



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2022

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Voyages extra-orbitaires : vers une trousse de radiologie
interventionnelle**

Présentée et soutenue publiquement le 12 septembre 2022 à 16h00
au Pôle Recherche
par **Guillaume BRAYE**

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Jean-Pierre PRUVO

Assesseurs :

Madame le Professeur Vania TACHER

Monsieur le Docteur Matthieu KOMOROWSKI

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur Benjamin LONGERE

Avertissement

**La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises
dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.**

Acronymes :

ASP : Abdomen Sans Préparation

CAMDASS : Computer Assisted Medical Diagnosis and Surgery System

CMRS : Crew Medical Restraint System

CNES : Centre National d'Études Spatiales

CRF : Capacité Résiduelle Fonctionnelle

ECG : Electrocardiogramme

ESA : European Space Agency

FEVG : Fraction d'Éjection du Ventricule Gauche

FORS : Fiber Optic RealShape

HALS : Hand Assist Laparoscopic Surgery

ISS : International Space Station

JFR : Journées Francophones de Radiologie

KDIGO : Kidney Disease Improval Global Outcomes

MANOLIM : Mars is not a limit

PAM : Pression Artérielle Moyenne

RI : Radiologie interventionnelle

SANS : Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome

SFR : Société Française de Radiologie

Table des matières

RÉSUMÉ ET MOTS CLEFS.....	7
I. INTRODUCTION.....	9
A. La physiologie humaine dans l'espace.....	9
a. <i>Système cardio-vasculaire</i>	9
b. Système respiratoire.....	12
c. Système neurosensoriel.....	12
d. Système musculo-squelettique.....	15
e. Système génito-urinaire.....	17
f. Système digestif.....	17
g. Système immunitaire.....	18
B. Intérêts de la radiologie interventionnelle dans l'espace.....	19
a. Membres de l'équipage.....	19
b. Les problématiques de la chirurgie en micropesanteur.....	20
c. La solution « radiologie interventionnelle ».....	24
C. Le challenge MITBO.....	26
II. RÉALISATION DU CHALLENGE.....	28
A. La méthode BONO.....	28
B. Présentation de l'équipe.....	30
C. Trousse à outils.....	31
a. Le drainage radiologique.....	31
b. Système d'aspiration.....	33
c. Contenant de la trousse.....	33
d. Contenu de la trousse.....	34
III. PROCÉDURES OBLIGATOIRES.....	36
A. Épanchement pleural.....	36
a. Rappels anatomiques.....	36
b. Diagnostic.....	37
c. Drainage.....	38
d. Description détaillée du geste.....	40
B. Pneumothorax.....	42

a. Rappels anatomiques.....	42
b. Diagnostic.....	42
c. Drainage.....	45
d. Description détaillée du geste.....	46
C. Tamponnade cardiaque.....	47
a. Rappels anatomiques.....	47
b. Diagnostic.....	48
c. Drainage.....	49
d. Description détaillée du geste.....	50
D. Cholécystite.....	51
a. Rappels anatomiques.....	51
b. Diagnostic.....	52
c. Drainage.....	53
d. Description détaillée du geste.....	55
E. Abscès abdominal.....	57
F. Ascite.....	58
a. Rappels anatomiques.....	58
b. Diagnostic.....	59
c. Drainage.....	61
d. Description détaillée du geste.....	62
G. Colique néphrétique.....	63
a. Rappels anatomiques.....	63
b. Diagnostic.....	64
c. Drainage.....	65
d. Description détaillée du geste.....	66
H. Abscès pelvien.....	68
I. Rétention urinaire non sondable.....	68
a. Rappels anatomiques.....	68
b. Diagnostic.....	69
c. Drainage.....	69
d. Description détaillée du geste.....	69
J. Hématome.....	70
a. Rappels anatomiques et diagnostic.....	70

b. Drainage.....	73
c. Description détaillée du geste.....	73
IV. PROCÉDURES EN CONDITIONS SPÉCIFIQUES.....	75
A. Insuffisance rénale aiguë.....	75
a. Physiopathologie.....	75
b. Diagnostic.....	76
c. Rôle de la radiologie interventionnelle.....	76
c. Description détaillée du geste.....	79
B. Occlusion intestinale.....	80
a. Rappels physiopathologiques.....	80
b. Diagnostic.....	81
c. Rôle de la radiologie interventionnelle.....	82
d. Description détaillée du geste.....	83
C. Hématomes intra-crâniens.....	84
a. Rappels anatomiques.....	84
b. Diagnostic.....	85
c. Place de la radiologie interventionnelle.....	86
D. Ponction lombaire.....	87
E. Blocs nerveux périphériques.....	88
V. INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES.....	90
A. IV Fluid Generation.....	90
B. Système CAMDASS et imagerie pré-mission.....	91
a. Imagerie avant le départ.....	91
b. Système CAMDASS.....	92
C. Systèmes de guidage pour procédures endovasculaire.....	93
a. Présentation du concept.....	93
b. Développement potentiel.....	95
VI. DISCUSSION.....	97
VII. CONCLUSION.....	100
VIII. BIBLIOGRAPHIE.....	102

RÉSUMÉ ET MOTS CLEFS

« *Je voudrais mourir sur Mars, mais pas à l'impact* », (Elon Musk, Conférence D11 : All Things Digital, Rancho Palos Verdes, CA, Etats-Unis, 2013).

Cette phrase d'accroche en dit long sur notre époque et ses défis. La conquête spatiale, et plus particulièrement les voyages astraux lointains, ne sont plus une fiction. Les astronautes du monde entier se préparent depuis de nombreuses années à des missions plus longues et plus lointaines, avec en ligne de mire, la planète Mars.

Au cours de ces voyages, le personnel navigant devra gérer en totale autonomie les problématiques médicales. En effet, les astronautes en place au sein de l'*International Space Station* (ISS) peuvent, en cas de problème, redescendre rapidement sur Terre et être pris en charge au sein de nos hôpitaux en moins de 24 heures. La situation serait tout autre au cours des voyages extra-orbitaux, qui ont lieu au-delà de la zone d'attraction terrestre à environ 2,5 fois la distance entre la Terre et la Lune.

La communication avec la Terre sera particulièrement lente au cours du trajet. Selon l'Agence Spatiale Canadienne, un message émis par un équipage en transit entre la Terre et Mars mettra entre 15 et 30 minutes, selon l'avancement du voyage, pour parvenir à la Terre, la réponse mettant ensuite la même durée pour leur parvenir, et ceci sans tenir compte d'éventuels problèmes de transmission.

La radiologie interventionnelle répond à cette incapacité d'interaction rapide avec la Terre et à l'impossibilité de réalisation d'une chirurgie lourde. C'est pourquoi le ou les médecins qui embarqueront pour ce périple devront maîtriser, non seulement des actes de petite chirurgie et de dentisterie, mais également bon nombre d'actes de radiologie interventionnelle.

Lors de la mission vers Mars, où le volume total de matériel médical pour 6 personnes est estimé, de manière prévisionnelle, à 700 kg environ, chaque gramme compte. A l'aide d'un matériel limité, la radiologie interventionnelle offre la possibilité de traiter de nombreuses pathologies susceptibles d'écourter la mission, voire de mettre en jeu le pronostic vital des astronautes.

Ce travail répond à un challenge lancé par la Société Française de Radiologie (SFR) en partenariat avec le Centre National d'Études Spatiales (CNES). Le premier objectif consiste à conceptualiser une trousse de radiologie interventionnelle permettant de prendre en charge une liste de pathologies prédéfinie. Le second objectif de ce travail est de proposer des alternatives thérapeutiques innovantes à des pathologies usuellement traitées par chirurgie sur Terre, et ce sous forme de procédures dégradées de radiologie interventionnelle. L'objectif est ici de sauver l'astronaute avec les moyens du bord, en pesant toutefois la balance bénéfices / risques.

I. INTRODUCTION

A. La physiologie humaine dans l'espace

Nous allons détailler dans ce chapitre les variations de la physiologie du corps humain exposé à la micropesanteur, c'est à dire l'absence quasi complète de pesanteur, état obtenu lors de vols paraboliques ou encore en orbite (Fig 1).

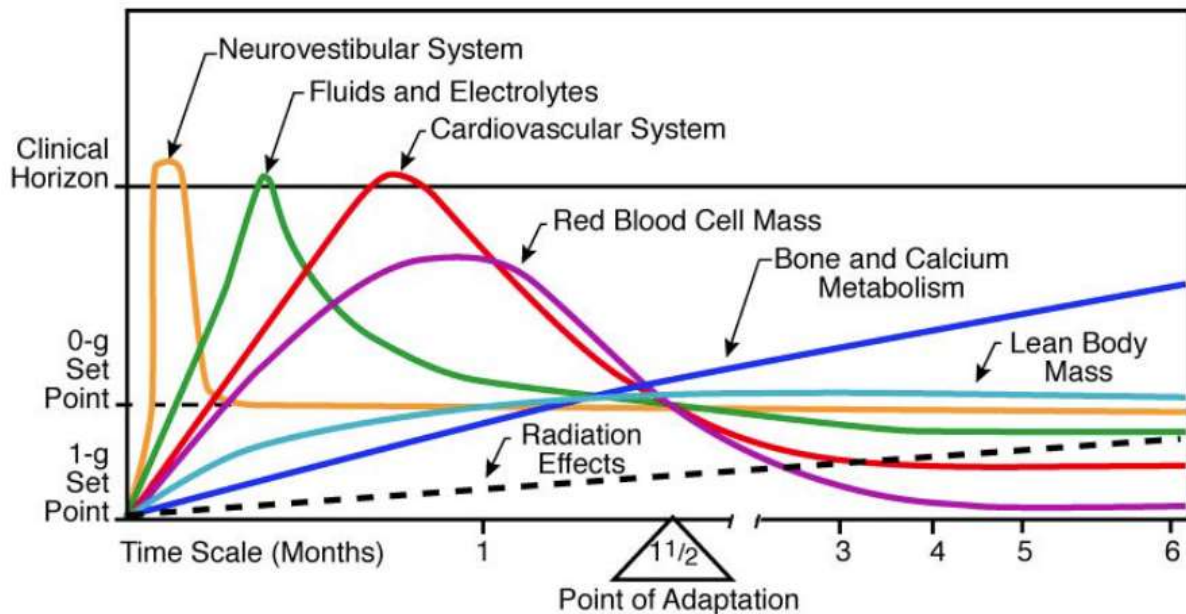


Fig 1. Modifications physiologiques après exposition à la micropesanteur et leurs évolutions dans le temps. Source : <https://www.nasa.gov/hrp>

a. Système cardio-vasculaire

Une des premières conséquences de la micropesanteur est la redistribution des fluides, notamment celle du sang au sein de l'organisme, nommée le *shift fluid*. Lorsque le corps

entre en apesanteur, le sang des membres inférieurs et du pelvis afflue vers le thorax et la région céphalique. Ce phénomène explique l'œdème et l'érythème faciaux des astronautes présents dès les premières heures [1]. Ainsi, il a été démontré un épaissement des tissus sous-cutanés de la face d'environ 7 % et un amincissement au niveau tibial de 15 %, illustrant parfaitement ce concept [2].

En dehors de l'apparence de l'astronaute, le *shift fluid* va avoir pour conséquence une augmentation du débit cardiaque, responsable de l'activation de phénomènes de contre-régulation diminuant les résistances vasculaires périphériques et, à moindre mesure, la fréquence cardiaque dans le but de maintenir une pression artérielle comparable à celle sur Terre [3].(Fig 2).

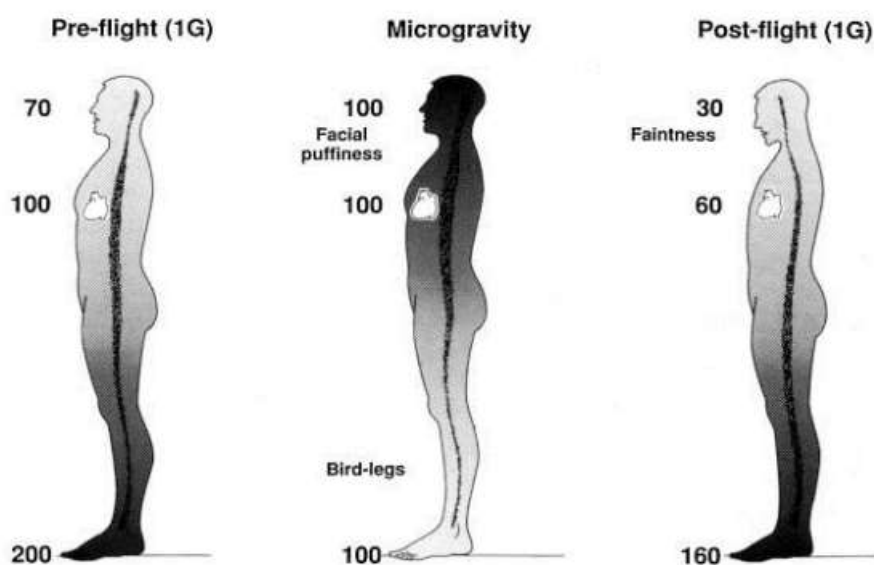


Fig 2. Schéma illustrant la pression artérielle moyenne (PAM) avant, pendant et après passage en microgravité. [4]

En détectant cet afflux sanguin, les barorécepteurs vont participer à la boucle de régulation et convertir l'hypervolémie relative initiale en une hypovolémie vraie via une

majoration de la perméabilité capillaire [5]. Il semble également s'installer rapidement un phénomène d'hémolyse des jeunes hématies responsable d'une diminution de la masse érythrocytaire de l'ordre de 10 % [6]. L'ensemble de ces mécanismes aboutit à une diminution de la volémie de 9 à 15 %, considérée comme une hémorragie de classe 1 selon l'*American College of Surgeons' Advanced Trauma Life Support*.

Selon une étude modélisant l'apesanteur par 6 semaines de repos en position allongée, le muscle cardiaque va présenter une hypotrophie ventriculaire gauche estimée à 12 % [6]. Cependant, il n'est pas clairement identifié de réduction du volume d'éjection systolique à distance du retour sur Terre. En effet, la valeur de la Fraction d'Éjection du Ventricule Gauche (FEVG) avant le départ est restaurée au maximum 14 jours après le retour en gravité terrestre [8].

Finalement, c'est au retour sur Terre que les astronautes subiront une altération plus symptomatique du système cardiovasculaire par mécanisme d'intolérance orthostatique. Bien que partiellement élucidées, les principales causes sont l'hypovolémie vraie apparue en micropesanteur et la réduction de la FEVG dans les premiers jours du retour sur Terre, aboutissant à une mauvaise régulation de flux sanguin cérébral [9]. De multiples mesures ont été adoptées par les astronautes pour lutter contre cela, notamment le « *Lower Body Negative Pressure* » qui est un caisson à pression négative permettant de maintenir une attraction du sang dans les membres inférieurs lorsque l'on est en apesanteur [2].

Enfin, certaines modifications du rythme cardiaque ont été objectivées au cours d'événements stressants comme les sorties extra-véhiculaires. Il s'agissait d'extrasystoles atriales et ventriculaires, sans conséquences en termes de morbi-mortalité [10].

b. Système respiratoire

Ce système est l'un des moins altéré dans l'espace et il a été démontré que les poumons fonctionnent aussi bien en l'absence de gravité que sur Terre [11]. La consommation d'oxygène n'est pas modifiée et les rapports de ventilation / perfusion sont, de manière incomplète, homogénéisés, en raison d'une meilleure répartition du volume sanguin pulmonaire [11,12]. On ne note cependant pas d'augmentation significative de l'efficacité des échanges gazeux.

Le principal paramètre respiratoire altéré est la Capacité Résiduelle Fonctionnelle (CRF). Elle est le reflet de l'élasticité pulmonaire et correspond au volume d'air restant dans les poumons après une expiration normale et passive. Les mécanismes mis en cause dans cette altération sont la redistribution du volume sanguin pulmonaire et les modifications morphologiques de la cage thoracique, par l'absence de chute des scapulas et l'ascension des coupes diaphragmatiques [12].

Enfin, la présence de particules en suspension (notamment celles de matériaux constituant la cabine) peut être à l'origine d'épisodes répétitifs de toux.

c. Système neurosensoriel

La manifestation neurologique la plus connue et particulièrement fréquente est le mal de l'espace. Celui-ci peut apparaître dès les premières minutes en apesanteur et persiste généralement quelques jours, jusqu'au dixième jour selon les personnes. Il s'apparente au

mal des transports terrestres, associant nausées, vomissements, sueurs, ainsi que dans la majorité des cas, d'importantes céphalées. Deux phénomènes sont impliqués dans la constitution de ce syndrome [14] (Fig 3) :

- l'asymétrie des otolithes, dont la différence de poids entre droite et gauche est compensée sur Terre par le système nerveux central, mis à mal dans l'espace
- le conflit neuro-sensoriel, avec perte du référentiel de verticalité visuel et mise au repos des récepteurs sensoriels cutanés, musculaires et articulaires (proprioception)

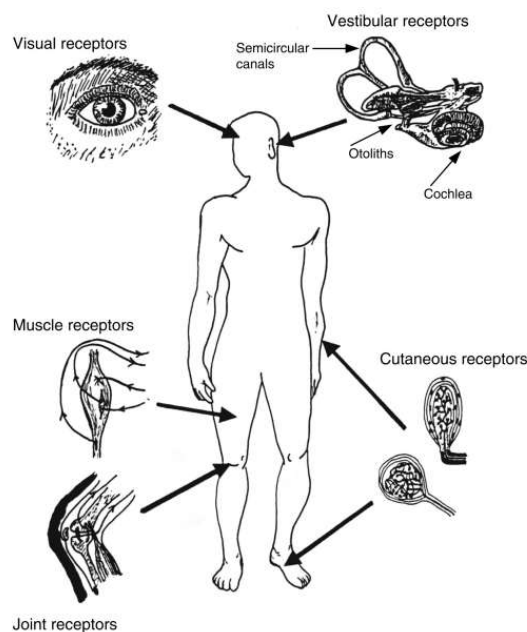


Fig 3. Systèmes sensoriels impliqués dans la régulation des activités posturo-cinétiques [14].

Un mal de débarquement peut faire écho à ce mal de l'espace et être constaté au retour.

Les troubles du sommeil sont fréquemment décrits et sont importants à prendre en compte du fait de potentielles répercussions sur la mission. La privation de sommeil peut altérer la vigilance et favoriser les erreurs humaines. Plusieurs facteurs sont mis en cause : la

nuisance sonore des machines et de l'activité du reste de l'équipage, l'importante charge de travail, les modifications du rythme circadien ou encore les facteurs de stress psychologique [3]. Tout cela a pour conséquence une durée de sommeil réduite et un fréquent recours à la consommation d'hypnotiques. L'architecture du sommeil semble être conservée, avec toutefois une augmentation de la durée du sommeil paradoxal, probablement afin de maximiser la récupération lors des heures de sommeil. Ce phénomène s'observe de manière similaire chez les marins, lors des traversées en solitaire.

Enfin, depuis quelques années, plusieurs études ont documenté ce que l'on appelle le SANS (*Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome*) chez les astronautes de retour sur Terre [15]. Ce syndrome est défini par de multiples atteintes oculaires telles qu'un œdème rétinien uni ou bilatéral, un aplatissement du globe oculaire, l'apparition d'une hypermétropie ou encore de petites zones ischémiques rétiniennes. Il semblerait que l'apparition de ces éléments soit en grande partie liée à l'altération de la répartition des fluides corporels, entraînant une hyper-pression au sein des structures oculaires. Ces manifestations semblent pouvoir se résoudre en quelques semaines chez certains sujets ou au contraire durer plusieurs années pour d'autres. Des études plus approfondies sur ce syndrome potentiellement handicapant doivent être menées, dans le but de mieux comprendre sa physiopathologie et d'identifier des mesures préventives efficaces.

d. Système musculo-squelettique

L'effet de la microgravité sur la structure osseuse est bien démontré, notamment par une perte osseuse environ dix fois plus importante que sur Terre [16]. En effet, l'absence de stimulus de gravité sur les os perturbe leur métabolisme en favorisant leur résorption par les ostéoclastes et parallèlement en diminuant l'ostéogénèse par les ostéoblastes, aboutissant alors à une balance production/résorption déficitaire (Fig 4).

L'augmentation de l'excrétion urinaire et fécale du calcium combinée à une diminution de son absorption intestinale vont accentuer la perte osseuse.

Afin de lutter contre cette ostéopénie induite par la micropesanteur, des contre-mesures sont recommandées et appliquées sur l'ISS, telles que les exercices physiques contre résistance ou la supplémentation calcique. Une étude a évalué l'utilité de médicaments freinant la résorption osseuse (biphosphonates ou denosumab) ou favorisant l'ostéoformation (teriparatide) pour prévenir la perte osseuse [16]. Les résultats sont concluants mais se heurtent au risque d'apparition d'effets indésirables, tels que l'ostéonécrose mandibulaire, non négligeable du fait de l'allongement des durées des prochaines missions d'exploration. Ces dernières années, une molécule semble se démarquer par son rôle dans la régulation du métabolisme osseux ; il s'agit de la mélatonine. Associée à une supplémentation en vitamine D et en calcium, elle préviendrait non seulement l'ostéopénie induite par la micropesanteur, mais empêcherait également les altérations du rythme circadien susceptibles d'affecter les performances des astronautes.

La récupération osseuse après retour sur Terre est pour l'heure difficilement mesurable en raison d'une grande variabilité interindividuelle. De nombreuses études sont en cours à ce sujet.

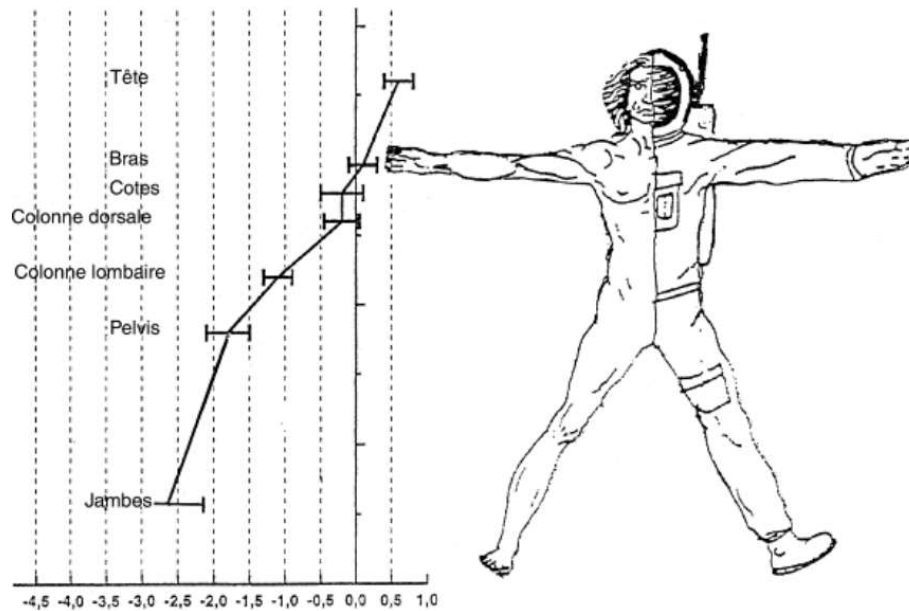


Fig 4. Déminéralisation osseuse prédominant nettement sur les os porteurs [17].

Mis aux repos, les muscles posturaux des astronautes vont eux aussi subir les effets de la micropesanteur et voir leur masse ainsi que leur force diminuer. Cette atrophie musculaire prédomine sur les muscles extenseurs, pouvant être responsable d'une attitude spontanée en semi-flexion [18].

Les principales conséquences de cette perte musculaire sont une augmentation de la fatigabilité musculaire ainsi qu'une susceptibilité accrue aux traumatismes induits par l'exercice.

e. Système génito-urinaire

Très tôt, les études ont démontré une stabilité voire une légère augmentation transitoire du débit de filtration glomérulaire [19]. Le contenu corporel en eau semble constant et au niveau électrolytique, il existe une discrète diminution de la natriurèse ainsi que de l'albuminurie.

Un point important à prendre en compte, du fait des possibilités thérapeutiques en radiologie interventionnelle, est le risque accru de calcul des voies urinaires. Les études attribuent ce phénomène à plusieurs facteurs tels que la diminution des apports hydriques, l'hypercalciurie détaillée précédemment, la sursaturation des minéraux au niveau urinaire ou encore la présence de nanobactéries, semblant particulièrement enclines à se développer en l'absence de gravité [20].

L'absence de gravité favoriserait également la mauvaise évacuation des urines et donc une certaine stagnation des bactéries en leur sein, pouvant participer au développement de phénomènes infectieux [19].

f. Système digestif

Il a été démontré par de multiples modèles simulant la micropesanteur que le système digestif subit lui aussi, de multiples altérations [21]. On observe ainsi une perturbation de l'activité sécrétoire de la cavité orale, du pancréas, de l'estomac et du foie, probablement

secondaire à des dérèglements hormonaux en lien avec l'état de « stress » inhabituel dans lequel se trouve le corps en micropesanteur.

Il a également été prouvé un ralentissement de la motilité gastro-intestinale et du transit, dû en partie aux perturbations hémodynamiques. En pratique, cet élément est important à prendre en compte lors d'une anesthésie générale et constitue un élément en faveur de la radiologie interventionnelle, qui ne nécessite généralement qu'une anesthésie locale et/ou une sédation légère.

La micropesanteur favoriserait également un déséquilibre de la flore digestive et un affaiblissement de la barrière intestinale, potentiellement responsable d'un défaut d'absorption et donc d'une perte énergétique [22].

g. Système immunitaire

L'environnement fermé à bord de l'ISS ou d'un vaisseau de transit participe à la transmission croisée entre astronautes. La transmission des germes est facilitée par leur persistance sous forme d'aérosols et par la création de biofilms [22]. Une conséquence directe en est la difficulté à conserver un champ opératoire stérile.

Au cours des dix dernières années, de nombreuses études ont démontré un réel impact négatif des radiations ionisantes et de la micropesanteur sur notre système immunitaire [23]. Notre compréhension de ces phénomènes est loin d'être exhaustive, mais plusieurs interactions ont déjà été mises en évidence comme la réduction significative des populations de lymphocytes B dans la rate de souris exposées à la micropesanteur, la

régulation négative de l'expression de certains gènes de l'immunité ou encore l'augmentation de la phosphorylation de kinases de lymphocytes T.

B. Intérêts de la radiologie interventionnelle dans l'espace

a. Membres de l'équipage

Actuellement, une équipe de 6 astronautes est envisagée pour le voyage vers Mars, parmi lesquels se trouverait au moins un médecin. Celui-ci devra présenter de multiples compétences techniques. Les connaissances médicales sont bien évidemment un socle indispensable, appuyées par une solide base de données informatiques résumant le savoir médical théorique utile pour le voyage. Il bénéficiera d'une formation de chirurgie légère, de dentisterie et de radiologie interventionnelle. Une étude canadienne de 2008 a soumis un questionnaire à plusieurs astronautes, afin d'estimer s'ils pensaient nécessaire ou non la présence d'un médecin lors d'une mission vers Mars et si oui, de quelle spécialité [24]. Une majorité des sondés (environ 80%) étaient en faveur de la présence d'un médecin. Il s'est avéré que ce n'était pas la spécialité qui semblait la plus importante, mais la connaissance par le médecin de notions de médecine d'urgence, de médecine de ville, de médecine aérospatiale, de chirurgie générale et de réanimation.

Les prochains astronautes seront soigneusement sélectionnés, notamment en raison de la durée particulièrement longue des missions à venir (910 jours environ en théorie pour la mission vers Mars), ce qui majore le risque de survenue d'un événement médical intercurrent. Un dépistage approfondi sera réalisé au préalable. Par exemple, lors des

sélections pour choisir les prochains candidats de l'agence spatiale européenne (sélections qui ont lieu au moment même où ce travail de thèse est réalisé), de multiples examens diagnostiques, comme une IRM cérébrale, une étude cardiovasculaire et ophtalmologique approfondie ou encore une sigmoidoscopie sont réalisés.

Les membres de l'équipage devront entre autre maîtriser les champs de compétence suivants : la géologie, la biologie, la mécanique, les systèmes électriques et le commandement.

b. Les problématiques de la chirurgie en micropesanteur

La première difficulté se trouve être l'anesthésie générale. L'environnement confiné rend presque inutilisable les anesthésiants inhalés, sous peine d'une contamination de l'air ambiant [25]. La possibilité d'une anesthésie péri-durale est également limitée par la modification de la distribution des fluides, et notamment du liquide céphalo-rachidien dans l'espace [26]. Une solution intéressante est la réalisation de blocs nerveux d'anesthésie loco-régionale, ayant pour principale difficulté sa réalisation technique par un médecin non rompu à ce geste. Des entraînements dédiés avant les missions, par le ou les médecins mais également par le reste de l'équipage, paraissent intéressants à réaliser.

Les altérations physiologiques en micropesanteur citées dans la première partie modifient également la réponse aux agents anesthésiques habituellement utilisés. Toutefois, lorsque cela est nécessaire, l'anesthésie générale est réalisable en micropesanteur. La kétamine a ici un rôle de choix pour plusieurs raisons. Elle est fréquemment utilisée en milieu pré-

hospitalier car elle présente moins d'effets indésirables cardio-vasculaires. Elle préserve également les réflexes des voies aériennes supérieures et la ventilation spontanée [27].

Les difficultés de l'acte chirurgical débutent par la nécessité d'immobiliser à la fois patient et opérateur. Une solution pourrait être d'utiliser le CMRS ou *Crew Medical Restrain System*, déjà présent sur l'ISS (Fig 5). Il s'agit d'un système déployable créé dans les années 90 dans un but de contention d'un patient en vue d'une stabilisation puis d'un éventuel retour sur Terre en cas de nécessité. Il a été conçu pour faciliter l'utilisation de plusieurs appareils médicaux, comme un défibrillateur ou un système de délivrance d'oxygène. Une étude parue en novembre 2020 dans le *Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency medicine* a démontré sa possible utilisation dans la réanimation d'un arrêt cardiorespiratoire en micropesanteur [28]. Cette solution pourrait également être appliquée lors de la réalisation d'actes de radiologie interventionnelle.



Fig 5. Mise en place d'un patient sur le CMRS, système présent sur l'ISS [29].

Une autre difficulté sera l'asepsie, et donc la préservation du champ opératoire d'une contamination par les particules non stériles en suspension. Des systèmes de stations chirurgicales, sortes de hottes mobiles en aspiration peuvent être employées pour limiter la contamination de la cabine par le sang du patient [30]. Plus simplement, des « éponges » insérées au sein du site opératoire ont montré leur efficacité à la prévention de l'effusion de sang au sein de la cabine, en dehors des saignements pulsatiles artériels [31]. Une autre solution proposée est l'utilisation du système HALS ou *Hand Assist Laparoscopic Surgery*, qui permet au travers d'incisions, l'introduction directe des mains de l'opérateur au sein de la cavité abdominale, facilitant ainsi le geste sans devoir utiliser le matériel habituel d'endoscopie, difficile à manier par du personnel non rompu à cet exercice. Les mains seront guidées par une caméra endoscopique classique [32]. Une étude a démontré la faisabilité de ce type de geste par des médecins non chirurgiens, notamment lors de vols parabolique en micropesanteur (Fig 6) [33]. Tout en facilitant un geste de chirurgie normalement réalisé par voie endoscopique, cette technique permet également de limiter le risque de contamination du patient et de la cabine du fait d'une absence de chirurgie ouverte.



Fig 6. Entraînement au système HALS en vol parabolique [33].

Malgré ces innovations technologiques, aucune opération humaine, du fait de considérations éthiques, n'a été réalisée ce jour en micropesanteur, les seules études portant sur des animaux. A titre d'exemple, une étude de *Campbell MR* parue en 2005, a démontré la possibilité de suture, mais aussi de chirurgie d'hémostase, de thoracotomie et de laparotomie chez des rats lors de vols paraboliques [34]. Ces expérimentations ont entre autres permis de tester également le stenting urétéral, les craniotomies ou la microchirurgie. L'évaluation des compétences chirurgicales dans ces études réalisées en micropesanteur sont équivoques, mais suggèrent que les performances diminuent chez un opérateur non habitué à ces conditions particulières, pouvant potentiellement mener à des

complications [35]. Une des conséquences à en tirer est la nécessité de réaliser des procédures simples et généralistes.

Une étude des facteurs de croissances chez des rats exposés à la micropesanteur suggère un retard à la cicatrisation des blessures et donc d'un éventuel abord opératoire [36].

Enfin, la communication avec la Terre se fera au prix d'un certain délai. En effet, une question soumise par l'équipage verra sa réponse arriver dans un délai total compris entre 15 et 30 minutes, selon l'avancée de la mission. Dans ces circonstances, il est difficilement concevable de faire appel à des procédés de télé-médecine et de chirurgie télé-guidée.

c. La solution « radiologie interventionnelle »

La radiologie interventionnelle désigne le guidage d'un geste médical sous contrôle de l'imagerie, quelle qu'en soit la modalité. Un énorme avantage est la possibilité de réaliser de multiples procédures avec un matériel relativement limité (aiguille, guide, cathéter, échographe). Ce matériel est extrêmement polyvalent et permettra aussi bien de drainer une infection de la vésicule biliaire qu'un bassinnet dilaté par une obstruction. Le poids total du matériel médical estimé pour la mission sera d'environ 700 kg / 1300 L (source ESA), d'où l'importance de proposer des procédures simples ne nécessitant pas un gros appareillage. Un exemple de contenu médical embarqué est résumé dans le Tableau 1.

Tableau 1. Exemple de contenu du kit médical sur l'ISS.

Source : <https://www.nasa.gov/image-feature/medical-kits-for-iss>

3.001 MEDICAL KIT- CONTENTS AND REFERENCE (MED CL/SpX-6 - ALL/FIN/T) Page 8 of 27 pages

Table 4. IV Supply Pack (Gray)

Item	Qty in Pack	Location
Bandages		
Clear Bandage	4	A2
Gauze 4"x4"	4	A2
Medical Tape	1	B1
IV Insertion & Fluid Administration		
IV Administration Set	3	A3/A4
IV Cap	5	B2
IV Catheters	-	A1
IV Catheter 14G	2	A1
IV Catheter 18G	4	A1
IV Catheter 20G	4	A1
IV Catheter 22G	4	A1
Sharps Container - IV Catheter	1	A1
IV Fluid - 500 mL	8	B3/B4
IV Fluid 1L	0	B3/B4
IV Pressure Infusor	1	A2
Tourniquet	1	B2
Skin Preparation Items		
BZK Wipe	4	B1

Un autre avantage des procédures de radiologie interventionnelle (RI) est leur simplicité [37]:

- une anesthésie locale ou une sédation plutôt qu'une anesthésie générale
- une contamination moindre de la cabine que lors d'une chirurgie ouverte
- pas ou peu de problème de contamination du foyer opératoire et de la cicatrice, du fait d'un abord limité à un simple point de ponction ou à une incision de quelques millimètres
- une faible consommation de ressources médicales
- une récupération plus rapide du patient après un geste de RI qu'un geste chirurgical

Dans cette optique, certains prônent l'envoi dans l'espace d'un radiologue interventionnel [37]. Les connaissances du radiologue interventionnel concernant la question de la radioprotection est également un des arguments avancés, du fait d'une exposition accrue aux radiations ionisantes lors du trajet. La participation à la mission d'un radiologue interventionnel spécialisé est cependant à mettre en balance avec une moindre

expérience en diagnostic clinique et en soins non interventionnels, notamment réanimatoires.

C. Le challenge MITBO

Le challenge « Mars IR Toolbox » a été lancé lors des JFR (Journées Francophones de Radiologie) à Paris en 2021, dans le contexte d'un partenariat entre la SFR (Société Française de Radiologie) et le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Le but est de mutualiser les forces du CNES et de la SFR pour créer une trousse de radiologie interventionnelle qui pourra accompagner les astronautes dans leur voyage vers Mars. La nécessité de maîtriser les techniques de RI au cours d'un tel voyage a été démontrée précédemment dans l'introduction, du fait de l'impossibilité de retour ou même de communication rapide avec la Terre.

Chaque gramme sera justifié au sein de la cabine. Chaque objet choisi pour le voyage est une place en moins pour un autre.

Le but est de conceptualiser une boîte à outil polyvalente pour une liste d'interventions spécifiques (Tableau 2).

Tableau 2 : Tableau illustrant les pathologies concernées par le challenge MITBO

	INDICATION A TRAITER
Thorax	Epanchement pleural
	Pneumothorax
	Tamponnade cardiaque
Abdomen	Cholécystite
	Abces
	Ascite
	Colique néphrétique
Pelvis	Abces
	Rétention urinaire non sondable
Général	Hématome

La deuxième partie de ce challenge consiste à proposer une liste de procédures dégradées pour des pathologies qui pourraient survenir dans l'espace, et pour lesquelles une prise en charge classique, notamment chirurgicale, paraît trop risquée en apesanteur. Pour chaque procédure, l'enjeu sera de peser correctement la balance bénéfice / risque d'une procédure de radiologie interventionnelle afin de ne pas proposer un geste délétère pour le patient, mais tout en étant assez inventif pour proposer une prise en charge interventionnelle dégradée permettant de lui sauver la vie dans cet environnement avec des ressources limitées.

Les astronautes bénéficieront pour réaliser ces gestes de l'aide d'un échographe et d'un capteur plan radiographique, sans scopie.

II. RÉALISATION DU CHALLENGE

A. La méthode BONO

Cette méthode, décrite par Edward de Bono en 1985, aussi appelé « les six chapeaux de Bono », est une technique de management, ayant pour objectif de résoudre efficacement une problématique, en laissant émerger les idées originales sans qu'elles soient bridées [38]. Ainsi au cours d'une réunion, chaque participant prend un « chapeau » de couleur différente (Fig 7), correspondant à un rôle. Ce chapeau peut changer de couleur au cours de la réunion.

Voici les différents rôles attribués au cours des réunions de travail :

- le chapeau bleu : l'organisateur, qui va se concentrer sur la tâche à accomplir et l'avancée du projet. Il y a un agenda et une échéance, il faut s'y tenir. C'est lui qui va demander des résumés, et proposer des objectifs à atteindre pour la réunion suivante.

- le chapeau vert : le créatif, qui va proposer les idées les plus originales et déroutantes.

- le chapeau rouge : l'intuitif, qui va proposer une critique émotionnelle basée sur son instinct, sans avoir à se justifier particulièrement

- le chapeau jaune : l'optimiste, qui va tenter de mettre en action les idées même les plus farfelues, proposées notamment par le créatif

- le chapeau noir : la critique négative, qui explique quels sont les risques et les dangers des idées proposées par les autres et pourquoi elles ne seraient pas réalisables

- le chapeau blanc : la neutralité, qui énonce les faits connus, rassemble des informations pour le reste du groupe

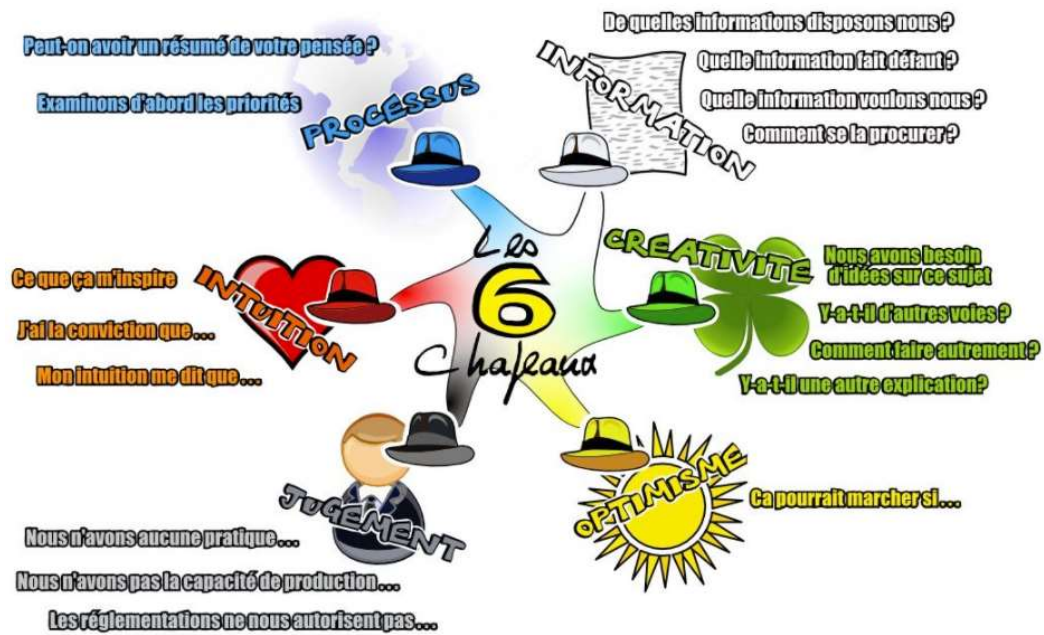


Fig 7. Illustration de la méthode Bono [38]

La répartition des rôles se faisait finalement de manière naturelle, car chaque personnalité tend vers un chapeau.

L'embolisation splénique est un exemple de réflexion au cours de l'une de nos réunions. L'idée est née du fait de la possibilité d'un traumatisme splénique en cas de collision, notamment lors des phases d'exploration. Le diagnostic ne pose pas de problème sous échographie. Sur Terre, l'embolisation est un geste tout à fait indiqué, et réalisé régulièrement selon une procédure bien établie. Le médecin radiologue va, après avoir réalisé une anesthésie locale généralement au pli de l'aîne droit, introduire du matériel de cathétérisme au sein de l'artère fémorale commune droite, et le monter en regard du saignement à l'aide d'un guidage radioscopique. A tout moment, le radiologue sera capable de voir où il se situe. Une fois arrivé en regard de l'extravasation, il pourra utiliser le matériel d'embolisation à sa disposition pour tarir le saignement. Une solution proposée

par le créatif de l'équipe, du fait de l'absence de guidage scopique lors de la mission, était la ponction percutanée de l'artère splénique, c'est à dire de piquer directement l'artère par un abord abdominal antérieur ou translombaire. Au tour de l'optimiste d'appuyer cette proposition, en proposant l'embolisation par de la gélatine résorbable au sein de l'artère splénique cathétérisée. Le membre de l'équipe ayant pour rôle la critique négative prend ici toute son importance en rappelant l'importance de la balance bénéfice / risque, que cette intervention n'a jamais été tentée sur Terre *a priori* (il appartient ensuite à celui qui incarne l'information de vérifier), ou qu'une fois ponctionnée, la brèche laissée lors du retrait du cathéter au sein de l'artère splénique est difficilement compressible et entraînera un hémopéritoine. L'équipe a alors décidé de ne pas proposer cette embolisation, du fait de son caractère trop risqué : « on ne le proposerait pas sur Terre à un patient, même dans un centre de recours possédant toutes les ressources nécessaires ».

B. Présentation de l'équipe

Notre équipe MANOLIM (*Mars is not a limit*) était composé de deux Professeurs des Universités – Praticiens Hospitaliers (Pr Vania Tacher, Pr Hicham Kobeiter), de deux Praticiens Hospitaliers (Dr Youssef Zaarour, Dr Benjamin Longère), de deux chefs de cliniques (Dr Laetitia Saccenti, Dr Maxime Blain) et d'un interne de radiologie (l'auteur). La totalité des membres de l'équipe exerçait régulièrement une activité de radiologie interventionnelle au sein de deux centres, les Hôpitaux Universitaires Henri Mondor et le Centre Hospitalier Universitaire de Lille. Nous nous réunissions en présentiel et en visioconférence tous les quinze jours.

C. Trousse à outils

a. Le drainage radiologique

Deux principaux types de drainage peuvent être réalisés, à savoir le drainage par ponction directe ou méthode du trocart et le drainage selon la méthode de Seldinger.

Le drainage par ponction directe est la plus simple des deux techniques. Le radiologue repère sa cible par un moyen d'imagerie, comme le scanner ou l'échographie par exemple, puis toujours sous guidage de l'imagerie, avance son drain rigidifié par un trocart central amovible jusqu'à la cible. Il n'a plus alors qu'à retirer l'âme métallique, laisser le drain en place et le fixer à la peau. Cette technique a pour avantages sa facilité d'exécution, le faible matériel nécessaire, une diminution du temps de procédure et des douleurs théoriquement moindres du patient. Cependant, cette technique ne sera réalisable que si la cible est facile d'accès. Prenons pour exemple une collection sous-cutanée. Il apparaît aisé de la ponctionner, sans trop risquer de se tromper de trajet, et de ponctionner par mégarde une artère adjacente. On peut alors se permettre d'enfoncer directement une aiguille de gros calibre. Il en va autrement pour une collection située au sein du parenchyme hépatique, ou encore pour un bassinnet rénal. La précision de la ponction diminue au fur et à mesure que la cible s'éloigne de la peau, alors que la proximité avec des structures à risque telles que le tube digestif ou une artère augmente considérablement. Il apparaît dangereux de ponctionner une telle cible directement avec un drain de gros calibre, du fait du risque de fausse route, ce d'autant que l'opérateur est peu expérimenté en radiologie interventionnelle percutanée. C'est tout l'intérêt de la technique de ponction selon Seldinger.

Avec cette technique (Fig 8), après désinfection des plans cutanés et anesthésie locale comme lors de tout drainage, on insère jusqu'à la cible une première aiguille de petit calibre. Le risque en cas de fausse route est ainsi moindre. Une fois en place, on insère au sein de l'aiguille de ponction un fil-guide téflonné, qui servira de rail permettant d'avancer selon un système coaxial du matériel jusqu'à la cible. On élargit ensuite le trajet à l'aide de dilateurs de tailles croissantes, puis on fini par insérer le drain de calibre voulu. C'est donc la méthode à privilégier si la cible n'est pas facilement accessible.

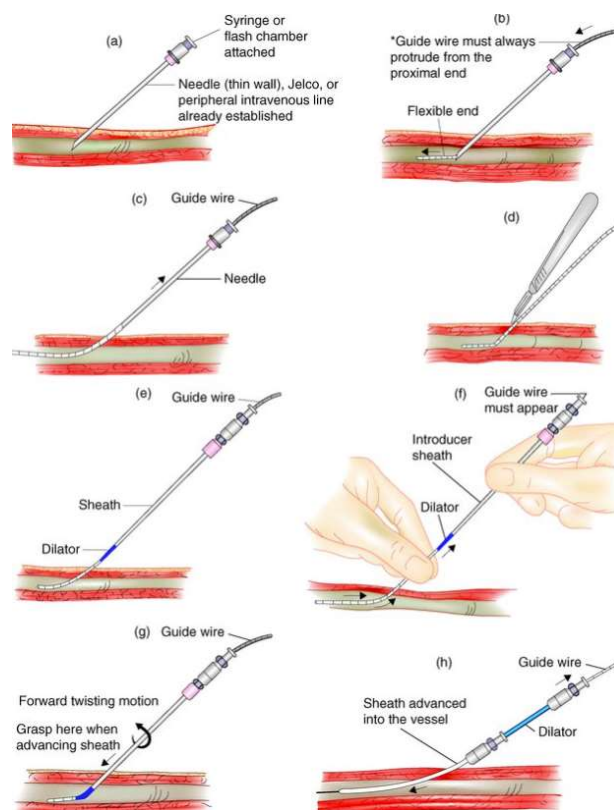


Fig 8. Technique de cathétérisme selon Seldinger d'un vaisseau sanguin.

Source : <https://static.cambridge.org/binary/version/id/urn:cambridge.org>

b. Système d'aspiration

Afin de maximiser le drainage dans ce milieu sans pesanteur, l'utilisation d'un redon en forme d'accordéon paraît être un moyen simple, réutilisable, léger et peu encombrant de créer une petite pression négative. Une fois le contenant rempli, une simple évacuation des fluides et une pression sur le redon permettent de le réutiliser, sans contamination du milieu extérieur (Fig 9).



Figure 9 : Exemple de redon en accordéon.

Source : https://www.chuv.ch/fileadmin/sites/dso/documents/Methodes_de_soins

c. Contenant de la trousse

Le tissu constituant la trousse se doit d'être résistant, léger et doit permettre de protéger son contenu, notamment en cas d'incendie. C'est pourquoi notre choix s'est porté sur le

Nomex® . Il s'agit d'une fibre synthétique résistante à la chaleur, qui ne fond pas et qui résiste à la combustion. Ce matériau est notamment utilisé dans la fabrication des vêtements de pompiers ou encore des pilotes automobiles.

De plus, afin de faciliter la réalisation du geste par le médecin à bord, il est cousu à l'extérieur de la trousse des QR codes, dont chacun renvoie vers une vidéo de la procédure de drainage correspondante, réalisée sur Terre avec le matériel présent au sein de la trousse. Cette vidéo est accompagnée d'un commentaire audio étape par étape, afin de pouvoir servir de guide si l'urgence ne permet pas de s'aider du support visuel.

d. Contenu de la trousse

Notre objectif est de créer la trousse la plus polyvalente et la plus simple d'utilisation, tout en étant la plus légère possible. Le ou les médecin(s) à bord ne seront probablement pas des radiologues interventionnels, et devront être formés à ces procédures avant le départ sur fantôme et animal.

La trousse, une fois ouverte, contient de multiples feuillets stériles et mis sous vide, contenant chacun une plaque en carton avec le même matériel. Ce matériel permet d'effectuer la totalité des drainages obligatoires proposés dans le challenge. Le nombre de feuillets pourra être adapté à la durée de la mission.

Chaque feuillet contient donc :

- un drain de YUEH 5 Fr – 15 cm
- un drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- un guide Amplatz 0,035" de 75 cm

- un dilateur de 7 Fr
- une valve de Heimlich
- un redon de capacité 400 mL
- un protège sonde d'échographie stérile

Ce contenu permet de prendre en charge la totalité des procédures de drainage demandées. Si un drainage est nécessaire, le médecin en charge pourra simplement ouvrir la trousse universelle de radiologie interventionnelle, prendre un des feuillets disponibles et procéder au drainage quel qu'il soit, assisté par une vidéo de la procédure directement accessible par le QR code correspondant au sein de la trousse.

Les emballages et notices des différents composants de la trousse sont retirés, le contenu est stérilisé puis mis sous vide, afin d'optimiser le volume et le poids de la trousse.

Le poids exact de la trousse n'est pas connu au moment de la rédaction de ce manuscrit, du fait de quelques ajustements à réaliser sur la quantité de pièces nécessaires, ainsi que sur le *design* de la trousse, mais il n'excédera pas d'après nos calculs quelques centaines de grammes.

III. PROCÉDURES OBLIGATOIRES

Les procédures explicitées dans ce chapitre sont des procédures obligatoires, fournies par le CNES, pour lesquelles l'objectif est de trouver le matériel le plus polyvalent pour les réaliser. Ce sont des procédures habituellement effectuées dans nos hôpitaux par les radiologues. Des rappels anatomiques seront faits sur chaque procédure, ainsi qu'une revue des méthodes diagnostiques pouvant être employées par le médecin à bord. Le but est de vérifier à travers une revue de littérature que chacune des procédures est réalisable avec le matériel choisi par notre équipe et notamment lorsque cela a déjà été expérimenté, en conditions d'apesanteur.

A. Épanchement pleural

a. Rappels anatomiques

La plèvre est constituée de deux feuillets, la plèvre pariétale et la plèvre viscérale, délimitant entre les deux un espace virtuel pouvant, dans des circonstances pathologiques, se remplir d'air, de pus, ou encore de sang. Dans les cas extrêmes, ce liquide prend trop de place et empêche le poumon de s'expandre correctement, mettant en jeu la fonction respiratoire et donc le pronostic vital du patient. C'est dans ces circonstances que le drainage est le plus indiqué.

b. Diagnostic

Le diagnostic peut être fait de manière clinique, à la percussion (matité) et à l'auscultation (abolition du murmure vésiculaire). Sur Terre, il est aisément visualisé sur la radiographie thoracique sous forme d'un poumon blanc à bord supérieur concave s'il est suffisamment abondant, ou par un simple émoussement des culs de sacs cardiophréniques ou costo-phréniques s'il est débutant. Cette sémiologie dépendante de la déclivité ne sera pas vraie dans l'espace [39]. Un autre moyen diagnostique est l'échographie. La conférence de consensus internationale sur l'échographie pulmonaire a même statué sur la supériorité de l'échographie en comparaison à la radiographie pour le diagnostic d'épanchement (Fig 10). Là aussi, on peut imaginer une moins bonne visibilité en micropesanteur du fait de la non accumulation préférentielle du liquide au sein des culs de sacs costo-phréniques, mais l'association de ces deux méthodes augmente la sensibilité de détection.

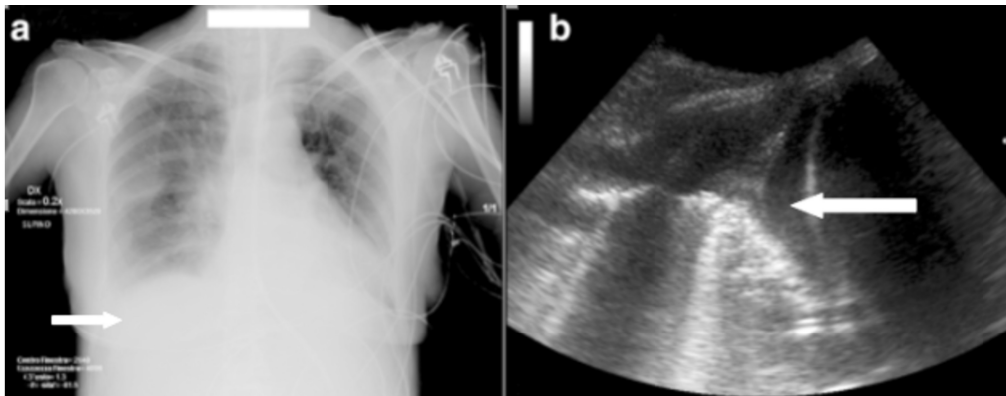


Fig 10. a. Lame d'épanchement pleural droit, sous forme d'un émoussement du cul de sac costodiaphragmatique (flèche). b. Échographie correspondante montrant aisément l'épanchement pleural mesuré à environ 2 cm (flèche) [40].

L'échographie apporte également des informations importantes sur la nature de l'épanchement [40]. Ainsi, un liquide anéchogène, c'est à dire noir de manière homogène sur l'image, sera en faveur d'un transsudat, surtout s'il est bilatéral. Un aspect anéchogène avec piqueté isoéchogène sera en faveur d'un hémothorax, ou d'un empyème, selon le contexte traumatique ou infectieux. Un autre avantage de l'échographie est la possibilité de repérer un épanchement cloisonné qui va compliquer la ponction, circonstance toutefois plus rare dans un contexte aigu. S'agissant de la sonde utilisée, la sonde microconvexe semble être la plus adaptée, du fait de sa fréquence relativement basse permettant de visualiser les structures profondes, notamment la plèvre et le poumon, mais également du fait de sa petite taille, facilitant la ponction intercostale. Cette sonde n'est cependant pas toujours disponible mais une étude de Lichtenstein a démontré que l'utilisation d'une sonde abdominale était un bon compromis [41].

c. Drainage

En conditions hospitalière, plusieurs techniques peuvent être employées pour drainer la plèvre. Les gros drains, indiqués en cas d'épanchement malin, de chylothorax ou encore de volumineux hémothorax, sont posés par voie chirurgicale, avec dissection de la plèvre pariétale à la pince et au doigt. Une étude de cas a cependant démontré l'efficacité du drainage par des sondes PigTail, jusqu'à un calibre de 8,5 Fr [41]. Une PigTail de ce calibre draine efficacement les épanchements séreux, mais aussi chyleux, ainsi que les empyèmes. La même étude montrait que ces sondes étaient posées aisément par les pneumologues au lit du patient, sous guidage échographique selon la technique de Seldinger (Fig 11).

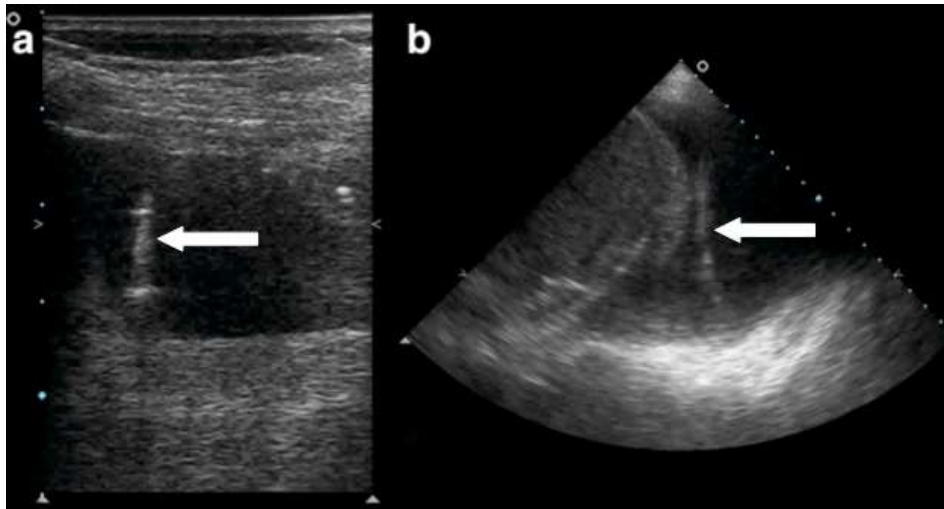


Fig 11. Drainage pleural à l'aide d'une sonde linéaire (a) et convexe (b).

La ligne hyperéchogène sous le poumon correspond au guide métallique utilisé (flèches).

Enfin, en cas de volumineux hémithorax avec troubles hémodynamiques, il est possible d'utiliser le système ConstaVac, qui permet la récupération du sang drainé et son autotransfusion directe au patient. La possibilité d'utilisation d'un tel système en micropesanteur a été démontré par l'équipe du Dr Campbell au cours de vols paraboliques réalisés par la NASA et prend tout son intérêt du fait de l'embarquement limité de produits de transfusion lors de la mission [42](Fig 12).



Fig 12. Drainage thoracique sur modèle porcin en vol parabolique [42]

En dehors du matériel de drainage classique, nous avons choisi de rajouter une valve d'Heimlich, fonctionnant comme une valve anti-retour, utilisée dans certains hôpitaux et permettant à l'air et aux liquides extraits de l'espace pleural de rester dans le collecteur (Fig 13).



Fig 13. Valve de Hemlich et connectiques.

Source : <https://www.chumontreal.qc.ca/sites/default/files/2020-06/390-3-la-valve-de-heimlich.pdf>

d. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire :

- Cathéter de YUEH 5 Fr – 15 cm

- Valve de Heimlich
- Tubulure
- Seringue de 20 cc
- Redon et tubulure
- Guide Amplatz 0,035"
- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Dilatateur de 7 Fr
- Protège sonde stérile

Ci-dessous les différentes étapes du drainage :

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Anesthésie des plans sous-cutanés en regard généralement du 4ème ou du 5ème espace intercostal sur la ligne axillaire, par guidage échographique, jusqu'à la plèvre pariétale
- 5) Ponction écho-guidée à l'aide d'un cathéter de YUEH 5 Fr, sur lequel est branchée une seringue de 20 cc, remplie à moitié de sérum physiologique
- 6) Aspiration de liquide ou de sang dans la seringue témoignant du passage de la plèvre pariétale
- 7) Retrait de l'aiguille métallique, le drain de YUEH restant en place
- 8) Mise en place d'un guide AMPLATZ 0,035"
- 9) Retrait du drain de YUEH
- 10) Moucheture à la peau à l'aide d'une lame
- 11) Dilatation du trajet à l'aide d'un dilatateur de 7 Fr monté sur le guide

- 12) Retrait du dilatateur
- 13) Montée du drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- 14) Retrait du guide et du rigidificateur
- 15) Connexion de la sonde avec une valve de Heimlich (attention au sens de la valve)
- 16) Connexion de la valve au système d'aspiration à pression négative
- 17) Fixation de la sonde à la peau par TEGADERM ou fils de suture

B. Pneumothorax

a. Rappels anatomiques

Comme expliqué précédemment, l'espace pleural peut se remplir de liquide mais également d'air, par exemple lors d'une perforation du poumon par une côte cassée lors d'un traumatisme.

b. Diagnostic

Le diagnostic peut être suspecté par l'examen clinique, avec tympanisme lors de la percussion, et de manière similaire à l'épanchement pleural liquidien, abolition du murmure vésiculaire et des vibrations vocales. Le diagnostic est porté de manière classique en radiographie standard, sous la forme d'une hyperclarté, c'est à dire une transparence augmentée d'une partie ou de la totalité d'un champ pulmonaire du fait du parenchyme collabé (Fig 14).

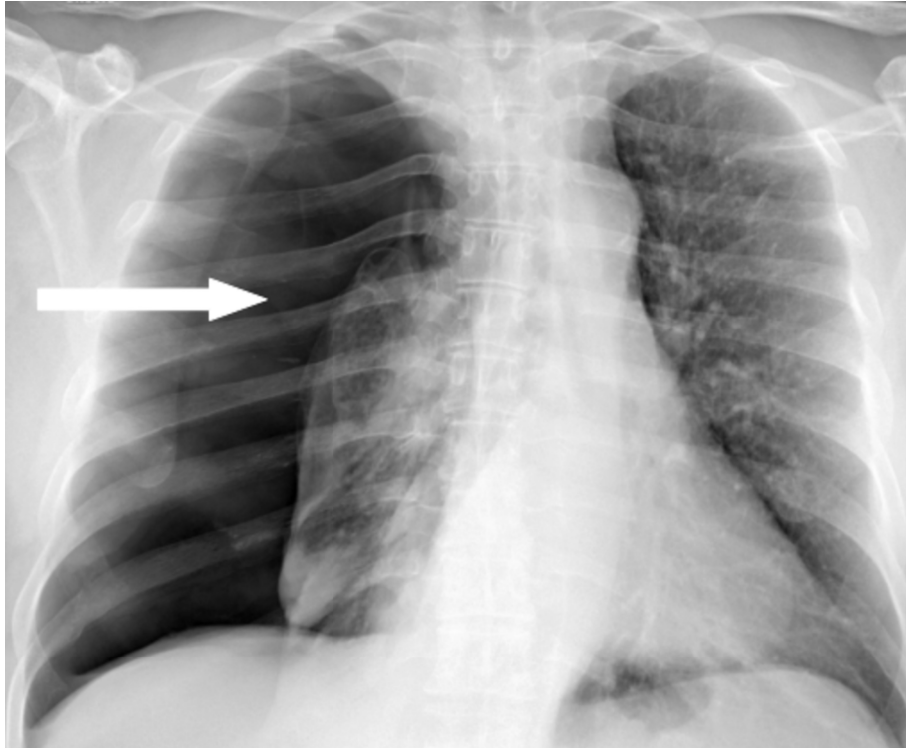


Fig 14. Pneumothorax droit en radiographie standard (flèche)

L'échographie pulmonaire se montre cependant de plus en plus performante. Les signes échographiques présentant la meilleure capacité diagnostique sont les lignes B et le glissement pleural. Les lignes B ou images en queue de comète correspondent à un artefact créé par la continuité entre l'espace pleural et le poumon. Ainsi, en cas de pneumothorax et de décollement, cet artefact disparaît (Fig 15). Le glissement pleural correspond à la manifestation dynamique du mouvement pulmonaire sous la plèvre lors de l'inspiration. On repère tout d'abord la plèvre, sous la forme d'une ligne hyperéchogène (Fig 16). Sous cette ligne, à chaque inspiration et expiration, on pourra observer le poumon glisser. Il est à noter que le mode TM de l'échographe donne ici des images caractéristiques. Une étude récente de 2020 a démontré, en condition de traumatisme, que la précision diagnostique de l'échographie par un opérateur non radiologue formé à

cet exercice était supérieure à la radiographie standard, indépendamment du type de traumatisme, du type d'échographe ou encore de la sonde utilisée [43].

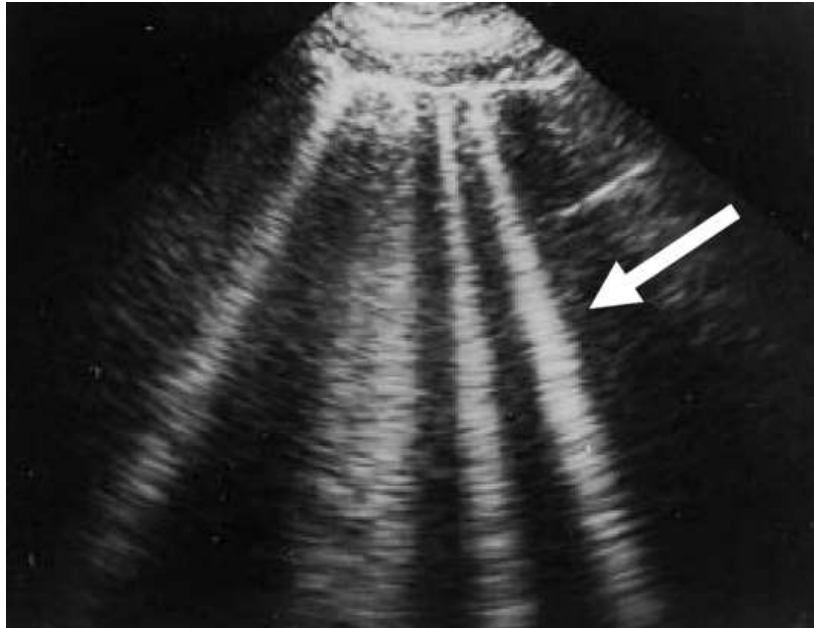


Fig 15. Lignes B, sous formes de rayons hyperéchogènes, témoignant de l'absence de pneumothorax sous la sonde [44].

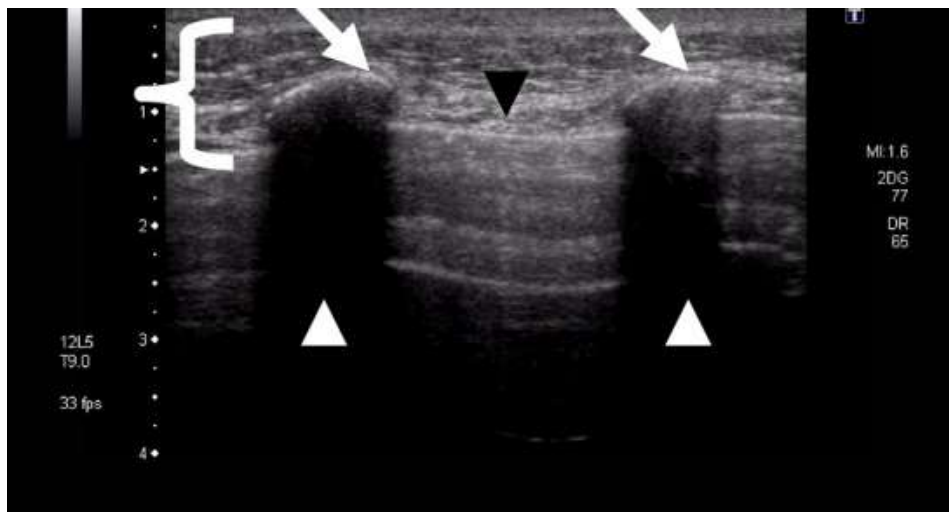


Fig 16.

Échographie thoracique antérieure montrant un espace intercostal .

On distingue les côtes (flèches blanches), leurs cônes d'ombre postérieurs (têtes de flèche blanches) et la ligne pleurale (tête de flèche noire).

c. Drainage

Deux techniques sont à envisager lors de la constitution d'un pneumothorax traumatique [45]: l'exsufflation à l'aiguille ou le drainage pleural aussi nommé thoracostomie.

La technique d'exsufflation s'opère généralement à partir du deuxième espace intercostal, sur la ligne médio-claviculaire. Elle peut également se réaliser au niveau du 4ème ou 5ème espace intercostal sur la ligne axillaire. Le risque d'échec de cette technique est estimé à environ 30 %, mais elle correspond au moyen le plus rapide de drainer un pneumothorax compressif chez un patient en état de choc. En milieux extrêmes, les recommandations de 2018 (*Tactical Combat Casualty Care Guidelines*) prônent l'usage d'une aiguille de 8 cm, de calibre de 14 à 10 gauges, laissée en place environ 10 à 15 secondes. L'efficacité est observée par l'échappement d'air, l'amélioration de la détresse respiratoire et l'augmentation de la saturation en oxygène [46].

En dehors de cette situation d'extrême urgence, le drainage pleural est à privilégier. Il permettra d'évacuer air et liquide pendant une durée plus longue, le temps de traiter une éventuelle plaie. A l'heure actuelle, le drainage réalisé par nos confrères pneumologues est facilité par l'utilisation de sondes PigTail allant de 8,5 à 12 Fr, mis en place selon la méthode de Seldinger. Nous proposons donc ici une procédure similaire en tout point au drainage de l'épanchement pleural, exception faite du moment de la ponction où nous recommandons l'utilisation d'une seringue remplie de quelques cc de sérum physiologique, afin de voir un passage de bulles à la traversée de la plèvre pariétale.

d. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire :

- Cathéter de YUEH 5 Fr – 15 cm
- Valve de Heimlich
- Tubulure
- Seringue de 20 cc
- Redon et tubulure
- Guide AMPLATZ 0,035"
- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Dilatateur de 7 Fr
- Protège sonde

Ci-dessous les différentes étapes du drainage :

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Anesthésie des plans sous-cutanés en regard du 4ème ou du 5ème espace intercostal sur la ligne axillaire, par guidage échographique, jusqu'à la plèvre pariétale
- 5) Ponction écho-guidée à l'aide d'un cathéter de YUEH 5Fr, sur lequel est branché une seringue de 20 cc, remplie à moitié de sérum physiologique
- 6) Aspiration de bulles dans la seringue témoignant du passage de la plèvre pariétale
- 7) Retrait de l'aiguille métallique, le drain laissé en place
- 8) Mise en place d'un guide AMPLATZ
- 9) Retrait du drain de YUEH

- 10) Moucheture à la peau à l'aide d'une lame
- 11) Dilatation du trajet à l'aide d'un dilateur de 7Fr
- 12) Retrait du dilateur
- 13) Montée du drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- 14) Retrait du guide et du rigidificateur
- 15) Connexion de la sonde avec une valve de Heimlich (attention au sens de la valve)
- 16) Connexion de la valve au système d'aspiration à pression négative
- 17) Fixation de la sonde à la peau par TEGADERM ou fils de suture

La réalisation d'une pleurocentèse par talcage afin d'éviter la récurrence n'est validée que pour le pneumothorax spontané. Le pneumothorax traumatique présente moins de risque de récurrence après l'épisode aigu passé et la cause traitée.

L'absence de gravité ne semble pas être un problème à l'évacuation d'air, naturellement sous pression au sein de la cavité pleurale.

C. Tamponnade cardiaque

a. Rappels anatomiques

La tamponnade cardiaque est le résultat de l'accumulation de liquide, de pus, de sang, ou d'air entre les deux feuillets du péricarde lors d'une inflammation, d'un traumatisme, d'une rupture cardiaque ou d'une dissection aortique. Le résultat est une compression des

cavités cardiaques, notamment droites, entraînant un grave dysfonctionnement du cœur. Il s'agit d'une urgence médico-chirurgicale.

b. Diagnostic

Cliniquement, le patient peut présenter une tachycardie, une hypotension artérielle, un pouls paradoxal et une atténuation des bruits du cœur à l'auscultation. En cas d'épanchement abondant et compressif, l'examen clinique met en évidence des signes de cœur droit aigu (turgescence jugulaire, reflux hépato-jugulaire ou œdèmes des membres inférieurs). D'un point de vue des examens paracliniques, il peut être objectivé un microvoltage à l'ECG et un élargissement de la silhouette cardiaque avec aspect de cœur en carafe à la radiographie standard.

L'échographie est de loin la meilleure méthode diagnostique (Fig 17). Les critères échographiques les plus sensibles sont un épanchement significatif (plus de 20mm d'épaisseur maximale), un aspect de *swinging heart* (mouvement de bascule du massif cardiaque au sein du sac péricardique), une dilatation de la veine cave inférieure (plus de 2,5 cm), le collapsus du bord libre de l'oreillette droite en fin de diastole ou en début de systole et le collapsus du ventricule droit en début de diastole.



Fig 17. Tamponnade cardiaque en échographie [47].

On notera ici la compression de l'oreillette droite (flèche)

c. Drainage

Le geste est urgent et consiste en la réalisation d'une ponction du péricarde sous contrôle échographique et anesthésie locale. Il est mis en place un cathéter selon la technique de Seldinger pour une durée de 48 à 72 h afin de drainer progressivement l'épanchement.

La technique de Seldinger est privilégiée au drainage direct du fait du risque d'erreur de ponction. En effet, le trajet doit éviter le foie, le myocarde, le poumon, l'artère mammaire interne et le paquet vasculo-nerveux sous costal. Le point de ponction est choisi afin de minimiser la distance entre la peau et l'épanchement, en évitant les structures nobles citées ci-dessus. La voie sous-xiphoidienne est classiquement utilisée mais peut différer selon la morphologie de l'épanchement et du patient.

La ponction se fait par guidage échographique et peut être facilitée par l'emploi d'une bague clipsée à la sonde avec modélisation du trajet sur l'écran de l'échographe.

Le geste se fait sous contrôle ECG, des extrasystoles ventriculaires étant fréquentes en cas de contact du matériel avec l'épicarde.

d. Description détaillée du geste

Ci dessous le matériel nécessaire :

- Cathéter de YUEH 5 Fr – 15 cm
- Guide AMPLATZ 0,035"
- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Dilatateur de 7 Fr
- Tubulure
- Seringue de 20 cc
- Protège sonde
- Redon et tubulure

Ci-dessous les différentes étapes du drainage :

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Anesthésie sous contrôle échographique des plans sous-cutanés et profonds du lieu propice à la ponction (selon la localisation de l'épanchement)

- 5) Ponction écho-guidée à l'aide d'un cathéter de YUEH 5 Fr, sur lequel est branché une seringue vide
- 6) Aspiration de liquide témoignant du passage au sein de l'espace péricardique
- 7) Retrait de l'aiguille métallique, le drain laissé en place
- 8) Mise en place d'un guide AMPLATZ
- 9) Retrait du drain de YUEH
- 10) Moucheture à la peau à l'aide d'une lame
- 11) Dilatation du trajet à l'aide d'un dilatateur de 7 Fr
- 12) Retrait du dilatateur
- 13) Montée du drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- 14) Retrait du guide et du rigidificateur
- 15) Connexion de la sonde avec le système d'aspiration
- 16) Fixation de la sonde à la peau par TEGADERM ou fils de suture

D. Cholécystite

a. Rappels anatomiques

La vésicule est un organe situé sous le foie, servant à stocker et à concentrer la bile avant sa libération au sein du tube digestif afin de participer à la digestion du bol alimentaire. La vésicule peut être le siège d'une infection, parfois favorisée par la présence de calculs qui représentent la cause la plus fréquente de cholécystite aiguë. La stagnation de bile en amont d'un obstacle tel qu'un calcul favorise la prolifération microbienne, et donc l'infection.

A l'hôpital, la majorité des cholécystites aiguës sont traitées de manière médicale par antibiotiques, puis de façon chirurgicale pour éviter leur récurrence. Actuellement, les indications de drainage percutané retenues concernent soit les patients à haut risque chirurgical du fait de leurs co-morbidités, soit les cholécystites aiguës graves, c'est à dire avec dysfonction d'organe selon les critères de Tokyo (défaillance cardiovasculaire, respiratoire, hépatique, rénale, neurologique, ou hématologique) [48].

b. Diagnostic

Typiquement, les symptômes débutent par des douleurs en hypocondre droit (point de Murphy), d'apparition rapide et potentiellement associées à des vomissements. C'est ce que l'on appelle une colique hépatique. Si l'obstruction persiste, les symptômes infectieux apparaissent, notamment l'hyperthermie. Si une prise de sang est réalisée, un syndrome inflammatoire modéré à sévère peut être mis en évidence. Le diagnostic de certitude est basé sur l'imagerie, préférentiellement par échographie. Les deux signes cardinaux sont la douleur au passage de la sonde, appelé le Murphy échographique, ainsi que la présence d'au moins une lithiase vésiculaire ou de *sludge* (boue vésiculaire). L'échographie peut mettre en évidence d'autres signes comme un épaissement pariétal supérieur à 3mm, un aspect feuilleté des parois vésiculaires, une infiltration de la graisse péri-vésiculaire ou encore un aspect distendu de la vésicule (Fig 18).

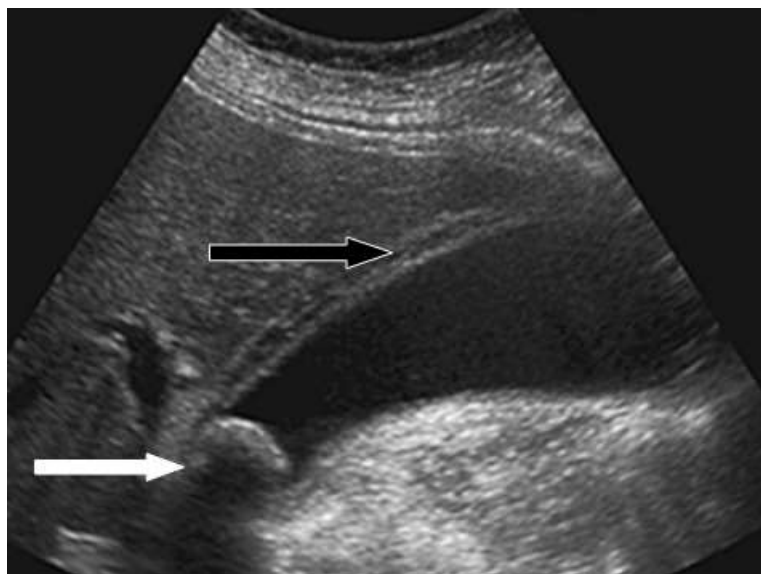


Fig 18. Cholécystite en échographie.

On visualise les parois feuilletées de la vésicule (flèche noire), son aspect modérément distendue et la lithiase enclavée à proximité du collet (flèche blanche) [49].

c. Drainage

Dans la littérature, deux trajets sont couramment décrits lors des drainages vésiculaires. Il s'agit de la ponction transhépatique et de la ponction transpéritonéale (Fig 19).

La ponction transhépatique est décrite comme la méthode la plus sûre [48]. Elle permet de limiter le risque de fuite biliaire, mais aussi de laisser le drain vésiculaire en place plus longtemps [50]. La voie transpéritonéale est réalisée lorsque la voie transhépatique n'est pas possible, en raison de l'anatomie du patient, ou lors de trouble de l'hémostase ne permettant pas une ponction hépatique.

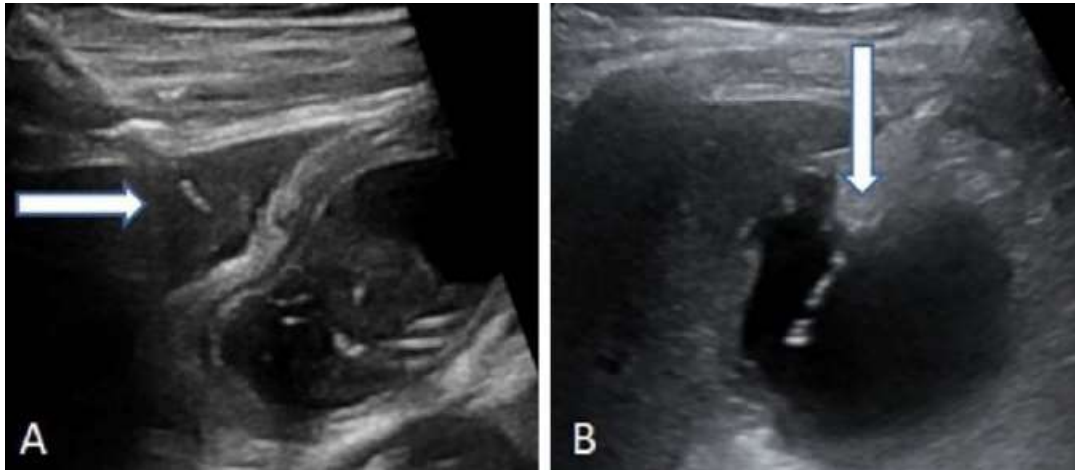


Fig 19. L'image ci-dessus montre en A. un trajet de ponction à travers une languette de parenchyme hépatique et en B. un trajet de ponction transpéritonéale, dans le fond vésiculaire.

Deux techniques de ponction sont décrites, la première selon la méthode de Seldinger et la seconde dite « méthode du trocart », c'est à dire par ponction directe. Chacune des deux techniques présente ses avantages et ses inconvénients, décrits précédemment ; rappelons que le principal risque de la ponction directe est le risque de plaie d'un organe voisin. La technique de Seldinger est plus sûre mais contient un plus grand nombre d'étapes à réaliser.

Dans notre démarche, nous recommandons un trajet transhépatique, décrit comme étant moins à risque de complications. Nous proposons en revanche les deux méthodes de drainage, au libre choix de l'opérateur et selon la difficulté du geste (importance de la dilatation vésiculaire, structure digestive ou vaisseau hépatique à proximité...).

d. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire en conditions difficiles :

- Cathéter de YUEH 5 Fr – 15 cm
- Tubulure
- Guide AMPLATZ 0,035"
- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Dilatateur de 7 Fr
- Seringue de 20cc
- Redon et tubulure
- Protège sonde

Ci-dessous les différentes étapes du drainage, en conditions « difficiles »:

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction (généralement en hypochondre droit, inter-costal, sur la ligne axillaire)
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Anesthésie locale des plans sous-cutanés sous contrôle échographique à l'aide quelques cc de lidocaïne
- 5) Ponction écho-guidée à l'aide d'un cathéter de YUEH 5Fr, sur lequel est branché une seringue vide. Un trajet de quelques centimètres au sein du parenchyme hépatique est réalisé si possible.
- 6) Aspiration de liquide plus ou moins épais témoignant du passage au sein de la vésicule biliaire
- 7) Retrait de l'aiguille métallique, le drain laissé en place

- 8) Mise en place d'un guide AMPLATZ
- 9) Retrait du cathéter de YUEH
- 10) Moucheture à la peau à l'aide d'une lame
- 11) Dilatation du trajet à l'aide d'un dilateur de 7 Fr, monté sur le guide
- 12) Retrait du dilateur
- 13) Montée du drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- 14) Retrait du guide et du rigidificateur
- 15) Connexion du drain au système d'aspiration
- 16) Fixation de la sonde à l'aide d'un TEGADERM ou fils de suture

Matériel nécessaire en conditions simples :

- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Tubulure
- Seringue de 20cc
- Redon et tubulure
- Protège sonde

Description de la procédure en conditions «simples» :

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction (généralement en hypochondre droit, inter-costal, sur la ligne axillaire)
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Anesthésie locale des plans sous-cutanés et profonds sous contrôle échographique
- 5) Ponction écho-guidée à l'aide du drain de 8Fr et de son rigidificateur métallique. Un trajet de quelques centimètres au sein du parenchyme hépatique est réalisé si possible

- 6) Aspiration de liquide plus ou moins épais témoignant du passage au sein de la vésicule biliaire
- 7) Retrait du rigidificateur, le drain étant laissé en place
- 8) Connexion du drain au système d'aspiration
- 9) Fixation de la sonde à l'aide d'un TEGADERM ou fils de suture

E. Abscès abdominal

Le drainage d'un abcès abdominal s'apparente à celui d'une vésicule biliaire infectée. Nous ne reprendrons pas les étapes en détails ici, mais précisons que si la collection est située à proximité de la paroi abdominale, à distance du tube digestif, des artères ou d'autres structures nobles, un drainage direct par la méthode du trocart peut être envisagé.

Pour les collections profondes, la méthode de Seldinger est à privilégier, afin d'éviter les accidents de ponction. Par exemple, le colon peut être confondu avec une collection lorsque le drainage est réalisé sous contrôle échographique seul. Il apparaît d'ailleurs intéressant de réaliser un ASP après la ponction et mise en place du guide pour vérifier qu'il ne prenne pas un trajet colique.

F. Ascite

a. Rappels anatomiques

Le péritoine est la membrane qui recouvre la cavité abdominale et les viscères. Il s'agit d'un organe à part entière, qui ne sert pas uniquement de moyen de fixation, mais qui a un rôle important dans la vascularisation et l'homéostasie des organes abdominaux. Il peut être le siège d'infections primaires, secondaires ou tertiaires, appelées péritonites.

Les péritonites primaires sont dues à une translocation bactérienne sans véritable plaie du tube digestif. Les péritonites secondaires sont dues à un ensemencement direct, secondaire à un défaut du tractus digestif, urinaire ou des organes pleins, en contexte infectieux. Les péritonites tertiaires sont des péritonites secondaires durant plus de 48h malgré une tentative de contrôle du foyer infectieux initial par chirurgie ou drainage.

Les points d'appels infectieux digestifs pouvant être responsables de péritonites sont nombreux, et sont résumés Fig 20.

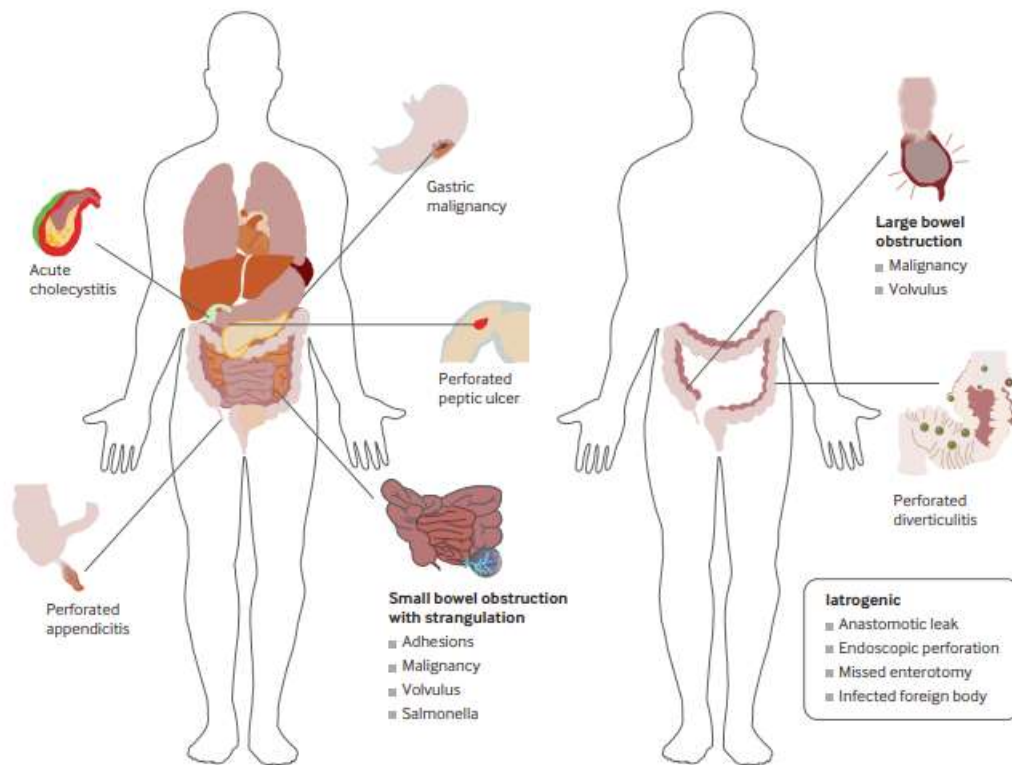


Fig 20. Multiples causes de péritonite secondaire [51].

b. Diagnostic

L'ascite désigne la présence d'un liquide non sanglant au sein de la cavité abdominale. Sa principale cause en situation d'urgence est la péritonite.

Le diagnostic de péritonite se fait essentiellement de manière clinique. La contracture en est le signe pathognomonique, définie par une contraction permanente, invincible et douloureuse des muscles pariétaux. La défense, une contracture quant à elle réductible, est un signe moins spécifique. On peut également retrouver parmi ces signes cliniques une douleur brutale à la décompression abdominale.

La radiographie standard peut montrer des signes de perforation digestive, visualisables par un croissant gazeux sous diaphragmatique, ou un niveau liquidien si un épanchement de grande abondance s'y associe (Fig 21). La valeur de ce signe en l'absence de gravité n'est toutefois pas assurée. La radiographie montrera souvent un iléus fonctionnel associé.

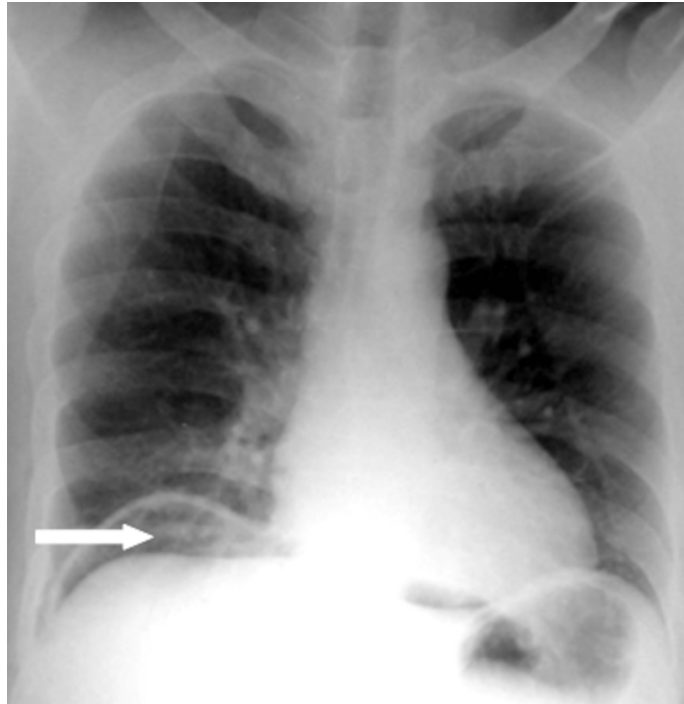


Fig 21. Radiographie révélant un croissant gazeux entre le dôme hépatique et le diaphragme, témoignant du pneumopéritoine (flèche).

L'échographie présente une sensibilité de 70 % et une spécificité de 85 % dans le cadre des douleurs abdominales aiguës [51]. Elle permettra de diagnostiquer aisément un épanchement liquidien intra-abdominal. En micropesanteur, cet épanchement est plus facilement repérable car il moule les organes abdominaux, comme cela a été démontré sur modèle porcin lors de vols en gravité zéro dans une étude datant de 2002 [52]. L'échographie permet par ailleurs d'identifier certaines causes des péritonites secondaires,

comme une appendicite ou une cholécystite aiguë. Elle permettra enfin de guider le geste de ponction.

Le scanner est le moyen diagnostique par excellence pour déterminer la cause des péritonites secondaires, mais il ne sera pas disponible lors des prochaines missions extra-orbitaires.

c. Drainage

Le drainage d'une ascite simple, c'est à dire d'un épanchement liquidien intra abdominal sans nécessité de lavage, est réalisé facilement à l'aide de l'aiguille de YUEH en fosse iliaque gauche, sur la ligne joignant l'épine iliaque antéro-supérieure à l'ombilic, entre les 2/3 tiers internes – 1/3 externe. Cette ponction peut se faire de manière écho-guidée afin de vérifier l'absence d'anse digestive s'interposant sur le trajet, et le passage à distance de l'artère épigastrique inférieure.

L'étude de 2002 citée ci-dessus a non seulement montré la possibilité de diagnostiquer un épanchement péritonéal en l'absence de gravité, mais également de drainer cet épanchement sans difficulté particulière, et sans franche majoration du risque de plaie digestive ou viscérale.

Du fait de la limitation des ressources dans l'espace, les méthodes les moins invasives seront utilisées au maximum, à savoir l'antibiothérapie, le lavage péritonéal et le drainage d'un éventuel abcès ou point de départ de l'infection. A titre d'exemple, une étude parue

en 2017 a démontré l'absence de surplus de mortalité chez des patients en péritonites secondaires dans les suites d'une diverticulite et traitée par lavages péritonéaux, en comparaison à une prise en charge chirurgicale classique [53].

En cas de péritonite ne répondant pas aux antibiotiques, nous recommandons donc la réalisation d'une ponction péritonéale sous guidage échographique, complétée par des lavements répétés au sérum physiologique jusqu'à obtenir un liquide de lavage clair. Ceci sera éventuellement complété par le drainage du foyer infectieux primaire (ex : cholécystite aiguë).

d. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire :

- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Tubulure
- Seringue de 20cc
- Redon et tubulure
- Protège sonde

Description de la procédure :

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction (généralement en fosse iliaque gauche, sur le tiers externe de la ligne joignant le pubis à l'épine iliaque antéro-supérieure).

- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Anesthésie locale échoguidée des plans sous cutanés
- 5) Ponction écho-guidée à l'aide du drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- 6) Aspiration de liquide à l'aide d'une seringue témoignant du passage au sein de la cavité péritonéale
- 7) Retrait du rigidificateur métallique, le drain laissé en place
- 8) Multiples lavages au sérum physiologique jusqu'à obtenir un liquide clair
- 9) Connexion de la sonde avec le système d'aspiration
- 10) Fixation de la sonde à la peau par un fil de suture

G. Colique néphrétique

a. Rappels anatomiques

L'appareil urinaire est constitué de l'urètre, de la vessie, des uretères et des reins. Une obstruction de l'écoulement des urines est possible aux différents niveaux de cet appareil excréteur. Comme expliqué au début de ce travail, la micropesanteur favorise l'hypercalciurie et donc la formation de calculs urinaires, qui sont particulièrement enclins à se bloquer au sein des uretères, et plus fréquemment au niveau du méat urétéro-vésical.

Le blocage de l'écoulement des urines peut avoir de graves conséquences, comme une insuffisance rénale ou une pyélonéphrite.

b. Diagnostic

Les principaux symptômes de la colique néphrétique sont représentés par d'importantes douleurs lombaires, parfois associées à des nausées et vomissements.

Lorsque la douleur est typique, et régresse sous antalgiques et anti-inflammatoires, le recours à l'imagerie n'est pas nécessaire. On réalise toutefois fréquemment un scanner sans injection de produit de contraste, qui permettra de mettre en évidence le calcul obstructif sur les voies urinaires, ainsi que la dilatation du tractus urinaire d'amont (Fig 22).

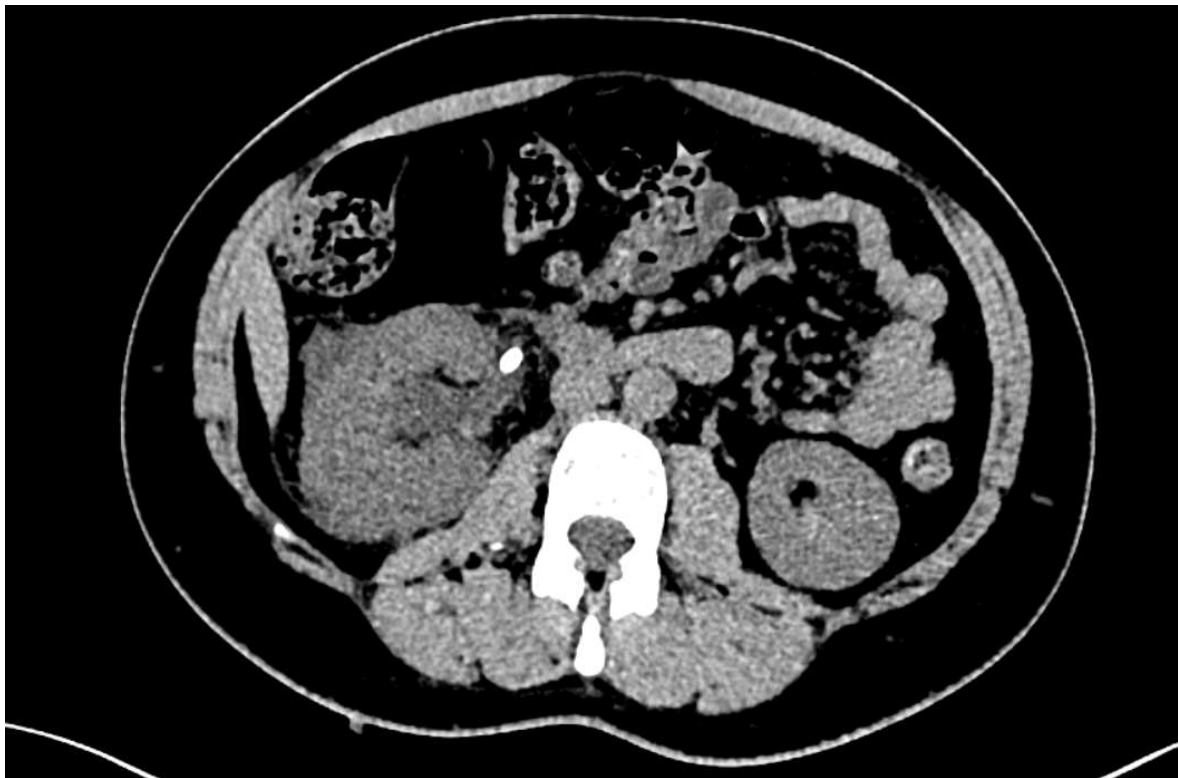


Fig 22. Colique néphrétique visualisée en scanner, avec une lithiase d'environ 2,5cm, et dilatation des cavités calicielles du rein droit

Le diagnostic est également possible en échographie, avec mise en évidence de la dilatation des cavités pyélo-calicielles (Fig 23). La visualisation de la cause de l'obstruction est par contre plus difficile à identifier. L'échographie peut également permettre de guider la ponction lors de la pose de néphrostomie percutanée.



Fig 23. Image échographique empruntée au collègue des enseignants de radiologie.

La flèche montre la dilatation du bassinet et des calices.

c. Drainage

En général, l'épisode de colique néphrétique est bref, le calcul étant éliminé de manière spontanée au sein des voies excrétrices. Cependant, lorsque le calcul est trop volumineux, de plus de 6 mm, les chances d'évacuation spontanée sont plus faibles, et une intervention devient nécessaire. Elle consiste en la montée d'une sonde JJ au sein des voies excrétrices dilatées, permettant l'écoulement des urines. C'est lorsque leur drainage n'est pas possible par les voies urinaires qu'une sonde de néphrostomie peut être posée sous contrôle échographique. Ce geste consiste à ponctionner à travers la

peau les cavités calicielles dilatées, et à y introduire un drain permettant l'écoulement des urines.

De nos jours, il existe de nombreux kits entièrement dédiés à la néphrostomie percutanée. Cependant, un article paru en 1979 montre que ce geste est tout à fait possible en utilisant des sondes PigTail classiques de 8,3 Fr et de 30 cm de longueur [54].

Leur pose est généralement réalisée soit sous scanner, soit sous contrôle échographique et scopique.

d. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire :

- Cathéter de YUEH 5Fr – 15 cm
- Tubulure
- Guide AMPLATZ 0,035"
- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Dilatateur de 7Fr
- Seringue de 20cc
- Redon et tubulure

Description de la procédure :

- 1) Installation du patient dans le CMRS

- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction (généralement en flan droit ou gauche, selon le meilleur axe de ponction)
- 3) Mise en place d'un protège sonde
- 4) Anesthésie des plans sous-cutanés et profonds sous contrôle échographique, jusqu'à la capsule rénale
- 5) Ponction écho-guidée, en général du calice inférieur voire moyen dilaté, rarement du calice supérieur, à l'aide d'un cathéter de YUEH 5Fr - 15cm.
- 6) Évacuation d'urines témoignant du passage au sein des cavités excrétrices
- 7) Retrait de l'aiguille métallique, le drain laissé en place
- 8) Mise en place d'un guide AMPLATZ
- 9) Retrait du cathéter de YUEH
- 10) Moucheture à la peau à l'aide d'une lame
- 11) Dilatation du trajet à l'aide d'un dilateur de 7Fr, monté sur le guide
- 12) Retrait du dilateur
- 13) Montée du drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur préférentiellement plastique
- 14) Retrait du guide et du rigidificateur
- 15) Verrouillage de la sonde en tirant sur le fil
- 16) Connexion du drain avec le système d'aspiration
- 17) Fixation de la sonde à la peau à l'aide de deux points de suture

H. Abscès pelvien

La procédure de drainage s'apparentera au drainage d'une vésicule biliaire. On proposera une ponction directe par la méthode du trocart lorsque l'abcès est facilement accessible, à distance de structures nobles.

On proposera la technique de Seldinger si la zone à drainer s'avère être difficile d'accès, pour d'avantage de sécurité.

I. Rétention urinaire non sondable

a. Rappels anatomiques

La rétention aiguë d'urine correspond à l'impossibilité complète d'uriner malgré la réplétion de la vessie. Plusieurs facteurs peuvent limiter la vidange vésicale :

- un obstacle situé sur le trajet de l'urètre, sous la vessie, comme une hypertrophie prostatique, cause la plus fréquente sur Terre mais peu probable lors des prochaines missions. Une prostatite est en revanche possible, ayant déjà nécessité le rapatriement sur Terre d'un astronaute Russe, Vladimir Vazyutin en 1985, du fait d'une impossibilité de se sonder.
- un problème de commande nerveuse, essentiellement retrouvé dans les vessies neurologiques mais aussi lors d'un traumatisme médullaire par exemple
- un problème de contraction musculaire

b. Diagnostic

Le diagnostic est généralement clinique devant la constatation d'un globe vésical, correspondant à l'aspect bombant et tendu de l'abdomen en raison de la vessie en forte réplétion, ainsi que l'intense douleur associée. L'échographie permettra de constater cette réplétion, mais également d'en quantifier le volume.

c. Drainage

Le cathétérisme sus-pubien est une procédure simple lorsque la vessie est en globe, car bombant sous la surface cutanée, et refoulant à distance le tube digestif. La méthode par ponction directe est donc indiquée et limite le nombre d'opérations. Une étude parue en avril 2007 a même démontré l'absence de difficulté lors du cathétérisme vésical en l'absence de gravité chez des modèles porcins lors de vols paraboliques [55]. Cela a pu être réalisé en utilisant des cathéters de type PigTail 10,3 Fr, sans blessure passive des organes adjacents. L'évacuation des urines se fera initialement de manière passive par hyperpression intra vésicale, puis de manière active par contraction détrusorienne.

d. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire :

- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Tubulure

- Seringue de 20cc
- Redon et tubulure
- Protège sonde

Description de la procédure :

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction (généralement quelques centimètres au dessus du pubis, sur la ligne médiane).
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Sous contrôle échographique, anesthésie locale des plans sous-cutanés
- 5) Ponction écho-guidée à l'aide d'un drain de 8,5 Fr, chargé du rigidificateur métallique
- 6) Retrait du rigidificateur métallique
- 7) Aspiration d'urine témoignant du passage au sein de la vessie
- 8) Connexion du drain avec le système d'aspiration
- 9) Fixation de la sonde à la peau par un fil de suture

J. Hématome

a. Rappels anatomiques et diagnostic

Les hématomes sont les témoins d'une plaie vasculaire, qu'elle soit artérielle ou veineuse, et peuvent être situés à n'importe quel endroit du corps. Nous considérerons ici les hématomes des parties molles, en particulier les hématomes intramusculaires.

Dans nos hôpitaux, la suspicion d'un hématome intra-musculaire se fait face à une déglobulisation et mène fréquemment à la réalisation d'un scanner. Celui-ci permet de localiser l'hématome mais également de déterminer s'il existe un saignement actif en son sein.

Plusieurs cas de figure se présentent alors :

- pas d'extravasation : traitement conservateur
- extravasation chez un patient sous anticoagulant, avec arrêt possible : tentative de traitement conservateur si le patient est stable hémodynamiquement
- extravasation chez un patient sous anticoagulant sans arrêt possible : embolisation
- extravasation chez un patient sans anticoagulant : embolisation

Dans la littérature, le drainage des hématomes n'est envisagé que dans quelques cas particuliers :

- une surinfection de l'hématome et apparition d'un abcès, suspecté par l'apparition d'une fièvre et de signes inflammatoires locaux, en cas d'inefficacité des antibiotiques
- l'apparition de signes de compression nerveuse, particulièrement documentée dans la littérature à propos des hématomes du muscle ilio-psoas chez les patients hémophiles [56]. Dans ce *case report*, une ponction a été nécessaire afin de limiter la compression sur le nerf fémoral chez un jeune patient symptomatique [57]. Le patient fut drainé grâce à un cathéter de type Pigtail de 8Fr. Les premières aspirations ne ramenèrent que 5 cc environ en raison du contenu très épais de l'hématome partiellement coagulé, mais les lavages itératifs ont permis la régression progressive en taille de l'hématome et des signes de compression neurologique.

Le diagnostic est facilement réalisable en échographie [58]. Plus l'hématome sera échogène, moins il sera évident de le ponctionner, du fait du caractère plus épais de la collection (Fig 23).

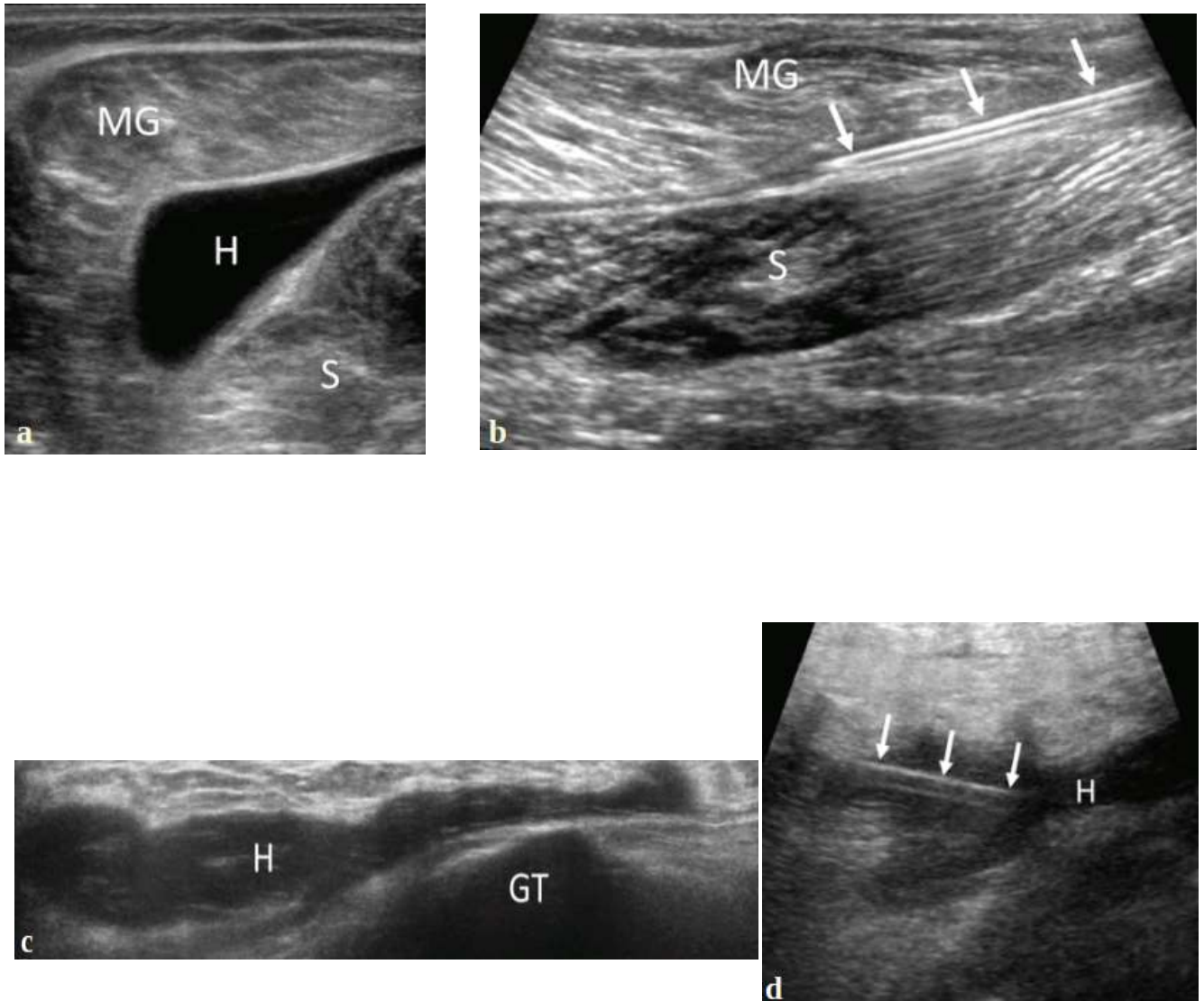


Fig 23. Ponction d'hématomes d'échogénicités différentes.

a. Hématome entre le chef médial du muscle gastrocnémien et le muscle soléaire, anéchogène, très liquidien et compressible sous la sonde d'échographie avant ponction. b. Après simple ponction. c. Hématome au sein de la bourse périrochantérienne, plus échogène, moins compressible sous la sonde avant ponction. d. En fin de ponction.

L'instillation de sérum salé isotonique a permis de ramener environ 40cc d'hématome en plus.

b. Drainage

Lors des futures missions extra-orbitaires, en cas d'hématome surinfecté, la priorité ira à l'antibiothérapie. Si cela est inefficace, un drainage sous contrôle échographique pourra alors être réalisé, aidé par de multiples lavages en cas de difficulté d'aspiration, comme cela a été démontré dans le *case-report* mentionné ci-dessus. La méthode de ponction directe dite du trocart apparaît indiquée en cas de ponction superficielle. Dans les cas difficiles, c'est à dire au sein de masses musculaires profondes, la méthode de Seldinger pourra être envisagée.

c. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire :

- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Tubulure
- Seringue de 20 cc
- Protège-sonde
- Redon et tubulure

Description de la procédure (en conditions simples) :

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction (en regard de l'hématome, à distance des structures vasculaires ou des organes abdominaux)
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Anesthésie locale des plans sous-cutanés et profonds sous contrôle échographique
- 5) Ponction écho-guidée à l'aide du drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- 6) Retrait du rigidificateur
- 7) Mise en place d'une seringue d'au moins 20 cc (meilleure aspiration qu'avec une petite seringue)
- 8) Aspiration de liquide plus ou moins épais confirmant le passage au sein de l'hématome
- 9) Aspiration de la plus grande quantité possible
- 10) Possibilité de lavages itératifs pour optimiser le drainage
- 11) Drain laissé en place afin de permettre des lavages les jours suivants
- 12) Connexion de la sonde avec le système d'aspiration
- 13) Fixation de la sonde à la peau par un fil de suture

IV. PROCÉDURES EN CONDITIONS SPÉCIFIQUES

Les procédures listées dans ce chapitre ne sont classiquement pas réalisées dans nos hôpitaux par des radiologues interventionnels. Ce sont des procédures de secours, proposées en alternative au geste de référence, généralement chirurgical, qui ne pourra être réalisé dans l'espace dans des conditions optimales.

A. Insuffisance rénale aiguë

a. Physiopathologie

Les reins, situés dans l'espace rétropéritonéal, participent au fonctionnement du corps à travers de nombreux rôles. Ils interviennent dans le maintien de l'osmolarité sanguine, dans l'équilibre acido-basique, ou encore dans l'équilibre des volumes corporels. Leur fonction filtrante est assurée par les glomérules, en contrôlant la concentration sanguine de multiples protéines et ions.

Les trois principaux mécanismes d'insuffisance rénale aiguë sont :

- les causes pré-rénales : par une diminution du volume sanguin vascularisant le rein, menant à sa dysfonction par défaut d'apport. Cette situation apparaît par exemple lors d'une hémorragie massive, ou lors d'une dysfonction cardiaque lors d'un état de choc
- les causes post-rénales : il existe ici un blocage dans l'excrétion d'urine, par un obstacle endoluminal (ex : calcul urétéral) ou extra-luminal (ex : compression par une tumeur)

- les atteintes rénales directes : lésions parenchymateuses par une infection, un médicament, une toxine ou encore une maladie auto-immune

b. Diagnostic

Le diagnostic se fait grâce à un prélèvement sanguin. Le KDIGO (*Kidney Disease Improval Global Outcomes*) définit l'insuffisance rénale aiguë par une augmentation de la créatinine sérique de plus de 0,3 mg/dL en 48 heures ou de plus de 1,5 fois la valeur initiale au cours des 7 derniers jours.

L'échographie est utile pour dépister les causes post-rénales, en révélant une dilatation des cavités pyélocalicielles et en permettant ensuite la pose d'une sonde de néphrostomie.

c. Rôle de la radiologie interventionnelle

Dans nos hôpitaux, en cas de dysfonction rénale aiguë et en attendant d'en avoir traité la cause, les patients ont accès à la dialyse, technique de suppléance de la fonction rénale.

Deux techniques de dialyse sont possibles. La première, l'hémodialyse, consiste à remplacer le rein par une machine. Le sang venant du patient est filtré par le système puis réinjecté dans le corps. Cette solution demande un matériel conséquent et est donc inenvisageable dans l'espace. La seconde solution est la dialyse péritonéale, qui

correspond à une filtration intra-corporelle du sang en utilisant le péritoine comme membrane semi-perméable. Une solution ionique, appelée le dialysat, est introduite au sein de la cavité péritonéale grâce à un cathéter. Les déchets sanguins vont traverser le péritoine qui est très vascularisé, et s'accumuler dans le dialysat, laissé en place quelques heures (entre 5 et 10 heures). Ce dernier est ensuite retiré via le cathéter puis remplacé le lendemain.

Cette dernière technique est particulièrement décrite dans l'insuffisance rénale chronique car elle améliore considérablement le niveau de vie des patients en leur évitant les séances d'hémodialyse répétées à l'hôpital. Cette méthode paraît aussi efficace dans l'insuffisance rénale aiguë [59].

La pose d'un cathéter de dialyse péritonéale est faisable par voie radiologique interventionnelle, et nécessitera l'utilisation d'un échographe et d'un capteur plan [60]. L'opérateur emploiera la technique de Seldinger afin de limiter le risque de perforation intestinale. On utilisera un guide à bout souple pour la même raison. L'absence initiale d'épanchement au sein de la cavité péritonéale nécessitera l'injection de quelques cc de produit de contraste iodé et un contrôle radiographique afin de s'assurer de l'absence de passage intra-digestif (Fig 24). C'est aussi en raison de cet absence d'épanchement que nous proposons pour plus de sûreté l'emploi d'une technique de Seldinger et non un drainage par ponction directe.

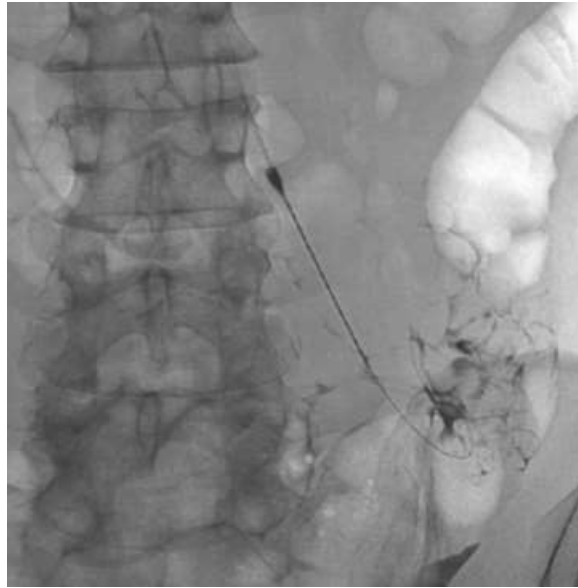


Fig 24. Le produit de contraste injecté sous scolie moule le tube digestif, témoignant du positionnement correct du microcathéter au sein de la cavité péritonéale [60].

En conditions hospitalières, le placement du cathéter se fait au sein du cul de sac de Douglas, notamment en raison de la stagnation du liquide péritonéal à cet endroit du fait de la déclivité. Pour simplifier la procédure dans nos conditions dégradées, et du fait de l'absence de déclivité, il semble envisageable de placer le cathéter de dialyse péritonéal à travers le même point de ponction que lors d'un drainage d'ascite, mais ceci reste à être exploré par des études ultérieures en gravité zéro.

Un deuxième point à explorer est l'accessibilité et le recyclage du dialysat. En effet, sa disponibilité n'est pas un frein en conditions hospitalières. Néanmoins, lors d'une mission vers Mars, tous les solutés seront limités, du fait de contraintes évidentes de poids et de volume. Des systèmes de génération de solutés de perfusion à l'aide d'eau de boisson sont actuellement à l'étude sur l'ISS. Des études ultérieures permettront peut être de se servir de ces systèmes pour générer ou recycler le dialysat nécessaire.

c. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire :

- Drain PigTail de 8 Fr – 25 cm, avec son rigidificateur métallique
- Tubulure
- Aiguille de YUEH
- Protège-sonde
- Redon et tubulure
- Guide hydrophile
- Dilatateur de 7 Fr
- Produit de contraste

Description de la procédure :

- 1) Installation du patient en décubitus dorsal, par exemple dans le CMRS
- 2) Désinfection des plans cutanés de la zone de ponction, notamment en fosse iliaque gauche sur la ligne joignant l'épine iliaque antéro-supérieure à l'ombilic, sur son tiers externe
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Anesthésie des plans sous-cutanés et profonds sous contrôle échographique
- 5) Ponction écho-guidée à l'aide du drain de YUEH
- 6) Retrait de l'aiguille métallique, le drain restant en place
- 7) Contrôle scopique après injection de quelques cc de produit de contraste pour vérifier l'absence de passage intra-digestif
- 8) Mise en place dans le drain d'un guide hydrophile
- 9) Retrait du drain de YUEH

- 10) Moucheture à la peau
- 11) Mise en place sur le guide d'un dilatateur de 7Fr
- 12) Retrait du dilatateur
- 13) Mise en place du drain de 8Fr, monté sur son rigidificateur
- 14) Retrait du rigidificateur
- 15) Nouvelle injection de quelques cc de produit de contraste pour vérifier l'absence de passage intra-digestif
- 16) Fixation de la sonde à la peau par un point de suture
- 17) Sonde connectée à une poche de dialysat, autour de laquelle est gonflée un brassard pour faciliter l'injection intra-péritonéale sous pression malgré l'absence de pesanteur
- 18) Le liquide est laissé en place 5 à 10 heures puis retiré de la cavité péritonéale (grâce à la sonde et au système d'aspiration)

B. Occlusion intestinale

a. Rappels physiopathologiques

L'occlusion intestinale est l'impossibilité pour le bol alimentaire de progresser au sein du tube digestif, qu'il s'agisse de l'intestin grêle ou du colon. Les principales causes d'occlusion sont les adhérences (survenant généralement après une chirurgie abdominale), les hernies, les maladies inflammatoires du tube digestif, les volvulus et le cancer. Sans traitement, les portions intestinales en occlusion peuvent nécroser, se perforer menant à une péritonite puis au décès dans des cas extrêmes.

b. Diagnostic

Le diagnostic initial est en général clinique, associant douleur abdominale, arrêt des matières et des gaz, nausées ou vomissements et météorisme abdominal.

De nos jours, en cas de suspicion d'occlusion, un scanner abdomino-pelvien est réalisé, permettant à la fois le diagnostic positif d'occlusion mais également le diagnostic étiologique. Le cliché d'abdomen sans préparation historiquement réalisé n'est plus utilisé de nos jours, mais sera le moyen diagnostique de référence au cours des missions extraorbitaires, où l'imagerie en coupes n'est pas accessible. Ce cliché radiographique révèle en cas d'occlusion une distension hydro-aérique du tube digestif (colon ou anses grêles selon le niveau de l'occlusion) avec parfois des niveaux individualisés lorsque le patient est procubitus. Il est à noter qu'en l'absence de pesanteur, ces niveaux ne seront probablement pas présents, s'assimilant alors à un ASP couché (Fig 25).



Fig 25. ASP de face en décubitus.

Syndrome occlusif colique.

L'échographie a peu de place dans le diagnostic, mais permet de visualiser les anses dilatées en cas de contenu liquidien (Fig 26).



Fig 26. Anses grêles dilatées en échographie, à contenu essentiellement liquidien [61]

c. Rôle de la radiologie interventionnelle

En général, le patient atteint d'un syndrome occlusif de cause mécanique représente une urgence thérapeutique. En l'absence de signe de gravité sur le scanner, un traitement médical peut être tenté, par mise en place d'une sonde nasogastrique en aspiration et test à la Gastrograffine. Si des signes de gravité sont présents, une chirurgie en urgence est considérée afin de lever l'obstacle et éventuellement de procéder à une exérèse de l'intestin nécrosé.

Dans un contexte de soins palliatifs, chez des patients non opérables, des techniques de gastrostomie et de cœcostomie de décompression ont été décrites, et pourraient être

réalisées dans les missions extra-orbitaires. La gastrostomie est une alternative à la sonde nasogastrique non indiquée au long cours. Les occlusions basses pourront être dérivées de manière efficace par une sonde placée au niveau du cæcum, évitant ainsi les complications liées à la distension digestive [62]. Une des complications à craindre est la fuite de matières fécales au niveau du péritoine en regard de l'orifice de stomie, mais la pexie à la peau en limite le risque.

d. Description détaillée du geste

Matériel nécessaire :

- kit de gastrostomie
- protège sonde
- poche d'évacuation et tubulure

On peut imaginer la procédure comme suit :

- 1) Installation du patient en décubitus au sein du CMRS
- 2) Désinfection des tissus mous en regard de la zone de ponction localisée en fosse iliaque droite
- 3) Mise en place d'un protège sonde afin de garantir l'asepsie lors de la ponction
- 4) Repérage échographique du cæcum dilaté et du point de ponction, avec anesthésie locale des plans sous-cutanés
- 5) Mise en place d'une pexie à l'aide de deux ou trois ancrs de gastrostomie, dont la position sera vérifiée avant largage par injection in situ de quelques cc de produit de contraste, et contrôle radiographique

- 6) Ponction du cæcum à l'aide de l'aiguille fournie dans le kit
- 7) Mise en place d'un guide 0,035"
- 8) Dilatation progressive du trajet à l'aide du dilatateur « accordéon » fournit dans le kit
- 9) Descente de la sonde de gastrostomie
- 10) Vérification de la position de la sonde par injection in situ de quelques cc de produit de contraste et contrôle radiographique
- 11) Inflation du ballonnet à l'aide de 8cc d'eau ppi
- 12) Branchement de la sonde à une poche, l'évacuation se faisant par évacuation spontanée sous la pression au sein du cæcum (en cas de valvule iléo-caecale compétente)

C. Hématomes intra-crâniens

a. Rappels anatomiques

L'hématome extra-dural est causé par un saignement situé entre la dure-mère (une des enveloppes méningée du cerveau) et l'os (Fig 27). L'hématome sous-dural est causé par un saignement situé entre la dure-mère et le cerveau lui-même. De petite taille, ils peuvent n'avoir aucune conséquence. S'ils sont volumineux, ces hématomes peuvent être responsables d'un effet de masse sur le parenchyme cérébral adjacent, voire mener à un engagement cérébral.

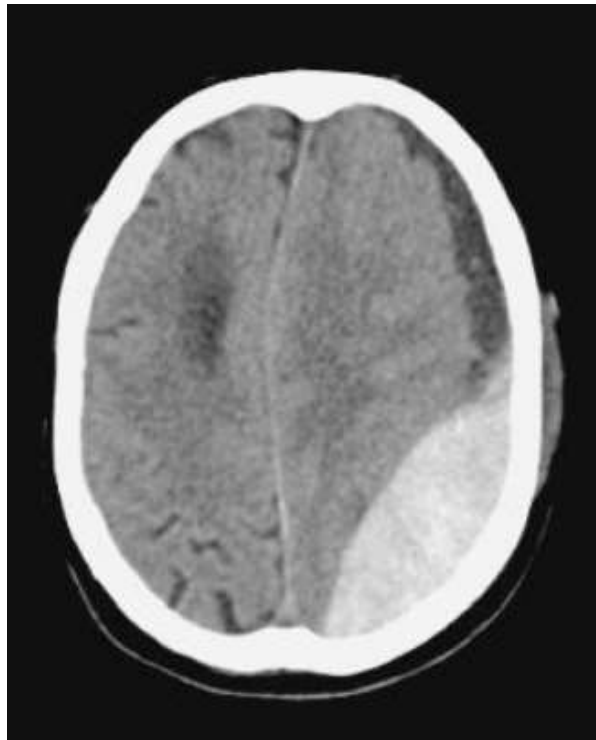


Fig 27. Exemple d'hématome extra-dural (collège de radiologie)

b. Diagnostic

Le scanner cérébral sans injection est le *gold standard* pour le diagnostic d'hémorragie intracérébrale, avec une excellente sensibilité et spécificité, mais il ne sera malheureusement pas disponible lors des vols extra-orbitaires. Il apparaît toutefois possible chez de nombreux patients d'obtenir une imagerie dégradée du parenchyme cérébral par échographie [63]. Cette étude a démontré la présence d'une fenêtre acoustique osseuse suffisante à la visualisation du parenchyme chez 126 patients, sur un total de 151. Dans cet article, ceci est illustré par la visualisation d'un hématome extra-dural chez un jeune patient de 24 ans après un accident de la voie publique (Fig 28).

Concernant les vols extra-orbitaires, des tests pourraient être réalisés sur Terre lors de la préparation des missions afin de déterminer si les astronautes sélectionnés possèdent une fenêtre acoustique suffisante. Cela permettrait également au(x) médecin(s) en charge de s'entraîner à cette méthode diagnostique peu commune.

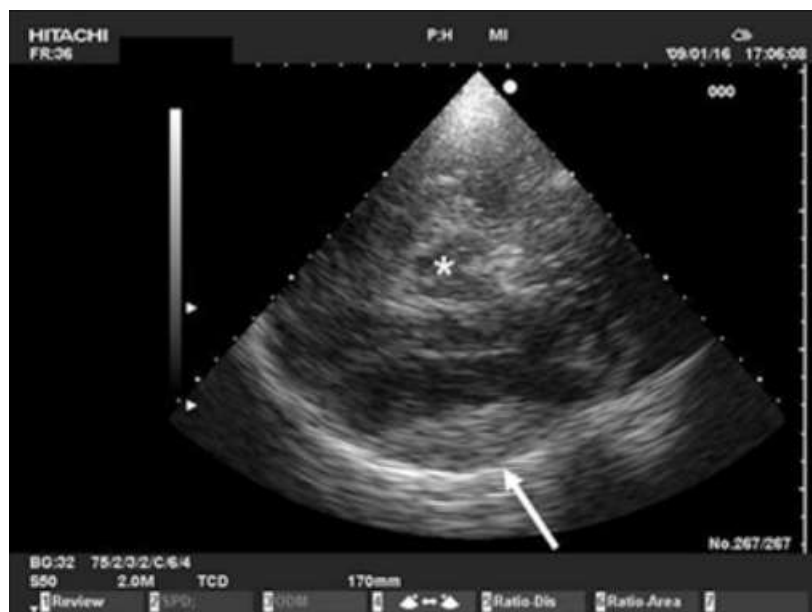


Fig 28. Hématome extra-dural en échographie (flèche). L'astérisque montre le mésencéphale [63].

c. Place de la radiologie interventionnelle

L'hématome visualisé en échographie dans l'article cité précédemment n'a pas été opéré car pauci-symptomatique. S'il était plus volumineux, l'urgence aurait été son évacuation, afin d'éviter la compression sous-jacente du cerveau. Une neurochirurgie avec volet, constituant le traitement de référence, paraît inenvisageable dans l'espace pour le

moment. En revanche, une étude réalisée en avril 2020 sur des cadavres a montré que les kits de pose de voie vasculaire intra-osseuse peuvent être utilisés dans cette indication, notamment dans les milieux pauvres en ressources [64]. Ainsi, après repérage en échographie et grâce à ce kit, il paraît envisageable d'évacuer, tout au moins en partie, les hématomes péri-cérébraux en attendant une éventuelle prise en charge neurochirurgicale si cela est possible rapidement.

Il est à noter qu'une procédure similaire paraît réalisable également avec un empyème, c'est à dire une collection purulente péricérébrale.

D. Ponction lombaire

La ponction lombaire est un geste diagnostique très important, devant être maîtrisée par tout médecin. Les indications en urgence sont nombreuses : suspicion d'une infection du système nerveux central, recherche d'hémorragie méningée ou encore lors de la réalisation de rachianesthésies par exemple.

Habituellement, le patient est installé en décubitus latéral ou assis sur le bord du lit, avec le dos rond afin d'ouvrir les espaces intervertébraux, et le médecin procédera à une ponction en regard du milieu de la ligne reliant les bords supérieurs des crêtes iliaques. La ponction se fait généralement aux étages L3-L4, L4-L5 et L5-S1, à l'aide d'une aiguille de calibre 22 gauges au maximum.

Ce geste ne nécessite pas d'imagerie, sauf dans les cas difficiles. Il apparaît peu probable que ces circonstances surviennent lors des missions extra-orbitaires, mais la ponction peut être facilitée par l'utilisation de l'échographe.

Le principal rôle de l'échographie sera de localiser correctement la ligne médiane et les espaces inter-épineux, après plusieurs échecs de ponction (Fig 29). Ce repérage peut également être réalisé en radiographie de profil.

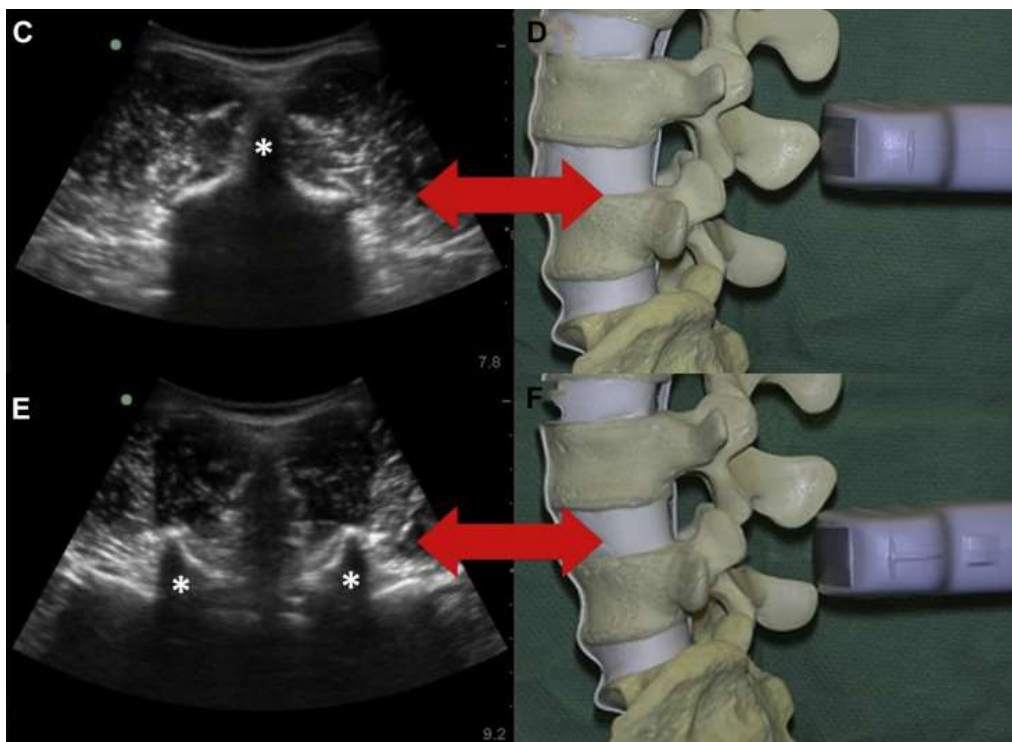


Fig 29. Repérage échographique pour ponction lombaire [65].

L'astérisque de l'image C représente le processus épineux. Les astérisques de l'image D représentent les massifs articulaires postérieurs lorsque la sonde est dans l'espace interépineux.

E. Blocs nerveux périphériques

Les blocs anesthésiques consistent à instiller l'anesthésiant au sein d'un espace anatomique permettant de maintenir le produit au contact des nerfs périphériques de la région à opérer, rendant le geste indolore. Cela permet également d'assurer une analgésie post-opératoire plusieurs heures après le geste. Cette technique présente un avantage

certain dans l'espace car elle permet d'éviter une anesthésie générale, en cas d'intervention sur un membre par exemple.

Dans nos hôpitaux, les blocs nerveux périphériques sont habituellement réalisés par les anesthésistes, sous guidage échographique et stimulation nerveuse de faible intensité (Fig 30).

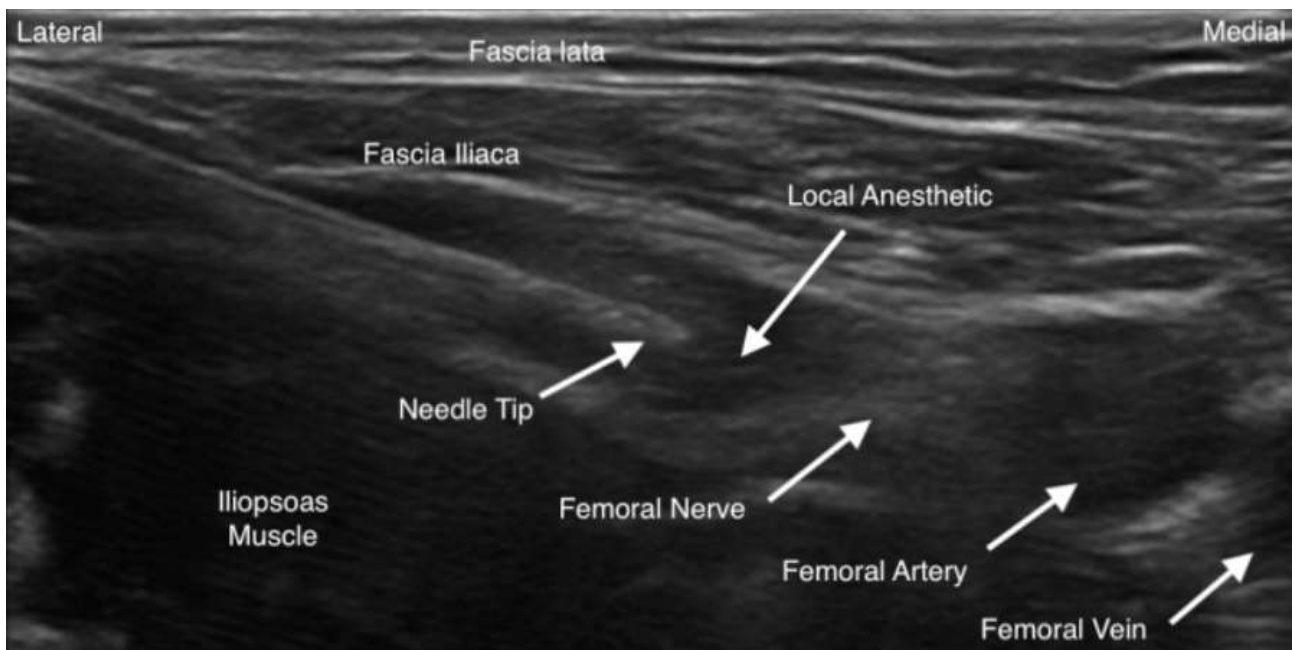


Fig 30. Bloc fémoral sous contrôle échographique.

Source : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK546704/>

V. INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

A. IV Fluid Generation

Depuis plusieurs dizaines d'années, la NASA cherche à fabriquer un appareil permettant de produire des solutés stériles destinés au remplissage vasculaire à partir d'eau de boisson. Le système IV-GEN fût ainsi envoyé et utilisé avec succès sur l'ISS en Mai 2010 (Fig 31).

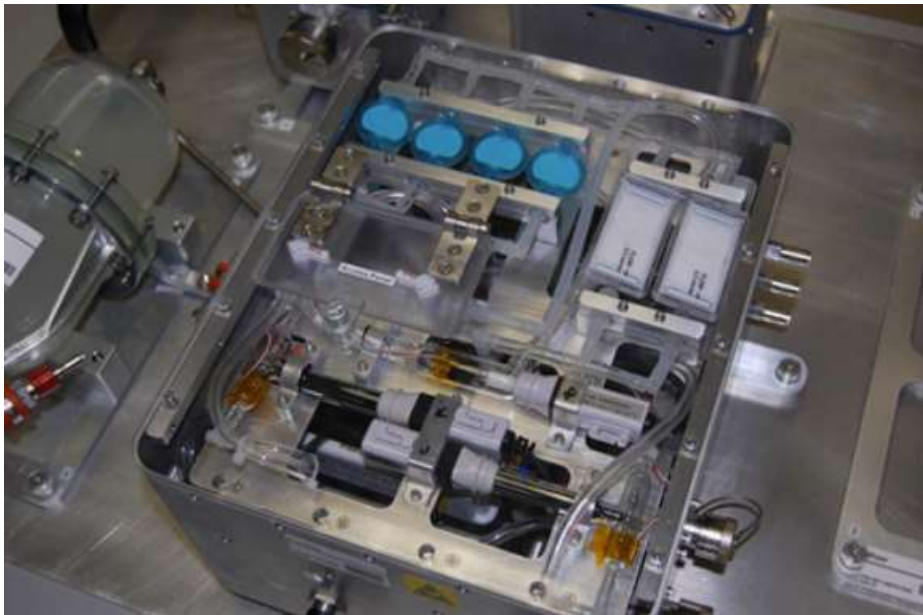


Fig 31. Système IV-GEN à bord de l'ISS

Source : <https://www1.grc.nasa.gov/space/human-research-program/exploration-medical-technologies/iv-fluid-generation/>

Les recherches actuelles visent à miniaturiser ce système afin qu'il puisse être embarqué lors des missions extra-orbitaires.

Nous avons également vu dans le chapitre « Insuffisance rénale aiguë » qu'il serait très utile de pouvoir utiliser un système similaire, afin de générer ou recycler du dialysat en cas de nécessité de dialyse péritonéale.

B. Système CAMDASS et imagerie pré-mission

a. Imagerie avant le départ

Lors du processus de sélection des astronautes, des imageries (scanner corps entier et IRM cérébrale) sont réalisées, afin de dépister une éventuelle pathologie pouvant survenir lors des missions, à distance des structures hospitalières. Des explorations encore plus poussées sont réalisées après l'étape de sélection.

Avec les technologies actuelles, notamment de réalité augmentée, il apparaît envisageable de se servir de ces imageries comme d'une cartographie du corps pouvant être utilisée lors d'éventuels gestes de radiologie interventionnelle. Le fait de connaître à l'avance les particularités anatomiques de chaque astronaute est un avantage majeur. Il est préférable de découvrir sur Terre la présence d'une variante anatomique plutôt que dans l'espace en conditions d'urgence.

b. Système CAMDASS

Le système CAMDASS (*Computer Assisted Medical Diagnosis ans Surgery System*) est un prototype de réalité augmentée créé par l'ESA pour améliorer la prise en charge médicale dans l'espace (Fig 32). Il permet de faciliter la réalisation de l'échographie aux médecins non radiologues, grâce à des recommandations qui sont projetées directement dans les lunettes qu'il porte. Il lui sera par exemple indiqué l'endroit où il doit positionner sa sonde pour visualiser de manière optimale une structure, et l'angle de balayage qu'il doit appliquer. Ce système a été testé et validé à l'Hôpital Universitaire Saint-Pierre de Bruxelles, facilitant la réalisation d'échographies relativement difficiles par des opérateurs inexpérimentés.

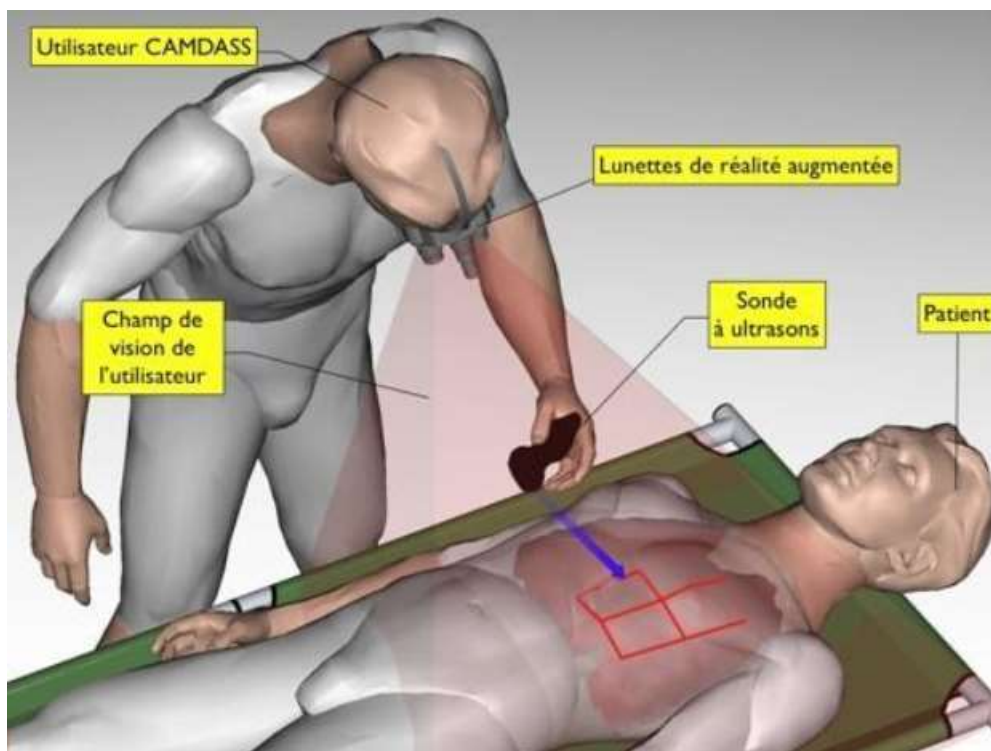


Fig 32. Illustration du système CAMDASS.

Source : https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2012/01/CAMDASS

Pour l'instant, ce système permet de faciliter la réalisation d'échographies. Cependant, on peut imaginer le téléchargement au sein du système les imageries réalisées avant la mission, qu'il s'agisse d'échographies mais aussi de scanners ou d'IRM, afin de faciliter la réalisation des ponctions. Si la navigation endovasculaire est envisageable (voire infra), superposer les images du scanner préopératoire injecté à la navigation faciliterait considérablement le geste.

C. Systèmes de guidage pour procédures endovasculaire

a. Présentation du concept



Fig 33. Système de guidage Teleflex

Ce système a été mis au point par le distributeur de matériel médical ARROW, afin de permettre la mise en place de PICClines et Midlines, qui sont des voies veineuses, directement au lit du patient. Un capteur est mis en place sur le torse de ce dernier, et

permet grâce à un *tracking* électromagnétique, le suivi de la position du cathéter sur le moniteur (Fig 33). La ponction veineuse est faite de manière traditionnelle sous contrôle échographique. Ce système de navigation a pour principal intérêt de s'affranchir de scopie.

Un autre système de guidage endovasculaire, mis au point par Phillips, a été conçu spécifiquement pour la navigation au sein de vaisseaux tortueux. Il s'agit du système *Fiber Optic RealShape* (FORS) [66]. Il fonctionne par l'envoi au travers du matériel (sondes et guides avec fibres optiques) de multiples impulsions lumineuses, analysées à leur retour par le système et donnant précisément la localisation du matériel au sein du vaisseau, et ce dans les trois dimensions (Fig 34). La réalisation d'une imagerie en amont de l'intervention permet de suivre facilement la progression du matériel de cathétérisme au sein des vaisseaux, sans utiliser de scopie continue.

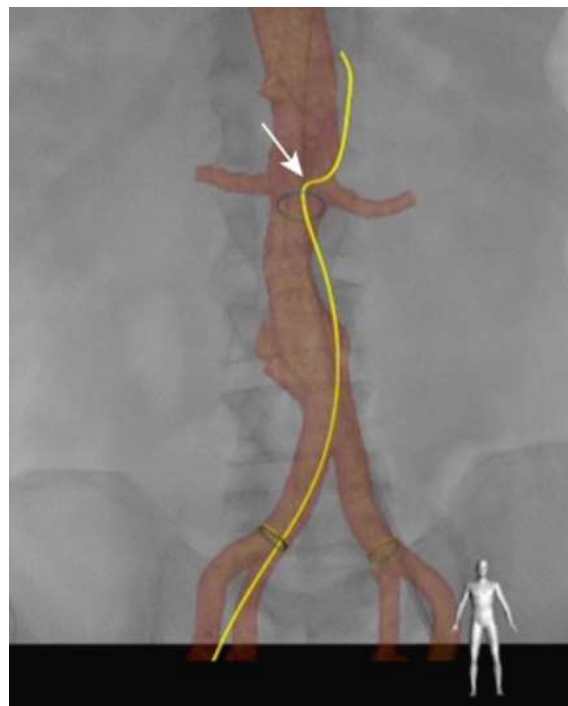


Fig 34. Système FORS utilisé pour la navigation endovasculaire, sans scopie continue [66]

b. Développement potentiel

L'utilisation de tels systèmes de guidage paraît intéressant au cours des missions extra-orbitaires. Cela permettrait d'accéder, en l'absence de contrôle scopique, à des gestes d'embolisation de faible difficulté. Le traumatisme du bassin, possible lors des missions d'exploration, en constitue un bon exemple. La procédure pourrait être ainsi facilitée par l'utilisation du système CAMDASS, préalablement chargé avec les images du scanner thoraco-abdomino-pelvien du patient réalisé sur Terre.

On pourrait imaginer une telle procédure comme suit :

- 1) Installation du patient dans le système CMRS
- 2) Mise en place sur le pelvis du patient du module de guidage électromagnétique (TELEFLEX) ou par fibres optiques (FORS)
- 3) Désinfection des plans cutanés situés au pli inguinal droit et gauche (éventualité d'une double ponction)
- 4) Mise en place d'une protection sur la sonde d'échographie afin de garantir l'asepsie
- 5) Anesthésie locale sous contrôle échographique des plans cutanés et profonds jusqu'à l'artère fémorale commune droite
- 6) Ponction de l'artère fémorale commune droite sous contrôle échographique
- 7) Mise en place dans l'artère d'un guide hydrophile de navigation
- 8) Retrait de l'aiguille et mise en place d'un introducteur
- 9) Retrait du dilateur
- 10) Retrait du guide

- 11) Montée d'une sonde de cathétérisme (avec fibre optique si système FORS), chargée avec le guide électromagnétique situé à l'extrémité de la sonde (système TELEFLEX) ou guide à fibre optique (système FORS)
- 12) Cross-over puis cathétérisme de l'artère hypogastrique
- 13) Vérification de la bonne position du cathéter au sein de l'artère grâce à l'injection in-situ de produit de contraste iodé et contrôle radiographique
- 14) Embolisation à l'aide de CURASPON
- 15) Retrait du matériel
- 16) Compression du pli inguinal droit pendant environ 10 minutes afin d'éviter un hématome du point de ponction
- 17) La même procédure est réalisée du côté gauche

On pourrait imaginer une procédure similaire avec un traumatisme splénique par exemple.

VI. DISCUSSION

Le modèle de trousse de radiologie interventionnelle proposée par l'équipe MANOLIM se veut d'une utilisation la plus simple possible, en partant du postulat qu'elle sera facilement utilisable par tout médecin entraîné. Cela est basé sur un unique matériel de drainage, qui peut être utilisé selon soit la méthode du trocart, soit la technique de Seldinger. Si ce modèle de trousse est choisi, une étude plus poussée pourrait être menée concernant le temps de formation nécessaire pour sa maîtrise satisfaisante par un médecin non radiologue interventionnel. Cette étude pourrait également être menée lors de vols paraboliques, ce qui permettrait également de tester les différentes procédures en contexte réel de microgravité.

Cette trousse a été conçue pour être polyvalente, légère, et facile à utiliser, qualités nécessaires au matériel médical qui sera embarqué dans l'espace. On peut cependant imaginer son emploi dans d'autres milieux, pauvres en ressources médicales et à distance de centre de soins, comme sur des navires ou encore en opération militaire. Une autre possibilité d'utilisation pourrait être au sein d'hôpitaux de pays en développement. Une étude sur l'embolisation par des morceaux de fils de suture non résorbables, l'étude FAIR-Embo [67], menée par le Pr Vidal, a démontré tout l'intérêt d'adapter matériel et protocoles dans ces structures hospitalières limitées en ressources. La possibilité d'une embolisation efficace de différentes artères par ces morceaux de fils (artère mésentérique, artère splénique, artère rénale, etc..) en remplacement des coils est d'ailleurs particulièrement intéressante. En effet, nous n'avons abordé que brièvement au travers du saignement par fracture du bassin la question des agents d'embolisation. Le Curaspon semble être un bon choix, du fait de son faible coût, de sa légèreté et de sa polyvalence. Si toutefois celui-ci

n'est pas ou plus disponible, des morceaux de fils non résorbables, présents dans la boîte de chirurgie, pourront être utilisés.

Il existe plusieurs limites à ce travail. La plus importante d'entre elles est que les procédures n'ont, pour la plupart, pas été testées hors conditions terrestres, que ce soit en piscine ou lors de vols paraboliques. Elles ont toutefois été pensées dans ce but avec par exemple l'utilisation du CMRS pour maintenir patient et opérateur ou encore aspiration à l'aide d'un redon exerçant une faible pression négative dans le but de palier à l'absence de gravité. La revue systématique de la littérature a toutefois fait la preuve du succès de certaines de ces procédures en conditions de micropesanteur, notamment pour le drainage pleural [42] ou encore le drainage péritonéal [52].

Une deuxième limite porte sur l'utilisation lors du challenge de matériel déjà existant. En effet, il n'était pas possible de proposer l'usage d'instruments en cours de conception ou de les fabriquer nous même. La technologie avançant de plus en plus rapidement, quelques années suffisent à la réalisation de gigantesques progrès scientifiques, et ce qui est valable aujourd'hui ne le sera peut-être plus demain. Nous nous sommes ici efforcés de proposer l'utilisation de technologies innovantes. Par exemple, les systèmes de réalité augmentée ne sont plus du domaine de la science fiction, et sont utilisés dans de nombreux secteurs au quotidien (bâtiment, aéronautique etc..). L'utilisation du système CAMDASS, s'il est couplé aux imageries en coupes réalisées avant le départ permettra, grâce à un guidage par fibre optique tel que celui proposé par Phillips, l'embolisation dans l'espace.

Une troisième limite est notre absence de connaissance du contenu prévu de la boîte de chirurgie lors des prochaines missions (présence d'un redon ? Produit de contraste?). Cela aurait pu nous permettre d'adapter encore plus notre trousse de radiologie interventionnelle.

VII. CONCLUSION

Ce travail, par l'intermédiaire d'une compréhension de la physiologie humaine dans l'espace, et d'une revue la plus exhaustive possible de la littérature dans ce domaine, a pour but de produire une trousse de radiologie interventionnelle légère, compacte, facile d'utilisation et polyvalente. Ceci répond au challenge MITBO lancé lors des JFR 2021, à la demande du CNES, afin d'aider à la prise en charge médicale lors des prochaines missions spatiales, notamment lors de vols extra-orbitaires, qui ne sont, de nos jours, plus du ressort de la science fiction.

En effet, nous avons vu que les astronautes sur l'ISS peuvent être rapidement rapatriés sur Terre en cas de nécessité. La communication est également facile, avec peu de délai de transmission, permettant l'utilisation de procédés de télé-médecine et de télé-consultation, ce qui ne sera pas réalisable lors des vols extra-orbitaires lointains.

La radiologie interventionnelle apparaît alors comme une solution thérapeutique idéale à de multiples égards. Le matériel embarqué est peu encombrant, facile d'utilisation en cas de formation au préalable, ne nécessite pas la réalisation d'anesthésie générale et limite au minimum l'effraction cutanée.

La trousse que nous avons réalisé avec l'équipe MANOLIM se veut la plus simple d'utilisation. Son but premier est d'être aisément employée aussi bien par un radiologue interventionnel que par un médecin d'une autre spécialité.

La deuxième partie de ce travail a permis d'envisager des procédures de radiologie interventionnelle pour des actes habituellement traités par chirurgie sur Terre. Nous avons

imaginé des modèles de prise en charge d'une insuffisance rénale aigue, d'une occlusion ou encore d'un hématome extra-dural, en s'aidant des technologies à la pointe du développement, tout en étant, selon nous, réalisables.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- [1].....A. Van Ombergen *et al.*, 'The effect of spaceflight and microgravity on the human brain', *J. Neurol.*, vol. 264, no. S1, pp. 18–22, Oct. 2017, doi: 10.1007/s00415-017-8427-x.
- [2]....K. A. Kirsch, F. J. Baartz, H. C. Gunga, and L. Röcker, 'Fluid shifts into and out of superficial tissues under microgravity and terrestrial conditions', *Clin. Investig.*, vol. 71, no. 9, pp. 687–689, Sep. 1993, doi: 10.1007/BF00209721.
- [3]....J. Vernikos, 'Human physiology in space', *BioEssays News Rev. Mol. Cell. Dev. Biol.*, vol. 18, no. 12, pp. 1029–1037, Dec. 1996, doi: 10.1002/bies.950181215.
- [4].....D. E. Watenpaugh, 'Fluid volume control during short-term space flight and implications for human performance', *J. Exp. Biol.*, vol. 204, no. Pt 18, pp. 3209–3215, Sep. 2001, doi: 10.1242/jeb.204.18.3209.
- [5].....C. S. Leach *et al.*, 'Regulation of body fluid compartments during short-term spaceflight', *J. Appl. Physiol. Bethesda Md 1985*, vol. 81, no. 1, pp. 105–116, Jul. 1996, doi: 10.1152/jappl.1996.81.1.105.
- [6]....L. Rice and C. P. Alfrey, 'Modulation of red cell mass by neocytolysis in space and on Earth', *Pflugers Arch.*, vol. 441, no. 2-3 Suppl, pp. R91-94, 2000, doi: 10.1007/s004240000333.
- [7].....M. A. Perhonen *et al.*, 'Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight', *J. Appl. Physiol. Bethesda Md 1985*, vol. 91, no. 2, pp. 645–653, Aug. 2001, doi: 10.1152/jappl.2001.91.2.645.
- [8]....M. W. Bungo, D. J. Goldwater, R. L. Popp, and H. Sandler, 'Echocardiographic evaluation of space shuttle crewmembers', *J. Appl. Physiol. Bethesda Md 1985*, vol. 62, no. 1, pp. 278–283, Jan. 1987, doi: 10.1152/jappl.1987.62.1.278.
- [9]M. Shen and W. H. Frishman, 'Effects of Spaceflight on Cardiovascular Physiology and Health', *Cardiol. Rev.*, vol. 27, no. 3, pp. 122–126, May 2019, doi: 10.1097/CRD.0000000000000236.
- [10]...M. B. Sides *et al.*, 'The Bellagio Report: Cardiovascular risks of spaceflight: implications for the future of space travel', *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 76, no. 9, pp. 877–895, Sep. 2005.
- [11]. G. K. Prisk, 'Microgravity and the respiratory system', *Eur. Respir. J.*, vol. 43, no. 5, pp. 1459–1471, May 2014, doi: 10.1183/09031936.00001414.
- [12]...G. K. Prisk, A. R. Elliott, H. J. Guy, J. M. Kosonen, and J. B. West, 'Pulmonary gas exchange and its determinants during sustained microgravity on Spacelabs SLS-1 and SLS-2', *J. Appl.*

- Physiol. Bethesda Md* 1985, vol. 79, no. 4, pp. 1290–1298, Oct. 1995, doi: 10.1152/jappl.1995.79.4.1290.
- [13]G. K. Prisk, ‘Microgravity and the lung’, *J. Appl. Physiol. Bethesda Md* 1985, vol. 89, no. 1, pp. 385–396, Jul. 2000, doi: 10.1152/jappl.2000.89.1.385.
- [14].....J. L. Homick, ‘Space motion sickness’, *Acta Astronaut.*, vol. 6, no. 10, pp. 1259–1272, Oct. 1979, doi: 10.1016/0094-5765(79)90119-x.
- [15]....A. G. Lee, T. H. Mader, C. R. Gibson, and W. Tarver, ‘Space Flight-Associated Neuro-ocular Syndrome’, *JAMA Ophthalmol.*, vol. 135, no. 9, pp. 992–994, Sep. 2017, doi: 10.1001/jamaophthalmol.2017.2396.
- [16].....S. Genah, M. Monici, and L. Morbidelli, ‘The Effect of Space Travel on Bone Metabolism: Considerations on Today’s Major Challenges and Advances in Pharmacology’, *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, no. 9, p. 4585, Apr. 2021, doi: 10.3390/ijms22094585.
- [17].....G. Clément and A. Buckley, *Artificial Gravity*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [18].....A. LeBlanc *et al.*, ‘Muscle volume, MRI relaxation times (T2), and body composition after spaceflight’, *J. Appl. Physiol. Bethesda Md* 1985, vol. 89, no. 6, pp. 2158–2164, Dec. 2000, doi: 10.1152/jappl.2000.89.6.2158.
- [19].....V. Liakopoulos, K. Leivaditis, T. Eleftheriadis, and N. Dombros, ‘The kidney in space’, *Int. Urol. Nephrol.*, vol. 44, no. 6, pp. 1893–1901, Dec. 2012, doi: 10.1007/s11255-012-0289-7.
- [20].....N. Ciftçioğlu, R. S. Haddad, D. C. Golden, D. R. Morrison, and D. S. McKay, ‘A potential cause for kidney stone formation during space flights: enhanced growth of nanobacteria in microgravity’, *Kidney Int.*, vol. 67, no. 2, pp. 483–491, Feb. 2005, doi: 10.1111/j.1523-1755.2005.67105.x.
- [21]....J.-Q. Yang *et al.*, ‘The effects of microgravity on the digestive system and the new insights it brings to the life sciences’, *Life Sci. Space Res.*, vol. 27, pp. 74–82, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.lssr.2020.07.009.
- [22]..R. L. Summers, S. L. Johnston, T. H. Marshburn, and D. R. Williams, ‘Emergencies in space’, *Ann. Emerg. Med.*, vol. 46, no. 2, pp. 177–184, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.annemergmed.2005.02.010.
- [23].....M. ElGindi *et al.*, ‘May the Force Be with You (Or Not): The Immune System under Microgravity’, *Cells*, vol. 10, no. 8, p. 1941, Jul. 2021, doi: 10.3390/cells10081941.
- [24].....I. S. Saluja *et al.*, ‘Survey of astronaut opinions on medical crewmembers for a mission to Mars’, *Acta Astronaut.*, vol. 63, no. 5, pp. 586–593, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.actaastro.2008.05.002.

- [25].....P. D. Hodkinson, R. A. Anderton, B. N. Posselt, and K. J. Fong, 'An overview of space medicine', *Br. J. Anaesth.*, vol. 119, pp. i143–i153, Dec. 2017, doi: 10.1093/bja/aex336.
- [26]....M. R. Campbell, 'A review of surgical care in space', *J. Am. Coll. Surg.*, vol. 194, no. 6, pp. 802–812, Jun. 2002, doi: 10.1016/s1072-7515(02)01145-6.
- [27]M. Komorowski, S. D. Watkins, G. Lebuffe, and J. B. Clark, 'Potential anesthesia protocols for space exploration missions', *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 84, no. 3, pp. 226–233, Mar. 2013, doi: 10.3357/ase.m.3427.2013.
- [28]..J. Hinkelbein *et al.*, 'Cardiopulmonary resuscitation (CPR) during spaceflight - a guideline for CPR in microgravity from the German Society of Aerospace Medicine (DGLRM) and the European Society of Aerospace Medicine Space Medicine Group (ESAM-SMG)', *Scand. J. Trauma Resusc. Emerg. Med.*, vol. 28, no. 1, p. 108, Nov. 2020, doi: 10.1186/s13049-020-00793-y.
- [29]. P. B. Hamm, A. E. Nicogossian, S. L. Pool, M. L. Wear, and R. D. Billica, 'Design and current status of the longitudinal study of astronaut health', *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 71, no. 6, pp. 564–570, Jun. 2000.
- [30]...J. A. Rock, 'An expandable surgical chamber for use in conditions of weightlessness', *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 55, no. 5, pp. 403–404, May 1984.
- [31]....M. R. Campbell, R. D. Billica, and S. L. Johnston, 'Surgical bleeding in microgravity', *Surg. Gynecol. Obstet.*, vol. 177, no. 2, pp. 121–125, Aug. 1993.
- [32]....E. M. Targarona, 'Hand-Assisted Laparoscopic Surgery', *Arch. Surg.*, vol. 138, no. 2, p. 133, Feb. 2003, doi: 10.1001/archsurg.138.2.133.
- [33]....T. J. Broderick, M. B. Privitera, S. E. Parazynski, and M. Cuttino, 'Simulated Hand-Assisted Laparoscopic Surgery (HALS) in Microgravity', *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.*, vol. 15, no. 2, pp. 145–148, Apr. 2005, doi: 10.1089/lap.2005.15.145.
- [34]..M. R. Campbell, D. R. Williams, J. C. Buckey, and A. W. Kirkpatrick, 'Animal surgery during spaceflight on the Neurolab Shuttle mission', *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 76, no. 6, pp. 589–593, Jun. 2005.
- [35].....L. Panait, R. C. Merrell, A. Rafiq, S. J. Dudrick, and T. J. Broderick, 'Virtual reality laparoscopic skill assessment in microgravity', *J. Surg. Res.*, vol. 136, no. 2, pp. 198–203, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.jss.2006.05.026.
- [36].J. M. Davidson, A. M. Aquino, S. C. Woodward, and W. W. Wilfinger, 'Sustained microgravity reduces intrinsic wound healing and growth factor responses in the rat', *FASEB J. Off. Publ. Fed. Am. Soc. Exp. Biol.*, vol. 13, no. 2, pp. 325–329, Feb. 1999, doi: 10.1096/fasebj.13.2.325.

- [37] A. P. Kansagra and T. S. Shute, 'Space: The Final Frontier for IR', *J. Vasc. Interv. Radiol. JVIR*, vol. 26, no. 6, pp. 825–828, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.jvir.2015.02.011.
- [38].....'Six Thinking Hats', *Wikipedia*. Apr. 27, 2022. Accessed: Jul. 14, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Six_Thinking_Hats&oldid=1084917535
- [39]...R. Hart and M. R. Campbell, 'Digital radiography in space', *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 73, no. 6, pp. 601–606, Jun. 2002.
- [40]...E. Brogi *et al.*, 'Thoracic ultrasound for pleural effusion in the intensive care unit: a narrative review from diagnosis to treatment', *Crit. Care Lond. Engl.*, vol. 21, no. 1, p. 325, Dec. 2017, doi: 10.1186/s13054-017-1897-5.
- [41]. .L. Gargani and G. Volpicelli, 'How I do it: lung ultrasound', *Cardiovasc. Ultrasound*, vol. 12, p. 25, Jul. 2014, doi: 10.1186/1476-7120-12-25.
- [42].....M. R. Campbell, R. D. Billica, and S. L. Johnston, 'Animal surgery in microgravity', *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 64, no. 1, pp. 58–62, Jan. 1993.
- [43].....K. K. Chan *et al.*, 'Chest ultrasonography versus supine chest radiography for diagnosis of pneumothorax in trauma patients in the emergency department', *Cochrane Database Syst. Rev.*, vol. 7, p. CD013031, Jul. 2020, doi: 10.1002/14651858.CD013031.pub2.
- [44]...É. Maury *et al.*, '[Diagnostic ultrasound in pneumothorax]', *Rev. Mal. Respir.*, vol. 33, no. 8, pp. 682–691, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.rmr.2015.05.014.
- [45]B. M. Dennis, S. A. Bellister, and O. D. Guillaumondegui, 'Thoracic Trauma', *Surg. Clin. North Am.*, vol. 97, no. 5, pp. 1047–1064, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.suc.2017.06.009.
- [46].....F. K. Butler *et al.*, 'Management of Suspected Tension Pneumothorax in Tactical Combat Casualty Care: TCCC Guidelines Change 17-02', *J. Spec. Oper. Med. Peer Rev. J. SOF Med. Prof.*, vol. 18, no. 2, pp. 19–35, Summer 2018, doi: 10.55460/XB1Z-3BJU.
- [47].....N. Flint and R. J. Siegel, 'Echo-Guided Pericardiocentesis: When and How Should It Be Performed?', *Curr. Cardiol. Rep.*, vol. 22, no. 8, p. 71, Jun. 2020, doi: 10.1007/s11886-020-01320-2.
- [48].A. Venara, V. Carretier, J. Lebigot, and E. Lermite, 'Technique and indications of percutaneous cholecystostomy in the management of cholecystitis in 2014', *J. Visc. Surg.*, vol. 151, no. 6, pp. 435–439, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.jviscsurg.2014.06.003.
- [49]L. M. Knab, A.-M. Boller, and D. M. Mahvi, 'Cholecystitis', *Surg. Clin. North Am.*, vol. 94, no. 2, pp. 455–470, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.suc.2014.01.005.
- [50].....M. W. Little *et al.*, 'Percutaneous cholecystostomy: the radiologist's role in treating acute cholecystitis', *Clin. Radiol.*, vol. 68, no. 7, pp. 654–660, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.crad.2013.01.017.

- [51] J. T. Ross, M. A. Matthay, and H. W. Harris, 'Secondary peritonitis: principles of diagnosis and intervention', *BMJ*, vol. 361, p. k1407, Jun. 2018, doi: 10.1136/bmj.k1407.
- [52].....A. W. Kirkpatrick *et al.*, 'Percutaneous aspiration of fluid for management of peritonitis in space', *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 73, no. 9, pp. 925–930, Sep. 2002.
- [53] N. Azhar *et al.*, 'Laparoscopic Lavage vs Primary Resection for Acute Perforated Diverticulitis: Long-term Outcomes From the Scandinavian Diverticulitis (SCANDIV) Randomized Clinical Trial', *JAMA Surg.*, vol. 156, no. 2, pp. 121–127, Feb. 2021, doi: 10.1001/jamasurg.2020.5618.
- [54].....A. B. Rutner and I. Fucilla, 'Percutaneous pigtail nephrostomy', *Urology*, vol. 14, no. 4, pp. 337–340, Oct. 1979, doi: 10.1016/0090-4295(79)90074-8.
- [55] J. A. Jones *et al.*, 'Percutaneous bladder catheterization in microgravity', *Can. J. Urol.*, vol. 14, no. 2, pp. 3493–3498, Apr. 2007.
- [56]. E. C. Rodriguez-Merchan and H. De la Corte-Rodriguez, 'Iliopsoas hematomas in people with hemophilia: diagnosis and treatment', *Expert Rev. Hematol.*, vol. 13, no. 8, pp. 803–809, Aug. 2020, doi: 10.1080/17474086.2020.1787146.
- [57].....D. Kaçar, O. Ergun, A. Kara, V. Çulha, and N. Y. Özbek, 'Percutaneous Drainage of an Iliopsoas Hematoma in a Hemophilia Patient', *J. Pediatr. Hematol. Oncol.*, vol. 42, no. 7, pp. e683–e685, Oct. 2020, doi: 10.1097/MPH.0000000000001503.
- [58]. E. S. Yoon, B. Lin, and T. T. Miller, 'Ultrasound of Musculoskeletal Hematomas: Relationship of Sonographic Appearance to Age and Ease of Aspiration', *AJR Am. J. Roentgenol.*, vol. 216, no. 1, pp. 125–130, Jan. 2021, doi: 10.2214/AJR.19.22752.
- [59]...L. Liu, L. Zhang, G. J. Liu, and P. Fu, 'Peritoneal dialysis for acute kidney injury', *Cochrane Database Syst. Rev.*, vol. 12, p. CD011457, Dec. 2017, doi: 10.1002/14651858.CD011457.pub2.
- [60].A. K. Abdel-Aal, P. Dybbro, P. Hathaway, S. Guest, M. Neuwirth, and V. Krishnamurthy, 'Best practices consensus protocol for peritoneal dialysis catheter placement by interventional radiologists', *Perit. Dial. Int. J. Int. Soc. Perit. Dial.*, vol. 34, no. 5, pp. 481–493, Aug. 2014, doi: 10.3747/pdi.2013.00029.
- [61].....M. Gottlieb, G. D. Peksa, A. V. Pandurangadu, D. Nakitende, S. Takhar, and R. R. Seethala, 'Utilization of ultrasound for the evaluation of small bowel obstruction: A systematic review and meta-analysis', *Am. J. Emerg. Med.*, vol. 36, no. 2, pp. 234–242, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ajem.2017.07.085.
- [62] Z. A. Miller, P. Mohan, R. Tartaglione, and G. Narayanan, 'Bowel Obstruction: Decompressive Gastrostomies and Cecostomies', *Semin. Interv. Radiol.*, vol. 34, no. 4, pp. 349–360, Dec. 2017, doi: 10.1055/s-0037-1608706.

- [63].....A. Caricato, V. Mignani, C. Sandroni, and D. Pietrini, 'Bedside detection of acute epidural hematoma by transcranial sonography in a head-injured patient', *Intensive Care Med.*, vol. 36, no. 6, pp. 1091–1092, Jun. 2010, doi: 10.1007/s00134-010-1801-0.
- [64]....J. C. Wu, K. Cao, J. Mayfield, and L. Ganti, 'Emergency Decompressive Craniostomy "Burr Hole" Using an Intraosseous Vascular Access System in a Resource-Limited Setting: A Technical Report on a Cadaver', *Cureus*, vol. 14, no. 4, p. e24420, Apr. 2022, doi: 10.7759/cureus.24420.
- [65]S. J. Millington, M. Silva Restrepo, and S. Koenig, 'Better With Ultrasound: Lumbar Puncture', *Chest*, vol. 154, no. 5, pp. 1223–1229, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.chest.2018.07.010.
- [66]G. Panuccio *et al.*, 'Endovascular Navigation with Fiber Optic RealShape (FORS) Technology', *J. Vasc. Surg.*, pp. S0741-5214(22)02116–4, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jvs.2022.08.002.
- [67]....V. Vidal *et al.*, 'In Vivo Feasibility of Arterial Embolization with Permanent and Absorbable Suture: The FAIR-Embo Concept', *Cardiovasc. Intervent. Radiol.*, vol. 42, no. 8, pp. 1175–1182, Aug. 2019, doi: 10.1007/s00270-019-02211-y.

AUTEUR(E) : Nom : BRAYE

Prénom : Guillaume

Date de soutenance : 12/09/2022

Titre de la thèse :

Voyages extra-orbitaires : vers une trousse de radiologie interventionnelle

Thèse - Médecine - Lille - 2022

Cadre de classement : *Radiologie interventionnelle*

DES + FST/option : *Radiologie et imagerie médicale*

Mots-clés : radiologie interventionnelle, micropesanteur, voyages extra-orbitaires

Résumé :

La conquête spatiale, et plus particulièrement les voyages astraux lointains, ne sont plus une fiction. Les astronautes du monde entier se préparent depuis de nombreuses années à des missions plus longues et plus lointaines, avec en ligne de mire, la planète Mars.

Au cours de ces voyages de plusieurs mois, le personnel naviguant devra gérer en totale autonomie les problématiques médicales. La radiologie interventionnelle répond à l'incapacité d'interaction rapide avec la Terre ainsi qu'à l'impossibilité de réaliser une chirurgie lourde.

Ce travail répond donc à un challenge lancé par la Société Française de Radiologie (SFR) en partenariat avec le Centre National d'Études Spatiales (CNES). Le premier objectif consiste à conceptualiser une trousse de radiologie interventionnelle permettant de prendre en charge une liste prédéfinie de pathologies. Le second objectif de ce travail est de proposer des alternatives thérapeutiques innovantes à des pathologies usuellement traitées par chirurgie sur Terre, et ce sous forme de procédures dégradées de radiologie interventionnelle.

Composition du Jury :

Président : Pr Jean-Pierre PRUVO

Assesseurs : Pr Vania TACHER, Dr Matthieu Komorowski

Directeur de thèse : Dr Benjamin Longère