LE TRAITEMENT DES FRACTURES EN ENVIRONNEMENT HOSTILE: DE L'ESPACE À LA MÉDECINE DE GUERRE... TOUT LE MONDE PEUT-IL LE FAIRE?

Julie Manon, Alexandre Englebert, Olivier Cornu

Service de chirurgie orthopédique et traumatologique, Clin. Univ. St-Luc, Bruxelles

La gestion des fractures osseuses dans un environnement hostile pose des défis majeurs en raison de l'accès limité aux installations médicales et au matériel thérapeutique, mais également aux compétences médicales/chirurgicales.

Le fixateur externe «EZExFix» a été conçu pour permettre aux individus non-chirurgiens de fixer des fractures d'os longs dans de telles conditions, en réduisant la dépendance à l'expertise chirurgicale mais également les coûts de production. Cette étude examine son potentiel d'application dans des situations similaires à une mission habitée sur la planète Mars. Des simulations de chirurgie ont donc été menées par des analogues d'astronautes et comparées aux procédures chirurgicales classiques. Les résultats ont montré que les astronautes étaient suffisamment rapides et assuraient la sécurité du patient. Les réductions translationnelles étaient relativement faciles à obtenir, tandis que les réductions rotationnelles étaient plus complexes. Bien que toutes les réductions n'aient pas été parfaites, la consolidation osseuse était permise.

Les enseignements de la médecine spatiale peuvent contribuer à améliorer les pratiques médicales dans d'autres environnements hostiles sur Terre, tels que les zones de conflit ou les régions à ressources limitées. L'application de l'EZExFix pourrait permettre une intervention médicale rapide et efficace dans des situations critiques, à l'instar d'un kit de défibrillateur cardiaque, réduisant ainsi la dépendance à l'expertise chirurgicale traditionnelle. Avec comme avantages d'être compact et portable, l'EZExFix pourrait être utile dans divers environnements exigeants et constituer une option prometteuse pour les missions spatiales et les situations d'urgence sur Terre, contribuant ainsi à la fois au succès des missions et à la préservation des vies humaines.

INTRODUCTION

Les fractures des os longs représentent des lésions musculo-squelettiques courantes et bien gérées dans les pays développés. Cependant, leur prise en charge peut se révéler bien plus complexe dans des environnements hostiles ou inhabituels (espace, zones de guerre, catastrophes naturelles, pays en voie de développement ou régions dépourvues de ressources médicales). Les méthodes thérapeutiques traditionnelles peuvent s'avérer impossibles à mettre en œuvre, suscitant le besoin d'approches novatrices pour garantir la survie du patient, une guérison adéquate et une récupération fonctionnelle, tout cela avec des ressources matérielles, professionnelles et financières limitées.

Dans l'espace, la microgravité induit une diminution drastique de la densité minérale osseuse (DMO) et une amyotrophie majeure (1-3). L'apesanteur n'exerçant plus de forces mécaniques sur le système musculo-squelettique

OR1464F

Figure 1: L'ensemble de l'équipage 227, de la mission Tharsis, devant la station de la *Mars Desert Research Station* (A). Noms des personnes de l'équipage (et leur poste respectif), de gauche à droite et de haut en bas: Julien Meert (ingénieur), Cheyenne Chamart (biologiste), Cyril Wain (commandant), Julie Manon (médecin), Audrey Comein (scientifique), Sirga Drouet (journaliste), Ignacio Sanchez-Casla (astronome), Jean Jacobs (sous-commandant). Exemple de sortie extravéhiculaire en conditions de simulation, en scaphandre (B). De gauche à droite: Jean Jacobs, Julie Manon, Audrey Comein, Ignacio Sanchez-Casla.



des astronautes, elle induit une dissociation entre la résorption et la formation osseuses, pouvant conduire à un état semblable à l'ostéoporose (1). La perte de DMO a été observée dès les premiers mois d'une mission spatiale et se poursuit en moyenne de 1 à 2,2% par mois d'apesanteur, taux similaire à celui des femmes ménopausées en 1 an sur Terre (2, 4, 5). Elle fragilise majoritairement les os porteurs, qui seront plus sujets aux fractures lors d'un retour dans un environnement gravitationnel, comme le retour sur Terre ou l'atterrissage sur la planète Mars (2, 4, 6, 7).

Une fracture des os longs dans l'espace, associée à l'absence d'expertise chirurgicale, pourrait mettre en danger la santé et/ou la vie de l'astronaute blessé et compromettre la mission entière. Pour répondre à ce problème, nous utilisons un fixateur externe conçu pour être facile à utiliser, baptisé «EZExFix» (8, 9). Ce dispositif a été fabriqué pour être simple, rapide à prendre en main et accessible aux personnes non-chirurgiens, afin de stabiliser des fractures du tibia, l'une des formes les plus courantes de fractures des os longs (10-12). L'objectif de cette étude est d'explorer l'efficacité de l'EZExFix dans des environnements similaires à l'espace, où des astronautes non-chirurgiens pourraient devoir gérer des fractures sans assistance médicale immédiate.

MISSION DE SIMULATION DE VIE SUR LA PLANÈTE MARS

La mission «Tharsis» a été réalisée à la *Mars Desert Research Station*, une station créée par la *Mars Society* dans le désert de l'Utah (États-Unis) pour ses similitudes géologiques avec la planète Mars (13). Huit astronautes analogues ont passé 2 semaines, entre mars et avril 2022, enfermés dans cet habitat de 8 mètres de diamètre en conditions de simulation parfaite de vie martienne. Celles-ci incluaient notamment la gestion hydrique et nutritive, les sorties extravéhiculaires en scaphandre, l'isolement et l'absence de toute communication extérieure (**Figure 1**). Chaque membre de l'équipage 227 avait un poste et un rôle bien définis dans la mission, et chacun avait également une expérience scientifique à réaliser durant la mission pour améliorer la recherche spatiale et la possibilité de voir un jour des habitants humains sur la planète Mars.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Six des 8 astronautes analogues ont participé à cette étude et ont été répartis en 3 groupes en fonction de leurs antécédents éducatifs. Le 1er groupe avait des connaissances de base en anatomie (études médicales ou biomédicales mais pas en chirurgie), le 2e avait des connaissances en mécanique, stabilité, forces et contraintes (diplôme en génie civil) et le 3e n'avait aucune connaissance préalable en anatomie ou en mécanique. Les astronautes ont tous suivi un cours théorique d'une heure sur les indications, les repères anatomiques et les étapes de fixation de l'EZExFix, suivi d'une démonstration pratique. Chaque astronaute a réalisé ensuite 8 chirurgies, 4 fois en tant qu'opérateur plaçant l'EZExFix sur une jambe artificielle cassée et 4 fois en tant qu'assistant maintenant la réduction de la fracture (**Figure 2**). Chaque chirurgie était divisée en 4 étapes bien spécifiques pour permettre une comparaison homogène: la construction du cadre de l'EZExFix, son positionnement par rapport à la jambe, la fixation proximale et la réduction



Figure 2: Exemple d'une jambe artificielle cassée et fixée (A) à l'aide d'un EZExFix par un groupe de 2 astronautes analogues (B). Toutes les fractures étaient des fractures obliques médio-diaphysaires du tibia entourées par une reconstitution des tissus mous aux alentours et montées sur un pied prothétique pour indiquer l'axe de la jambe.

de la fracture associée à la fixation distale de la jambe. Un chirurgien orthopédique et traumatologue expérimenté a effectué la même chirurgie 3 fois pour servir de référence.

Un système d'intelligence artificielle «Rombio» a été utilisé pour planifier les essais et optimiser les décisions en temps réel (14).

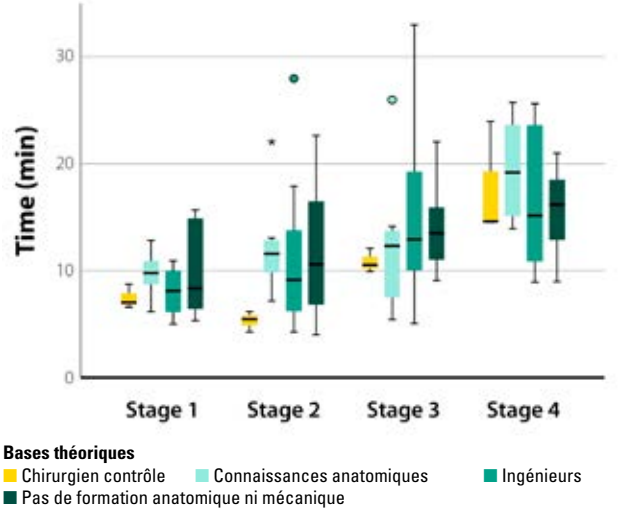
Beaucoup de paramètres différents ont été évalués, comme le temps, le respect de la sécurité du patient via les zones de sécurité, les déplacements résiduels et le contact osseux après fixation, ainsi que la courbe d'apprentissage subjective des astronautes.

RÉSULTATS

Les astronautes analogues ont réussi à réaliser leurs 4 chirurgies en tant qu'opérateur jusqu'au bout, en respectant les 4 étapes principales. 65,2% d'entre eux ont réussi à stabiliser les fractures en respectant tous les critères de réussite de la procédure chirurgicale, à savoir la construction de l'EZExFix, l'absence de compression cutanée, le respect d'incisions centimétriques, le respect de l'ordre d'insertion des broches ainsi que leur nombre et la stabilité du montage (15). Seulement 2 chirurgies sur 24 manquaient de stabilité en post-opératoire. La sécurité du patient a été parfaitement respectée dans 21 cas sur 24. Seulement 2 broches se sont retrouvées dans le trait fracturaire, ce qui pourrait altérer la consolidation.

Au point de vue du temps, aucune différence significative n'a été retrouvée entre le chirurgien contrôle et les astronautes ($p > 0,05$), ni même en les séparant entre les différents groupes de connaissances théoriques (**Figure 3**). En moyenne, l'étape la plus longue des astronautes était la dernière, qui est également la plus importante: celle de la réduction de la fracture et de sa fixation distale. Cette 4e étape était significativement plus longue que la 1ère,

Figure 3: Temps (minutes) pris par les astronautes analogues en fonction de chaque étape de la chirurgie et de leurs bases théoriques, comparé à celui du chirurgien contrôle. Étape 1 *(Stage 1):* construction de l'EZExFix; étape 2 *(Stage 2):* positionnement du montage par rapport à la jambe; étape 3 *(Stage 3):* fixation proximale de l'EZExFix; étape 4 *(Stage 4):* réduction de la fracture et fixation distale.



la construction de l'EZExFix ($p < 0,001$) et que la 2e, l'ajustement du montage par rapport à la jambe ($p = 0,018$). Cela se justifie car la réduction est aussi une étape majeure de la réussite et de la qualité du traitement.

Les déplacements translationnels ont tous été récupérés sous les seuils pathologiques, à l'instar du chirurgien contrôle. Cependant, concernant les déplacements rotationnels, les astronautes obtenaient en moyenne un recurvatum pathologique (> -10° d'amplitude) et une rotation interne significativement différente de la faible rotation externe moyenne appliquée par le chirurgien ($p = 0,008$) (**Tableau 1**).

Le pourcentage de contact cortical circonférentiel (< 1,5mm entre les 2 fragments osseux), lui, en revanche, était parfaitement identique entre les astronautes (10,16%) et le chirurgien contrôle (10,89%), suggérant un potentiel de guérison similaire.

L'évaluation subjective révèle que les astronautes utilisent l'EZExFix avec confiance dans des conditions réelles. Leur perception de l'utilité a toujours été optimale. Seuls l'adaptabilité, l'utilisation intuitive et le côté haptique semblent des dimensions moins importantes pour eux.

DISCUSSION ET CONCLUSION

En conclusion, cette étude explore l'efficacité de l'EZExFix, un dispositif externe développé pour stabiliser les fractures du tibia dans des environnements hostiles tels que l'espace. L'utilisation d'un fixateur externe présente des avantages significatifs, notamment la préservation de l'hématome fracturaire, la gestion des tissus mous, une approche mini-invasive, ainsi qu'un moindre risque de saignement et d'infection (6, 15, 16); elle est en outre assez courante. En effet, plus de 21% des interventions chirurgicales menées par Médecins Sans Frontières concernent des interventions orthopédiques, y compris la pose de fixateurs externes (17). Une procédure correctement exécutée peut permettre un appui immédiat sur la jambe fracturée, élément crucial pour le succès des missions spatiales, l'autonomie des soldats et la récupération fonctionnelle rapide dans les pays en voie de développement. Toutefois, l'un des principaux défis réside dans la disponibilité limitée de chirurgiens formés pour poser ce fixateur. Ainsi, la formation de personnel non chirurgical, comme des astronautes, pourrait être essentielle pour la gestion autonome et rapide de fractures dans des situations d'urgence, afin d'obtenir des résultats médicaux satisfaisants dans les plus brefs délais.

Les résultats de la mission de simulation sur la planète Mars ont montré que les astronautes analogues, avec des antécédents éducatifs variés, ont pu utiliser l'EZExFix avec succès pour stabiliser les fractures tibiales, en respectant les critères de sécurité et en assurant la stabilité du montage dans la majorité des cas. Bien que certaines étapes aient été plus longues que d'autres, le temps pour la fixation était similaire à celle du contrôle chirurgical. La perception subjective des astronautes au sujet de l'utilisation de l'EZExFix était optimale, ce qui suggère qu'ils pourraient l'utiliser en toute confiance dans des situations réelles. Ces résultats encourageants indiquent que cet outil pourrait être une solution efficace pour traiter les fractures des os longs dans des environnements extrêmes où l'assistance médicale immédiate n'est pas disponible.

PERSPECTIVES

L'étude des «fractures dans l'espace» ne s'arrête pas là. En effet, un os ostéoporotique étant plus fragile, il nécessite parfois une énergie plus faible pour le briser sans pour autant mener à des fractures plus simples. Au contraire, les fractures sont parfois plus complexes (ouvertes, comminutives, déplacées,...) malgré la faible énergie à la rupture. Le traitement doit donc également être adapté en fonction de la complexité de la fracture, à l'instar des traitements scientifiquement validés sur Terre. Mais les fractures seraient-elles réellement plus complexes dans l'espace, à l'instar des fractures ostéoporotiques sur Terre? C'est la question à laquelle nous tenterons de répondre avec des expériences en impesanteur. La société LIDE.space (https://lide.space/) permet de réaliser des vols en planeur en microgravité dans lesquels nous pourrons tester un banc d'essai mis au point par le Docteur Alexandre Englebert,

Tableau 1: Résumé des différents déplacements résiduels moyens des astronautes analogues, comparés à ceux du chirurgien contrôle (moyenne [+/- erreur standard de la moyenne]).

	Astronautes analogues	Chirurgien contrôle	p
Translation antérieure (+)/ postérieure (-)	-1,05 (+/- 1,97) mm	-1,32 (+/-3,75) mm	0,763
Translation latérale (+)/ médiale (-)	3,25 (+/- 3,12) mm	0,42 (+/- 2,91) mm	0,166
Raccourcissement (+)/ allongement (-)	-3,09 (+/- 3,89) mm	-3,62 (+/- 4,21) mm	0,966
Varus (+)/valgus (-)	4,30 (+/- 3,87)°	3,34 (+/- 3,87)°	0,698
Flexum (+)/recurvatum (-)	-12,28 (+/- 11,48)°	-1,23 (+/- 7,39)°	0,094
Rotation externe (+)/interne (-)	-9,86 (+/- 8,08)°	2,92 (+/- 4,18)°	0,008

Figure 4: Tests préliminaires en vols paraboliques réalisés au printemps 2023. De gauche à droite: Sébastien Serruys (ingénieur activités de vol, LIDE. space), Manu Litt (chef pilote du Centre National de Vol à Voile, Saint-Hubert), Julie Manon (partie médicale du projet «fracture dans l'espace», UCLouvain), Alexandre Englebert (partie génie civil et biomédical du projet « racture dans l'espace», UCLouvain).



permettant de fracturer des os longs et de pouvoir comparer le degré de complexité de la fracture en fonction du statut de pesanteur et de porosité de l'os (**Figure 4**). Ces expériences pourraient également bénéficier d'un futur vol suborbital garantissant plusieurs minutes de microgravité pour tenter de répondre à ces questions.

Références

1. Lau P, Vico L, Rittweger J. Dissociation of bone resorption and formation in spaceflight and simulated microgravity: potential role of myokines and osteokines? Biomedicines 2022;10(2):342.
2. John R. Ball, Charles H. Evans Jr. Safe passage: astronaut care for exploration missions. National Academies Press; 2001.
3. Sibonga JD, Spector ER, Johnston SL, Tarver WJ. Evaluating bone loss in ISS astronauts. Aerospace Medicine and Human Performance 2015;86(12):38-44.
4. Orwoll ES, Adler RA, Amin S, et al. Skeletal health in long-duration astronauts: Nature, assessment, and management recommendations from the NASA bone summit: skeletal health in long-duration astronauts. J Bone Miner Res 2013;28(6):1243-55.
5. Ahlborg HG, Johnell O, Turner CH, Rannevik G, Karlsson MK. Bone loss and bone size after menopause. N Engl J Med 2003;349(4):327-34.
6. Swaffield TP, Neviaser AS, Lehnhardt K. Fracture risk in spaceflight and potential treatment options. Aerospace Medicine and Human Performance 2018;89(12):1060-7.
7. Sibonga J. Risk of bone fracture due to spaceflight-induced changes to bone. Human Health Countermeasures (HHC) [Internet]. 21 déc 2022 [cité 12 janv 2023]; Disponible sur: https://humanresearchroadmap.nasa.gov/risks/risk.aspx?i=77#
8. Kouassi KJE, Akobé JR, Kouassi AA, et al. Locally developed external fixators as definitive treatment of open tibia diaphyseal fractures: a clinical prospective study conducted in Ivory Coast. International Orthopaedics (SICOT) 2022;46(1):79-87.
9. Kouassi KJE, Cartiaux O, Fonkoué L, Detrembleur C, Cornu O. Biomechanical study of a low-cost external fixator for diaphyseal fractures of long bones. J Orthop Surg Res 2020;15(1):247.
10. Manon J, Detrembleur C, Van de Veyver S, Tribak K, Cornu O, Putineanu D. Predictors of mechanical complications after intramedullary nailing of tibial fractures. Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research 2019;105(3):523-7.
11. Tzioupis C, Giannoudis PV. Prevalence of long-bone non-unions. Injury 2007;38:S3-9.
12. Manon J, Detrembleur C, Van de Veyver S, Tribak K, Cornu O, Putineanu D. Quels sont les facteurs prédictifs d'une complication mécanique après enclouage centromédullaire d'une fracture diaphysaire du tibia? Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique 2019;105(3):353-7.
13. Manon J, Pletser V, Saint-Guillain M, et al. An easy-to-use external fixator for all hostile environments, from space to war medicine: is it meant for everyone's hands? JCM 2023;12(14):4764.
14. Saint-Guillain M, Vanderdonckt J, Burny N, et al. Enabling astronaut self-scheduling using a robust advanced modelling and scheduling system: An assessment during a Mars analogue mission. Advances in Space Research [Internet]. 5 avr 2023 [cité 17 avr 2023]; Disponible sur: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117723002466
15. Manon J, Saint-Guillain M, Pletser V, et al. Adequacy of in-mission training to treat tibial shaft fractures in Mars analog testing. 2023; Available online: https://www.researchsquare.com/article/rs-2967843/v1 (accessed on the 25th of June 2023).
16. Kirkpatrick AW, Ball CG, Campbell M, et al. Severe traumatic injury during long duration spaceflight: Light years beyond ATLS. J Trauma Manage Outcomes 2009;3(1):4.
17. Bertol MJ, Van den Bergh R, Trelles Centurion M, et al. Saving life and limb: limb salvage using external fixation, a multi-centre review of orthopaedic surgical activities in Médecins Sans Frontières. International Orthopaedics (SICOT) 2014;38(8):1555-61.