

BEHANDELING VAN FRACTUREN IN EEN VIJANDIGE OMGEVING: VAN DE RUIMTE NAAR OORLOGSGENEESKUNDE... KAN IEDEREEN DAT?

Julie Manon, Alexandre Englebert, Olivier Cornu

Dienst orthopedische en traumatologische chirurgie, Clin. Univ. St-Luc, Brussel

De behandeling van botbreuken in een vijandige omgeving is een hele uitdaging, wegens beperkingen qua medische installaties, therapeutisch materiaal en medische/chirurgische competenties.

De externe fixator 'EZExFix' is ontwikkeld om mensen zonder chirurgische achtergrond de mogelijkheid te bieden een fractuur van lange beenderen in moeilijke omstandigheden te fixeren. Daardoor vermindert de afhankelijkheid van chirurgische expertise en dalen ook de productiekosten. In deze studie werden de mogelijke toepassingen ervan onderzocht in situaties die vergelijkbaar zijn met een missie naar de planeet Mars. Simulaties van chirurgie werden uitgevoerd door analoge astronauten en vergeleken met de klassieke chirurgische procedures. De astronauten bleken voldoende snel te zijn en veilig te werken. Een translationele reductie bleek vrij eenvoudig te zijn, maar een rotationele reductie was complexer. Hoewel niet alle reducties perfect waren, konden de fracturen goed worden geconsolideerd.

Informatie uit de ruimtogeneeskunde kan helpen de medische praktijken in vijandige omgevingen op aarde te verbeteren zoals in conflictzones of gebieden met beperkte inkomsten. Met de EZExFix is een snelle en doeltreffende medische interventie mogelijk in kritieke situaties, net zoals een defibrillatorkit, waardoor de afhankelijkheid van klassieke chirurgische expertise vermindert. De compacte en draagbare EZExFix kan nuttig zijn in allerlei moeilijke omgevingen en zou een veelbelovende optie kunnen zijn voor ruimtereizen en urgenties op aarde. Dat zou bijdragen tot het welslagen van missies en het redden van mensenlevens.

INLEIDING

Fracturen van de lange beenderen zijn frequent en worden in ontwikkelde landen goed behandeld. In een vijandige of ongewone omgeving (ruimte, oorlogsgebied, natuurramp, ontwikkelingslanden en regio's zonder medische middelen) kan dat echter heel wat complexer zijn. Zo is het mogelijk dat de klassieke behandelingen niet kunnen worden uitgevoerd. In dat geval is er behoefte aan vernieuwende interventies om het leven van de patiënt te redden en een

goede genezing en goed functioneel herstel te verkrijgen met beperkte middelen (materiaal, mankracht en geld).

In de ruimte leidt de gewichtsloosheid tot een drastische daling van de botdichtheid en een belangrijke spieratrofie (1-3). Er worden dan geen mechanische krachten uitgeoefend op het musculoskeletale systeem van astronauten, waardoor de botresorptie en de botaanmaak ontkoppeld geraken, wat kan leiden tot een toestand die lijkt op osteoporose (1). Al na enkele maanden daalt de botdichtheid

Figuur 1: Team 227 van de Tharsis-missie voor het *Mars Desert Research Station* (A). Naam en functie van de teamleden: van links naar rechts en van boven naar beneden: Julien Meert (ingenieur), Cheyenne Chamart (biologe), Cyril Wain (commandant), Julie Manon (arts), Audrey Comein (wetenschapper), Sirga Drouet (journaliste), Ignacio Sanchez-Casla (astronoom), Jean Jacobs (ondercommandant). Voorbeeld van een gesimuleerde excursie in ruimtepak (B). Van links naar rechts: Jean Jacobs, Julie Manon, Audrey Comein, Ignacio Sanchez-Casla.



bij een ruimtereis. Per maand gewichtsloosheid daalt die verder met gemiddeld 1-2,2%, d.w.z. evenveel als bij gemenopauzeerde vrouwen in 1 jaar op aarde (2, 4, 5). Daarbij worden vooral de dragende beenderen getroffen. Die zullen dan ook gemakkelijker breken bij terugkeer in een omgeving met zwaartekracht zoals bij terugkeer naar de aarde of landing op de planeet Mars (2, 4, 6, 7).

Zonder chirurgische expertise zou een fractuur van lange beenderen in de ruimte de gezondheid en/of het leven van de astronaut in gevaar kunnen brengen en zo de hele missie in het gedrang kunnen brengen. Om dat probleem op te vangen, gebruiken we een externe fixator, die erg gebruiksvriendelijk is, de 'EZExFix' genoemd (8, 9). Het is een eenvoudig toestel, dat ook mensen die geen chirurgische achtergrond hebben snel kunnen leren gebruiken om een fractuur van het scheenbeen, een van de vaakst voorkomende fracturen van de lange beenderen, te stabiliseren (10-12). In deze studie werd het nut van de EZExFix onderzocht in situaties die vergelijkbaar zijn met de ruimte, waarin het kan gebeuren dat astronauten zonder chirurgische opleiding fracturen moeten behandelen zonder onmiddellijke medische hulp.

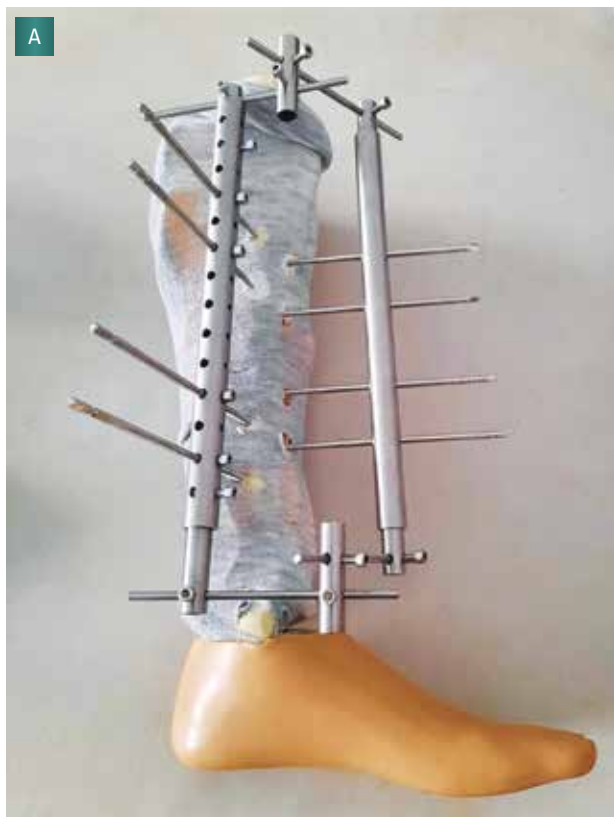
SIMULATIE VAN HET LEVEN OP DE PLANEET MARS

Het *Mars Desert Research Station* is een faciliteit die de Mars Society heeft gecreëerd in de woestijn van Utah (USA), aangezien die geologische gelijkenissen vertoont met de planeet Mars. Daarin werd de Tharsis-missie uitgevoerd (13): acht analoge astronauten hebben tussen maart en april 2022 twee weken doorgebracht in dat gesloten

leefgebied met een diameter van acht meter in omstandigheden die het leven op Mars nabootsen, waaronder het beheren van water en voedsel, excursies in een ruimtepak, isolatie en geen enkele communicatie met de buitenwereld (**Figuur 1**). Elk lid van team 227 had een specifieke rol en functie en diende tijdens de missie wetenschappelijke experimenten uit te voeren om het ruimteonderzoek te verbeteren, in de hoop ooit mensen op Mars te laten wonen.

MATERIAAL EN METHODE

Zes van de acht analoge astronauten hebben deelgenomen aan deze studie. Ze werden in drie groepen ingedeeld naargelang hun kennisniveau: groep 1 had een basiskennis anatomie (studies geneeskunde of biomedische wetenschappen, maar geen opleiding chirurgie); groep 2 had kennis van mechanica, stabiliteit, krachten en belasting (diploma burgerlijk ingenieur) en groep 3 had geen kennis van anatomie of mechanica. Alle astronauten hebben een theoretische cursus van een uur gevolgd over de indicaties, de anatomische referentiepunten en de werking van EZExFix gevolgd door een praktische demonstratie. Elke astronaut heeft vervolgens acht operaties uitgevoerd: vier operaties waarbij de EZExFix op een gebroken kunstbeen moest worden aangebracht en vier als assistent om de fracturreductie te behouden (**Figuur 2**). Elke operatie werd in vier stappen opgesplitst om een homogene vergelijking te kunnen maken: montage van het kader van de EZExFix, plaatsing ervan op het been, proximale fixatie en reductie van de fractuur plus distale fixatie van het been. Een ervaren orthopedisch chirurg heeft ter referentie dezelfde operatie drie keer uitgevoerd.



Figuur 2: Voorbeeld van een gebroken kunstbeen gefixeerd (A) met een EZExFix door een groep van twee analoge astronauten (B). Het betrof altijd een schuine fractuur door het midden van de diafyse van de tibia met nagemaakte weefsels gemonteerd op een prothetische voet om de as van het been aan te geven.



Om de tests in te plannen en de beslissingen in real time te optimaliseren werd Rombio, een systeem van artificiële intelligentie, gebruikt (14).

De volgende parameters werden geëvalueerd: de tijd, de veiligheid van de patiënt via veiligheidszones, de residuele verplaatsing, het botcontact na fixatie en de leercurve volgens de astronauten.

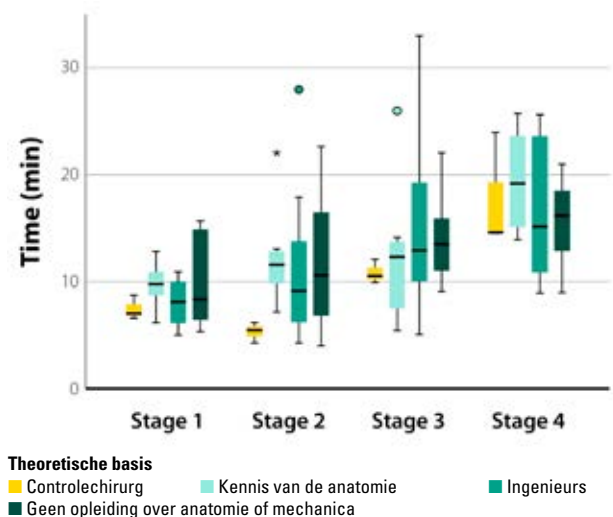
RESULTATEN

De analoge astronauten zijn erin geslaagd hun vier operaties zelf tot op het einde uit te voeren met naleving van de belangrijkste vier stappen. Er slaagde 65,2% erin de fractuur te stabiliseren conform de criteria van welslagen van de operatie, zijnde de montage van de EZExFix, geen huidcompressie, incisie van hoogstens 1 cm, correcte volgorde van inbrengen van de haken, het aantal haken en de stabiliteit van de constructie (15). Slechts bij 2 van de 24 operaties was de breuk na operatie onvoldoende stabiel. In 21 van de 24 gevallen werd de veiligheid van de patiënt perfect gerespecteerd. Slechts 2 haken bleken in de fractuurlijn te zitten, wat de genezing zou kunnen bemoeilijken. Er werd geen verschil in duur van de operatie vastgesteld tussen de controlechirurg en de analoge astronauten ($p > 0,05$) en evenmin tussen de controlechirurg en de verschillende groepen (Figuur 3). De stap die het langst duurde, was meestal de laatste, tevens de belangrijkste: reductie van de fractuur en distale fixatie. Die vierde stap duurde

significant langer dan de eerste (montage van de EZExFix [$p < 0,001$]) en de tweede (plaatsing van de EZExFix op het been [$p = 0,018$]). Dat is goed, want reductie is een belangrijk element bij het welslagen en de kwaliteit van de behandeling.

Een translationele verplaatsing werd altijd teruggebracht tot onder de pathologische drempels zoals wanneer de

Figuur 3: Tijd (minuten) die de analoge astronauten nodig hadden voor elke stap van de operatie en volgens hun theoretische basis in vergelijking met die van de controlechirurg. Stap 1 (Stage 1): montage van de EZExFix; stap 2 (Stage 2): plaatsing van de EZExFix op het been; stap 3 (Stage 3): proximale fixatie van de EZExFix en stap 4 (Stage 4): reductie van de fractuur en distale fixatie.



operatie werd uitgevoerd door de controlechirurg. Bij een rotationele verplaatsing eindigden de analoge astronauten gemiddeld met een pathologisch recurvatum ($> -10^\circ$ amplitudo) en een endorotatie die significant verschilde van de gemiddeld lichte exorotatie in handen van de chirurg ($p = 0,008$) (**Tabel 1**).

Er was geen verschil in het percentage circumferentieel corticaal contact ($< 1,5$ mm tussen de twee botfragmenten) tussen de analoge astronauten (10,16%) en de controlechirurg (10,89%). De genezing zou dan ook vergelijkbaar moeten zijn.

De astronauten vonden van zichzelf dat ze de EZExFix goed zouden gebruiken in reële omstandigheden. Ze vonden heel het proces van de EZExFix nuttig. De aanpasbaarheid, een intuïtief gebruik en de haptische kant vonden ze minder belangrijk.

DISCUSSIE EN CONCLUSIE

In deze studie werd de werkzaamheid van de EZExFix onderzocht, een extern instrument voor stabilisering van een tibiafractuur in een vijandige omgeving zoals de ruimte. Het gebruik van een externe fixator heeft enkele belangrijke voordelen: behoud van het hematoom in de breuk, aanpak van de weke delen, een mini-invasieve ingreep en een lager risico op bloeding en infectie (6, 15, 16). Het is een instrument dat vrij vaak moet worden gebruikt. Meer dan 21% van de chirurgische interventies door Artsen Zonder Grenzen zijn orthopedische ingrepen, waaronder plaatsing van een externe fixator (17). Als de procedure correct wordt uitgevoerd, kan de patiënt onmiddellijk op het gebroken been steunen. Dat is van het allergrootste belang voor het wel-slagen van ruimtemissies, de autonomie van soldaten en een snel functioneel herstel in ontwikkelingslanden. Eén van de belangrijkste uitdagingen is evenwel de beperkte beschikbaarheid van chirurgen die hebben geleerd hoe ze zo'n fixator moeten plaatsen. Opleiding van niet-chirurgisch personeel zoals astronauten zou dan ook essentieel kunnen

zijn voor een autonome en snelle behandeling van fracturen in noodsituaties, om zo snel mogelijk een bevredigend medisch resultaat te verkrijgen.

Uit de resultaten van de gesimuleerde Marsmissie blijkt dat analoge astronauten met een diverse theoretische basis de EZExFix meestal met succes kunnen gebruiken om een tibiafractuur veilig en stevig te stabiliseren. Voor sommige stappen hadden ze meer tijd nodig dan voor andere, maar de fixatietijd was al bij al vergelijkbaar met de fixatietijd als het toestel werd geplaatst door de controlechirurg. De astronauten waren erg tevreden over het gebruik van de EZExFix. Dat wijst erop dat ze die in alle vertrouwen zouden kunnen gebruiken in reële situaties. De EZExFix kan dus een doeltreffende oplossing zijn voor de behandeling van fracturen van lange beenderen in extreme omgevingen, als er geen onmiddellijke medische hulp beschikbaar is.

PERSPECTIEVEN

Het onderzoek 'fracturen in de ruimte' stopt daar echter niet. Osteoporotisch bot zal gemakkelijker breken, maar de fractuur is daarom nog niet eenvoudiger. Integendeel, die fracturen zijn soms complexer (open, comminutieve, verplaatste,... fracturen) ondanks de geringe energie die de fractuur heeft veroorzaakt. De behandeling moet dus ook worden aangepast aan de complexiteit van de fractuur zoals de wetenschappelijk bewezen behandelingen op aarde. Maar zouden fracturen in de ruimte echt complexer zijn, zoals osteoporotische fracturen op aarde? Die vraag proberen we te beantwoorden in experimenten van gewichtsloosheid. De firma LIDE.space (<https://lide.space/>) voert zweefvluchten met microzwaartekracht uit, waarin we een door dr. Alexandre Englebert ontwikkelde proefbank kunnen testen. Met die proefbank kunnen we lange beenderen breken en de mate van complexiteit van de fractuur evalueren, in functie van de zwaartekracht en de porositeit van het bot (**Figuur 4**). Om die vragen te beantwoorden, zouden we die tests ook kunnen herhalen tijdens een suborbitale vlucht met gegarandeerd meerdere minuten van microzwaartekracht.

Tabel 1: Samenvatting van de verschillende gemiddelde residuele verplaatsingen van analoge astronauten in vergelijking met die van een controlechirurg (gemiddelde $\pm$ SEM).

	Analoge astronauten	Controlechirurg	p
Voor- (+)/achterwaartse (-) translatie	-1,05 (+/- 1,97) mm	-1,32 (+/- 3,75) mm	0,763
Laterale (+)/mediale translatie (-)	3,25 (+/- 3,12) mm	0,42 (+/- 2,91) mm	0,166
Verkorting (+)/verlenging (-)	-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
Exo- (+)/endorotatie (-)	-9,86 (+/- 8,08)°	2,92 (+/- 4,18)°	0,008

Figuur 4: Preliminare tests tijdens een paraboolvlucht uitgevoerd in de lente van 2023. Van links naar rechts: Sébastien Serruys (ingenieur vluchtactiviteiten, LIDE.space), Manu Litt (hoofdpiloot van het *Centre National de Vol à Voile*, Saint-Hubert), Julie Manon (medische aspecten van het project 'fractuur in de ruimte', UCLouvain), Alexandre Englebert (civiele en biomedische technologie van het project 'fractuur in de ruimte', UCLouvain).



Referenties

1. Lau P, Vico L, Rittweger J. Dissociation of bone resorption and formation in spaceflight and simulated microgravity: potential role of myokines and osteokines? *Biomedicine* 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. *Aerosp Med Hum Perform* 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. *Aerosp Med Hum Perform* 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. *Orthop Traumatol Surg Res* 2019;105(3):523-7.
11. Tzioupis C, Giannoudis PV. Prevalence of long-bone non-unions. *Injury* 2007;38:53-9.
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? *J Clin Med* 2023;12(14):4764.
14. Saint-Guillain M, Vanderdonck 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. *Int Orthop* 2014;38(8):1555-61.