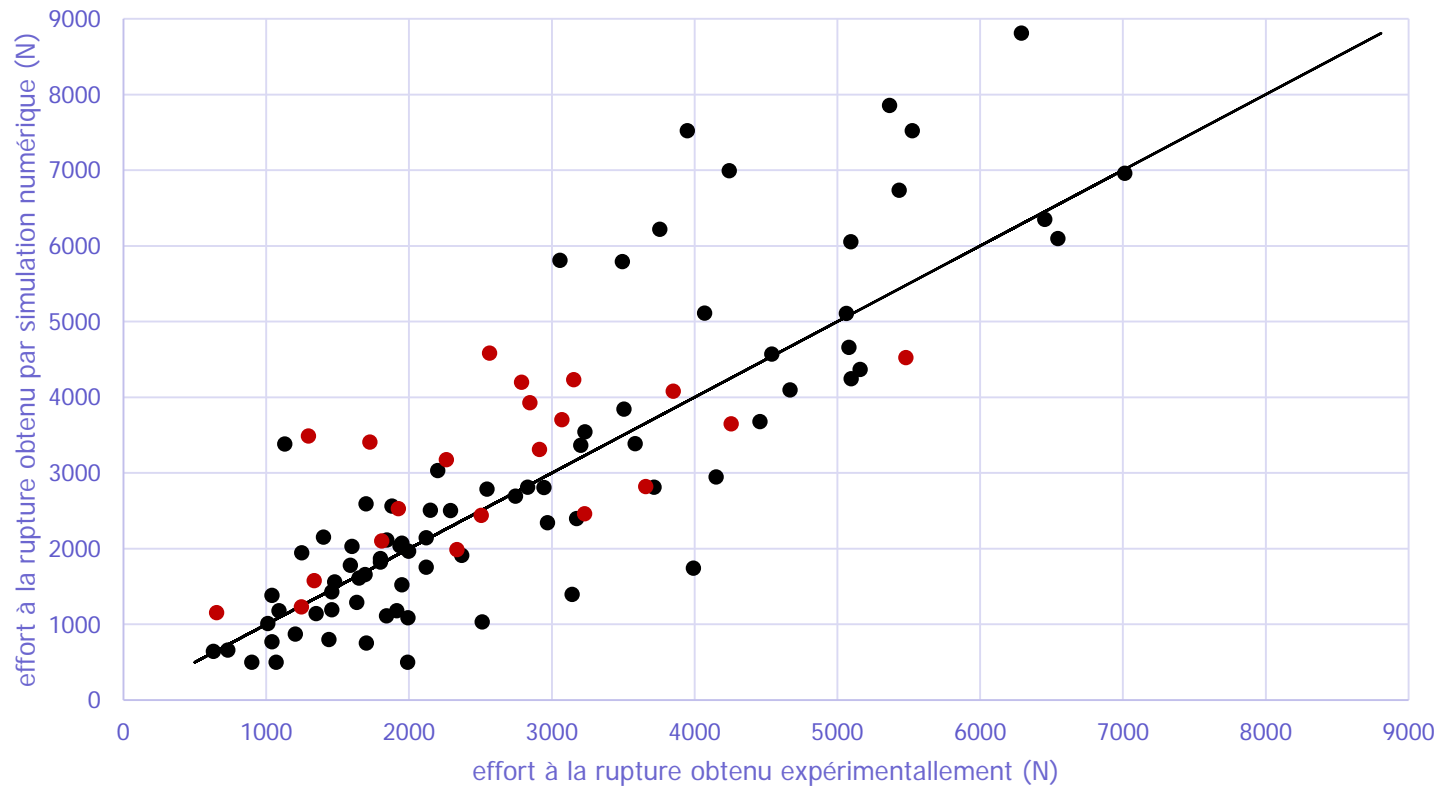


Modèle	Relation densité – module d'Young	Loi de comportement	Critère de rupture
Lyon	$E = 3230 \cdot \rho - 34.7$ <i>Kopperdahl et al. (2002)</i>	Linéaire élastique parfaitement plastique (EPP) Limite élastique : 0.7% de déformation	1.9% de déformation globale

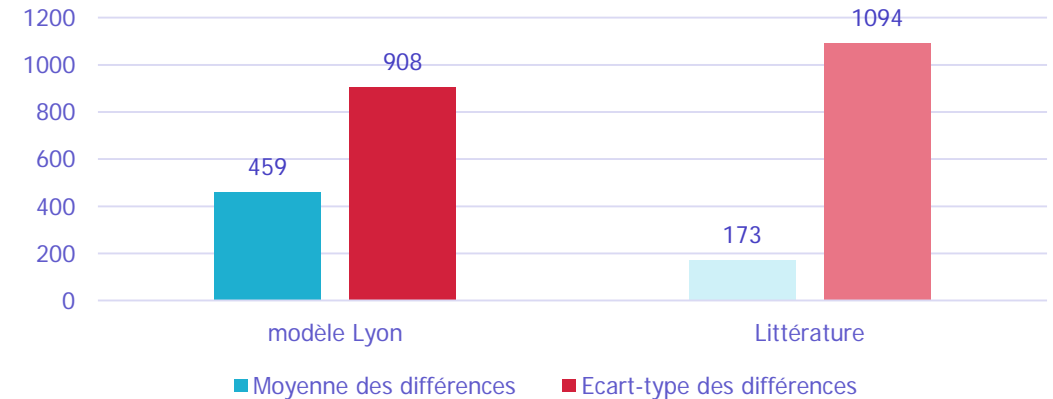


L3 sans défaut, avec plateau (Wegrzyn et al. 2011)

Efforts à la rupture obtenus avec le modèle élasto-plastique comparés aux résultats issus de la littérature

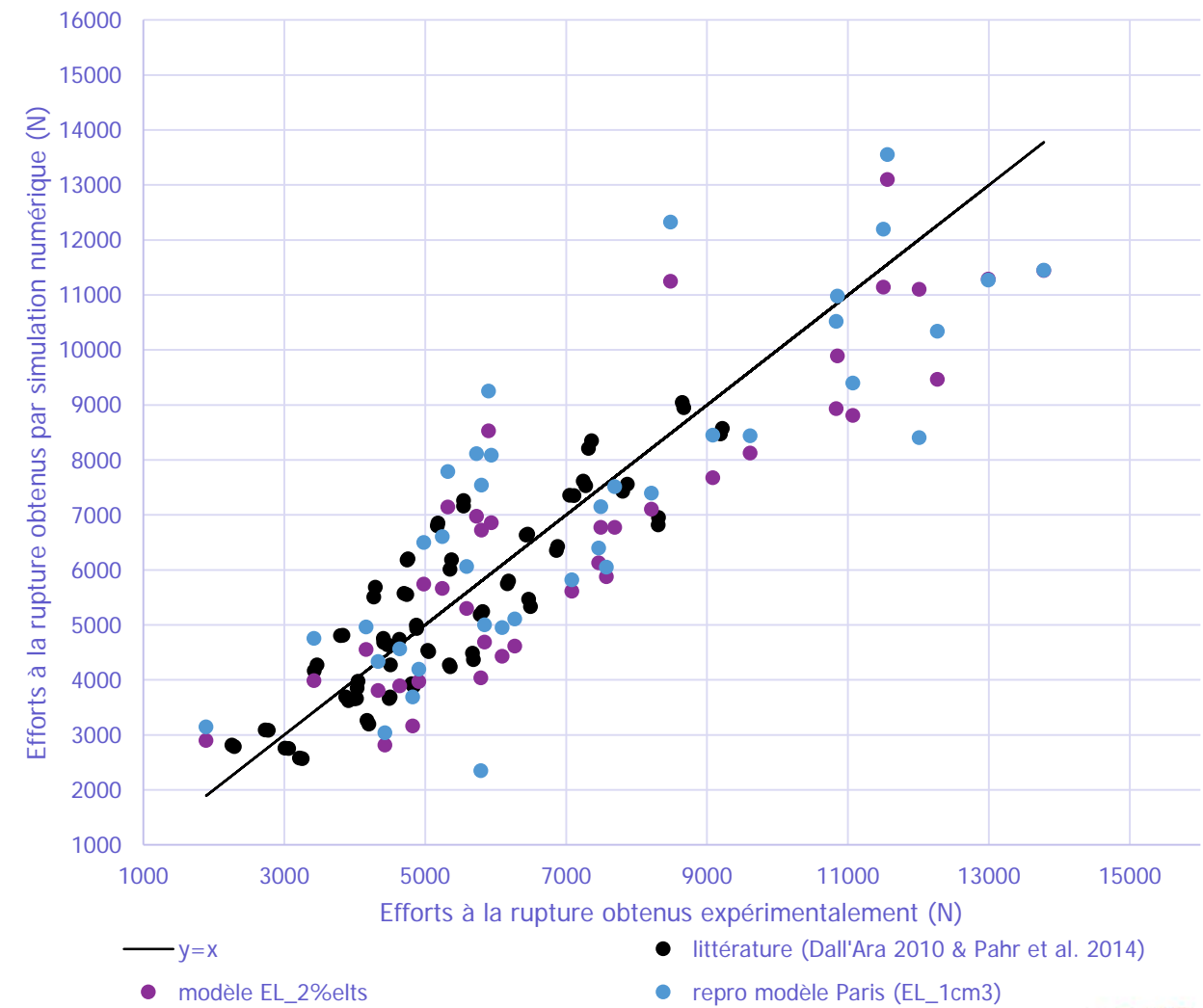
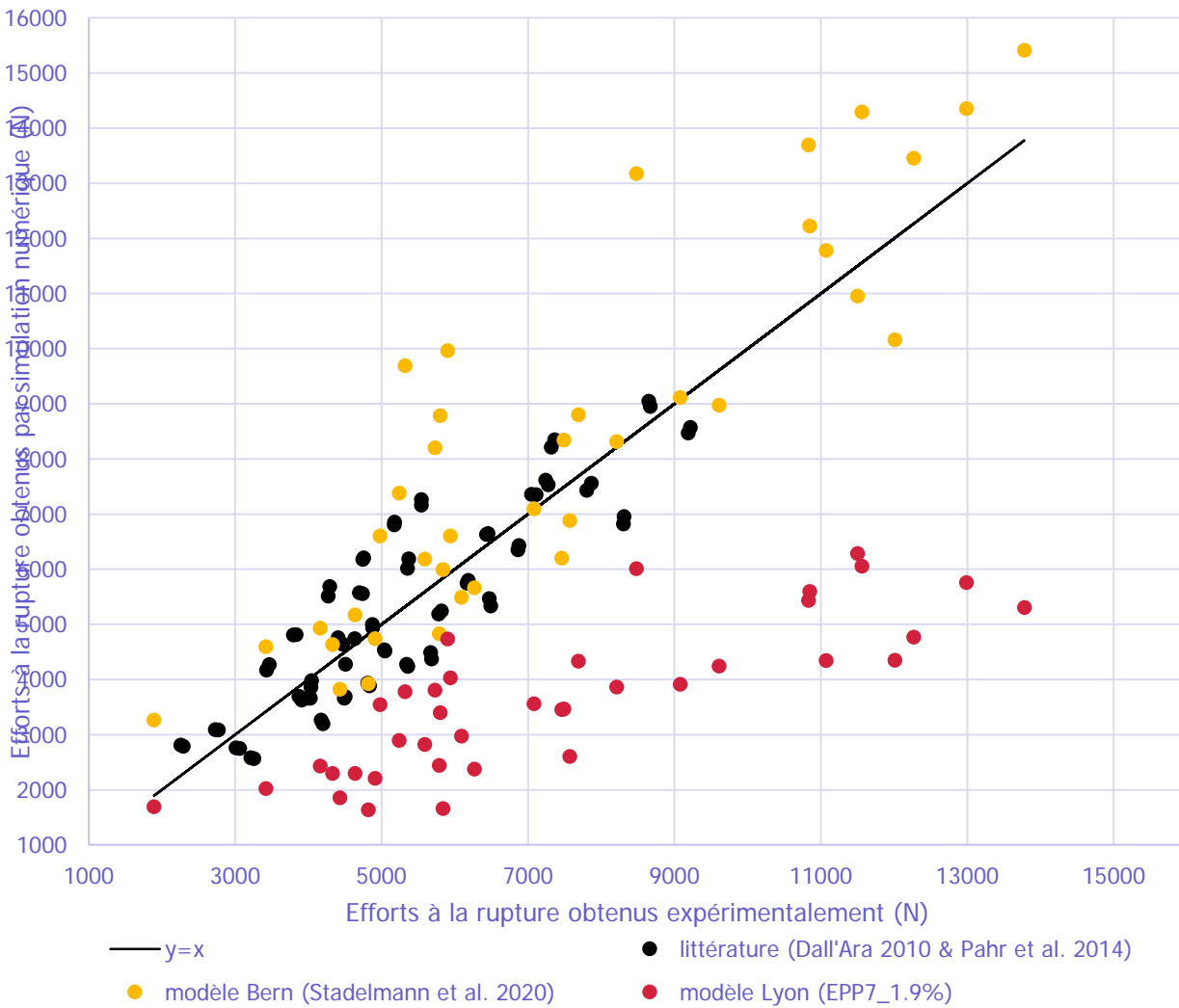
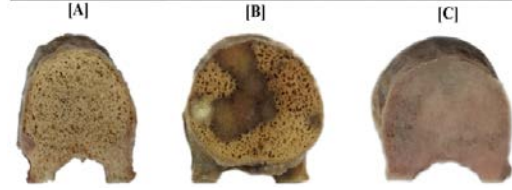


Moyenne et écart-type des différences entre simulation et étude expérimentale



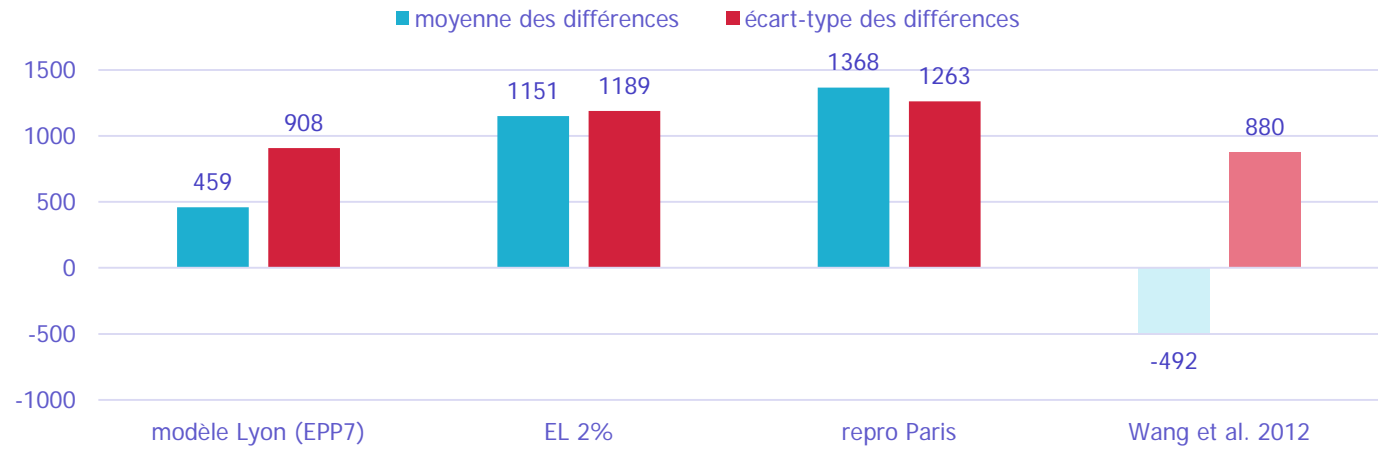
RÉCAP RÉSULTATS DIFFÉRENTS MODÈLES SUR VERTÈBRES MÉTASTASÉES

T5 à L5 avec métastases sans plateau (n=38, 10 donneurs)

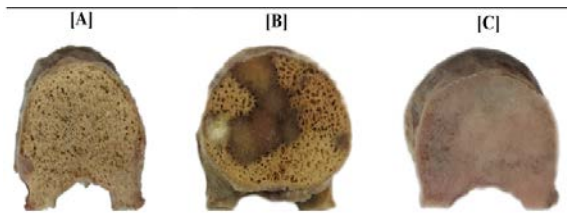
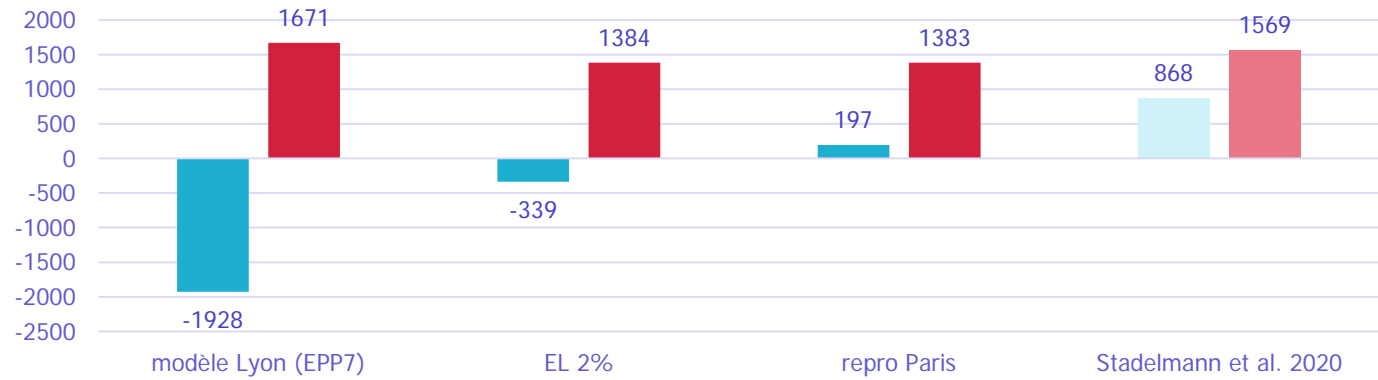




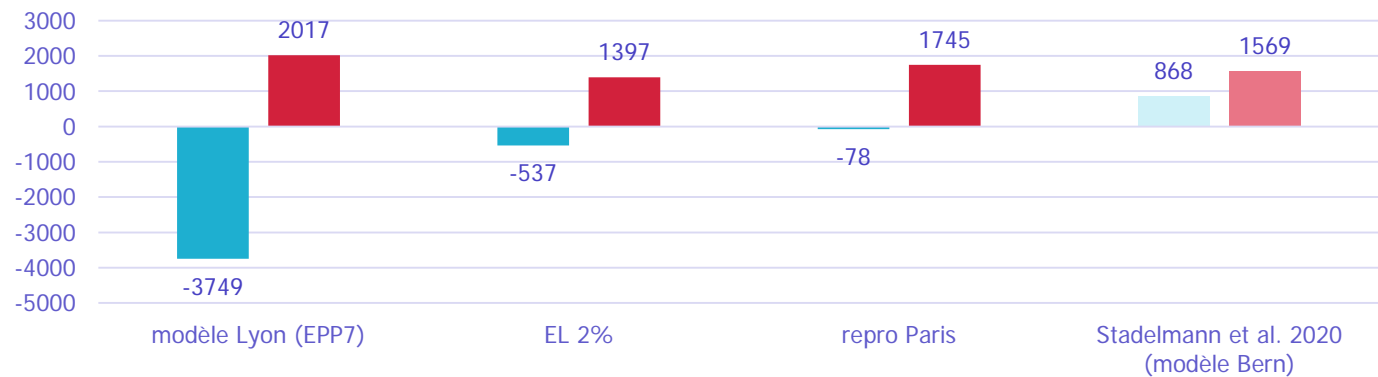
L3 avec plateau sans défaut (n=21)



L1 sans plateau avec défaut (n=11)



T5 à L5 avec métastases sans plateau (n=38, 10 donneurs)



Conclusion



CONCLUSION

Conclusion sur les résultats obtenus

- ❖ La performance des modèles varie en fonction des données expérimentales considérées
- ❖ Importance de la validation croisée

Conclusion personnelle

- ❖ Application de la mécanique à la santé
- ❖ Travail en laboratoire public

MEKANOS PROJECT (2024)

Research



Clinic



David Mitton,
LBMC



H el ene Follet,
LYOS



Fran ois Bermond,
LBMC



Thomas Grenier,
CREATIS



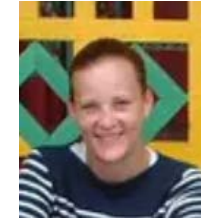
Aur elie Levillain,
LBMC



Cyrille Confavreux,
HCL



Jean-Baptiste Pialat,
HCL



Nad ge Trehet-Mandez,
PMO



Joris Claude
PhD Student



Emile Saillard,
PhD Student



Etienne Massardier,
MD & PhD St



Marc Gardegaront,
LBMC



Justine Berardet
IC-HCL



M elanie Roche,
IC-HCL



Mathilde Proriol,
HCL



Ang lique Stuani,
HCL



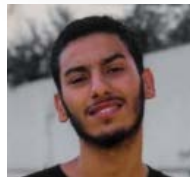
Aur elie Meysen,
Master Student



Jules Guinard,
Master Student



Elise Jourdain,
Master Student



Ibrahim Lamouchi,
Master Student

PIs

F Debiais, A Fontana, B Bouvard, MH Vieillard, K Briot, A Belli re, K Boussouali, M Louvel,

P Chaudier, R Canetti, F Tronc, K Le Bail Carval, P Paparel, L Maillard

C Perrin, E Durieu, M Decaussin

(2023-2024)

Merci pour votre attention

