



**HAL**  
open science

# Comparaison des effets de la micropesanteur d'un vol spatial sur les muscles squelettiques de la tête et du cou, la salive et les glandes salivaires : revue systématique de la littérature

Titouan Julien Sindoni

## ► To cite this version:

Titouan Julien Sindoni. Comparaison des effets de la micropesanteur d'un vol spatial sur les muscles squelettiques de la tête et du cou, la salive et les glandes salivaires : revue systématique de la littérature. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. dumas-03597139

**HAL Id: dumas-03597139**

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03597139v1>

Submitted on 4 Mar 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**U.F.R. D'ODONTOLOGIE**

Année 2022

Thèse n° 17

THESE POUR L'OBTENTION DU

**DIPLOME D'ETAT de DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement

Par SINDONI Titouan, Julien

Né(e) le 22/11/1994 à Dax (40), France

Le 31 Janvier 2022

**Comparaison des effets de la micropesanteur d'un vol spatial sur les muscles squelettiques de la tête et du cou, la salive et les glandes salivaires : revue systématique de la littérature**

Sous la direction de : Yves DELBOS

Membres du jury :

Président  
Directeur  
Rapporteur  
Assesseur

M. DEVILLARD Raphaël  
M. DELBOS, Yves  
Mme. GAROT, Elsa  
M. D'INCAU Emmanuel

Professeur des Universités  
Maître de conférences des Universités  
Maître de conférences des Universités  
Maître de conférences des Universités

# UNIVERSITE DE BORDEAUX

MAJ  
01/12/21

<i>Président</i>	M. TUNON DE LARA Manuel
<i>Directeur de Collège des Sciences de la Santé</i>	M. PELLEGRIN Jean-Luc

## COLLEGE DES SCIENCES DE LA SANTE UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DES SCIENCES ODONTOLOGIQUES

<i>Directrice</i>	Mme BERTRAND Caroline	58-01
<i>Directeur Adjoint à la Pédagogie</i>	Mr DELBOS Yves	56-01
<i>Directeur Adjoint – Chargé de la Recherche</i>	M. CATROS Sylvain	57-01
<i>Directeur Adjoint – Chargé des Relations Internationales</i>	M.SEDARAT Cyril	57-01

### ENSEIGNANTS DE L'UFR

#### PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Mme	Caroline	BERTRAND	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Marie-José	BOILEAU	Orthopédie dento-faciale	56-01
M	Sylvain	CATROS	Chirurgie orale	57-01
M	Raphaël	DEVILLARD	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
Mme	Véronique	DUPUIS	Prothèse dentaire	58-01
M.	Bruno	ELLA NGUEMA	Sciences anatomiques et physiologiques - Biomatériaux	58-01
M.	Jean-Christophe	FRICAÏN	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-01

#### MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Mme	Elise	ARRIVÉ	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme	Audrey	AUSSEL	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
Mme	Cécile	BADET	Biologie Orale	57-01
M.	Etienne	BARDINET	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Michel	BARTALA	Prothèse dentaire	58-01
M.	Cédric	BAZERT	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Christophe	BOU	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme	Sylvie	BRUNET	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-01
M.	Jacques	COLAT PARROS	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
M.	Jean-Christophe	COUTANT	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
M.	François	DARQUE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	François	DE BRONDEAU	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Yves	DELBOS	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Emmanuel	D'INCAU	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Mathilde	FENELON	Chirurgie Orale	57-01
Mme	Elsa	GAROT	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Dominique	GILLET	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
Mme	Olivia	KEROUREDAN	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
M.	Jean-François	LASSERRE	Prothèse dentaire	58-01
M.	Yves	LAUVERJAT	Parodontologie	57-01
Mme	Javotte	NANCY	Odontologie pédiatrique	56-01

M.	Adrien	NAVEAU	Prothèse dentaire	58-01
M.	Philippe	POISSON	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
M.	Patrick	ROUAS	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Johan	SAMOT	Biologie Orale	57-01
Mme	Maud	SAMPEUR	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Cyril	SEDARAT	Parodontologie	57-01
Mme	Noëlle	THEBAUD	Biologie Orale	57-01
M.	Eric	VACHEY	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01

#### **AUTRES ENSEIGNANTS**

M.	François	ROUZÉ L'ALZIT	Prothèse dentaire	58-01
M	Pierre-Hadrien	DECAUP	Prothèse dentaire	58-01

#### **ASSISTANTS**

M.	William	AUMAILLEY	Prothèse dentaire	58-01
M.	Bastien	BERCAULT	Chirurgie Orale	57-01
M.	Baptiste	BERGES	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Virginie	CHUY	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme	Diane	DELADRIERE	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
M	Quentin	DESPERIEZ	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Laura	DONNET	Biologie Orale	57-01
Mme	Julia	ESTIVALS	Odontologie pédiatrique	56-01
Mme	Laurie	FUCHS	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Paul	GIRARDEAU	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
Mr	Pierre-André	GUILLAUD	Parodontologie	57-01
Mme	Jane	GOURGUES	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mr	Louis	HUAULT	Sciences anatomiques et physiologiques	58-01
Mme	Mathilde	JACQUEMONT	Parodontologie	57-01
Mr	Aymeric	JOUBERT DU CELLIER	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
Mr	Jean-Baptiste	IRIBARREN	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
Mme	Claudine	KHOURY	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-02
Mme	Camille	LACAULE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M.	Antoine	LAFITTE	Orthopédie dento-faciale	56-01
M,	Xavier	LAGARDE	Chirurgie Orale	57-01
Mme	Mathilde	LEVRIER	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Léa	MASSE	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Chiara	PASCALI	Prothèse dentaire	58-01
Mme	Rawen	SMIRANI	Parodontologie	57-01
Mme	Florianne	VILLAT	Dentisterie restauratrice et endodontie	58-01
M.	Clément	VACHEY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01

## REMERCIEMENTS

### A notre Président de thèse

Monsieur le Professeur Raphaël DEVILLARD  
Professeur des Universités – Praticien Hospitalier  
Sous-section Dentisterie restauratrice et endodontie – 58-01

*Je vous remercie de me faire l'honneur de présider cette thèse. Je vous suis reconnaissant de l'enseignement et de l'accompagnement dont j'ai eu le privilège d'avoir tout au long de ces très belles années au PQR.*

### A notre Directeur de thèse

Monsieur le Docteur Yves DELBOS  
Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier  
Sous-section Odontologie Pédiatrique – 56-01

*Je vous remercie d'avoir dirigé ce travail. Je garde un excellent souvenir de vos enseignements et des vacations du mercredi au PQR. Votre gentillesse, votre bienveillance et vos connaissances font de vous un des meilleurs professeurs de mon cursus. Merci beaucoup.*

### A notre Rapporteur de thèse

Madame le Docteur Elsa GAROT  
Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier  
Sous-section Odontologie Pédiatrique – 56-01

*Je vous remercie pour l'honneur que vous me faites d'avoir été le rapporteur de ce travail. Avec tout mon respect.*

### A notre Assesseur

Monsieur le Docteur Emmanuel D'INCAU  
Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier  
Sous-section Prothèse dentaire – 58-01

*Je vous remercie de l'honneur que vous me faites de faire partie de ce jury. Votre enseignement, votre disponibilité et votre bonne humeur ont toujours permis de passer de très bons moments au sein du PQR.*

A mes parents, mon frère, ma belle-sœur, mon neveu, mes grands-parents, ma tatie, mon oncle et ma tante, mes cousins, Pô, Scottie, Loopy,

*Merci d'avoir été présent du début jusqu'à la fin de mon cursus.*

A ma chérie,

*Merci pour tout. Jamais je n'aurais eu cette PACES sans toi.*

A mes amis de l'Université,

*Merci à Anaïs, Arthur, Chloé, Etienne, Gabriel, Hervé et Philippine, pour tous ces bons moments passés durant ces cinq années.*

A Benjamin, Baptiste, Antoine, Thomas,

*Merci d'avoir participé à toutes ces années d'études, depuis le lycée, en passant par Tech de Co, jusqu'à aujourd'hui.*

# TABLES DES MATIERES

Liste des figures.....	8
Liste des tableaux.....	8
Liste des annexes.....	8
Liste des abréviations.....	9
INTRODUCTION.....	11
<b>1. LA MICROPESANTEUR.....</b>	<b>13</b>
1.1. Définition.....	13
1.2. Micropesanteur et études.....	14
1.2.1. Micropesanteur réelle.....	14
1.2.1.1. Stations spatiales.....	14
1.2.1.2. Navettes spatiales.....	14
1.2.1.3. Vols paraboliques.....	15
1.2.1.4. Capsules spatiales.....	16
1.2.2. Micropesanteur simulée sur Terre.....	16
1.2.2.1. In vivo.....	17
1. « Head down bed rest » ou l'alitement anti-orthostatique.....	17
2. Immersion sèche et mouillée.....	18
3. Suspension.....	19
1.2.2.2. In vitro.....	19
1. Clinostat 2D.....	19
2. RPM ou clinostat 3D.....	19
3. Bioréacteur à paroi rotative ou RWV.....	20
1.3. Rappels : micropesanteur et tissus durs de la sphère oro-faciale.....	20
1.3.1. Tissu osseux.....	21
1.3.2. Tissu dentaire.....	21
<b>2. REVUE SYSTEMATIQUE DE LA LITTERATURE.....</b>	<b>22</b>
2.1. Objectifs.....	22
2.2. Matériels et méthodes.....	23
2.2.1. Stratégie de recherche.....	23
2.2.2. Critères d'éligibilité.....	23
2.2.2.1. Critères d'inclusion.....	23
2.2.2.2. Critères d'exclusion.....	23
2.2.3. Sélection des articles : diagramme de flux PRISMA.....	24

2.2.4.	Extraction des données .....	26
2.3.	Résultats .....	26
2.3.1.	Effets sur les muscles squelettiques au niveau macroscopique/morphologique.....	30
2.3.2.	Effets sur les muscles squelettiques au niveau cellulaire/microscopique.....	32
2.3.3.	Effets sur les muscles squelettiques au niveau moléculaire .....	33
2.3.4.	Effets sur les muscles de la tête et du cou .....	36
2.3.5.	Effets sur la salive .....	37
2.3.6.	Effets sur les glandes salivaires .....	39
<b>3.</b>	<b>DISCUSSION</b> .....	<b>41</b>
3.1.	Analyse de la pertinence de la méthodologie .....	41
3.2.	Analyse des résultats .....	43
3.2.1.	Les muscles squelettiques.....	43
3.2.2.	La salive et les glandes salivaires .....	45
3.3.	Perspectives .....	47
	CONCLUSION .....	50
	BIBLIOGRAPHIE.....	51
	ANNEXE .....	57

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: le vol parabolique zéro g (6).....	15
Figure 2 : pression artérielle hypothétique et accumulation de liquides tissulaires sur Terre et en micropesanteur (9).....	17
Figure 3 modifiée : exemples d’immersion sèche et mouillée par rapport à la micropesanteur réelle (à droite) (8).....	18
Figure 4 : RPM avec deux cadres perpendiculaires entraînés indépendamment (13).....	20
Figure 5: diagramme de flux PRISMA .....	25

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nombre et références des articles inclus dans la revue de la littérature classés selon leurs effets chez l’animal .....	29
Tableau 2 : Nombre et références des articles inclus dans la revue de la littérature classés selon leurs effets chez l’Homme .....	29
Tableau 3 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau macroscopique/morphologique chez l’animal.....	30
Tableau 4 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau macroscopique/morphologique chez l’Homme.....	31
Tableau 5 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau cellulaire/microscopique chez l’animal.....	32
Tableau 6 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau cellulaire/microscopique chez l’Homme.....	33
Tableau 7 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau moléculaire chez l’animal .....	34
Tableau 8 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau moléculaire chez l’Homme .....	35
Tableau 9 : Effets sur les muscles de la tête et du cou chez l’animal .....	36
Tableau 10 : Effets sur les muscles de la tête et du cou chez l’Homme .....	37
Tableau 11 : Effets sur la salive animale.....	38
Tableau 12 : Effets sur la salive humaine .....	38
Tableau 13 : Effets sur les glandes salivaires animales.....	39
Tableau 14 : Effets sur les glandes salivaires humaines .....	40

## LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : grille de lecture des articles sélectionnés.....	57
---	----

## LISTE DES ABREVIATIONS

ADN	Acide désoxyribonucléique
AEM	Animal enclosure module
ARNm	Acide ribonucléique messenger
BR	Bed rest
CgA	Chromogranine A
CS	Citrate synthase
CSA	Cross-sectional area
CST	Current Stress Test
EDL	Extensor digitorum longus
EIA	Enzyme immunoassay
HDT	Head down tilt
HLS	Hindlimb suspension
HPLC	High performance liquid chromatography
HSP	Heat shock protein
Ig	Immunoglobuline
IgA	Immunoglobuline A
IGF-II	Insulin-like growth factor 2
IRM	Imagerie par résonance magnétique
ISS	International Space Station
LDH	Lactate déshydrogénase
MA	Masséter
MDA	Malondialdéhyde
MDS	Mice Drawer System
MG	Gastrocnémien médial
MHC	Myosin heavy chain
MIP-1	Macrophage inflammatory protein 1 alpha
MMP	Matrix metalloproteinase
MP	Micropesanteur
MVC	Maximum voluntary contraction
N.B.	Nota bene
NCAM	Neural cell adhesion molecule

PCR	Polymerase Chain Reaction
PSP	Protéine sécrétoire parotidienne
qRT-PCR	Quantitative Real-Time Polymerase Chain Reaction
RCCS	Rotary Cell Culture System
RPM	Random Positioning Machine
RWV	Rotating Wall Vessel
SDH	Succinate déshydrogénase
SHGB	Sex hormon-binding globulin
SLS	Space Launch System
STS	Space Shuttle Flight
TA	Tibial antérieur
TT	Tension tétanique
VL	Vaste latéral
8-OHdG	8-oxo-7,8 dihydro-2 désoxyguanosine

## INTRODUCTION

L'espace a toujours fait rêver l'être humain. C'est un monde inconnu, qui ne cesse d'être étudié par les scientifiques du monde entier. L'exploration spatiale a connu une avancée immense en seulement une soixantaine d'années. En 1961, Youri Gagarine fut le premier humain envoyé dans l'espace pour un vol orbital. Depuis, tout s'est accéléré. L'Homme est allé sur la Lune, les satellites autour de la Terre sont omniprésents, des sondes ont foulées la planète rouge, et la communauté aérospatiale annonce le premier pas de l'Homme sur Mars dans un futur proche.

Toutes ces avancées soulèvent de nombreuses questions. Les vols spatiaux sont de plus en plus longs, et les perspectives de voyages vers Mars exposeront les membres d'équipage à un vol d'un an et demi environ.

L'être humain n'est pas adapté à l'environnement spatial. Les astronautes rencontrent de nombreuses difficultés telles que la micropesanteur, l'isolement social, le confinement, le rayonnement cosmique, le dérèglement du rythme nyctéméral ou encore la baisse de l'activité physique.

Toutes ces conditions amènent à des modifications au sein de l'organisme. Les effets de la micropesanteur sont donc sans cesse étudiés afin de comprendre les mécanismes qui régissent ces changements, en vue de pouvoir les prévenir. Depuis le commencement de la conquête spatiale, les études se sont multipliées, chez l'Homme comme chez l'animal. Les expériences sont mises en place au sein de vols spatiaux en micropesanteur réelle, mais aussi sur Terre, à l'aide de méthodes simulant la micropesanteur, on parle de micropesanteur simulée.

Les effets sur la physiologie humaine sont nombreux. L'ensemble de l'organisme est touché, dont les systèmes musculaire, squelettique, vasculaire, nerveux, oculaire ou encore immunitaire.

Les conséquences de la micropesanteur sur les tissus musculaires ont été fortement investiguées. De plus, les dernières années ont vu naître de nouvelles technologies permettant la découverte et la compréhension des mécanismes sous-jacents. Cependant, la sphère orofaciale n'est pas la plus représentée dans la littérature, mais les perspectives de voyage vers Mars ont déclenché un nouvel intérêt envers ce domaine.

L'objectif de cette revue systématique de la littérature est de rassembler et compléter les informations concernant les effets de la micropesanteur sur la sphère oro-faciale, chez l'Homme et chez l'animal. Une revue de la littérature publiée en 2019 par le Dr Kanoui s'était déjà intéressée aux effets sur les tissus durs de la sphère oro-faciale, à savoir les os et les dents. Cette fois-ci, le travail s'intéresse aux effets de la micropesanteur sur les tissus mous de la sphère oro-faciale. Nous allons comparer les effets d'un vol spatial sur les muscles de la tête et du cou aux effets sur les autres muscles squelettiques du corps, et évaluer les effets sur la salive et les glandes salivaires.

Ces deux revues, similaires dans leur structuration, permettront à celui ou celle qui s'intéresse à ce sujet, d'avoir une vue d'ensemble sur les effets de la micropesanteur, à la fois sur les tissus durs et les tissus mous de la sphère oro-faciale.

# 1. LA MICROPESANTEUR

## 1.1. Définition

La gravitation est une force attractive de faible amplitude mais de longue portée. C'est cette force qui fait que tous les corps présents dans l'Univers s'attirent mutuellement. C'est le physicien et astronome anglais Sir Isaac Newton qui, pour la première fois en 1684, énonce la loi universelle de gravitation (1) :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{m_A m_B}{d^2}$$

*Avec F : force en Newton  
m : masse en kg  
d : distance entre les deux corps en mètre  
G : constante gravitationnelle*

Sur Terre, la force gravitationnelle agissant sur l'être humain est le résultat de l'interaction entre le corps humain et la Terre. La Terre étant plus imposante, la force de gravité attire le corps humain vers le centre de notre planète : c'est la pesanteur (2) .

C'est ici que l'on distingue la masse (m), qui est l'ensemble de la matière constituant un objet, et le poids (p), qui est le résultat de la force de la gravité ( $g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$ ) multipliée par la masse :

$$p = m \times g$$

Comme référence pour le reste de l'Univers, il a été décidé que la gravité sur Terre est de 1.

L'apesanteur, ou impesanteur, est l'état d'un système où aucune accélération, qu'elle soit causée par la gravitation ou une autre force, ne peut être mesurée. C'est-à-dire que toute source de gravité est suffisamment éloignée du système pour qu'elle puisse être négligée.

La micropesanteur est l'état d'un corps soumis à une pesanteur très faible, comparée à la pesanteur à la surface de la Terre. C'est le cas dans la Station Spatiale Internationale (ISS) par exemple. On utilise la plupart du temps, à tort, le terme '*microgravité*' à la place de '*micropesanteur*', se traduisant en anglais par « *microgravity* ».

## 1.2. Micropesanteur et études

Afin d'étudier la réaction de la matière en micropesanteur, les scientifiques disposent de différents moyens pour réaliser leurs expériences, que ce soit sur Terre ou dans l'espace.

### 1.2.1. Micropesanteur réelle

#### 1.2.1.1. Stations spatiales (3)(4)

A ce jour, une seule station spatiale orbitale est en service : la Station Spatiale Internationale. Elle est en orbite autour de la Terre à une altitude de 400 kilomètres. Elle fait environ la taille d'un terrain rugby, ce qui a été permis par la collaboration de nombreux pays tels que les Etats-Unis, la Russie, le Canada, le Brésil, la France, le Japon et dix autres pays européens. L'ISS est un laboratoire géant avec, en continu depuis l'an 2000, trois astronautes à bord. Ils réalisent des expériences sur la matière, les sciences de la vie, et l'ISS leur permet l'observation de l'Univers et de la Terre.

Avant l'ISS, de nombreuses stations spatiales ont été opérationnelles pendant plusieurs années, qu'elles soient soviétiques avec *Saliout* (1971-86) et *Mir* (1986-2000), américaine avec *Skylab* (1973-74) ou encore chinoises avec *Tiangong 1* (2011-16) et *Tiangong 2* (2016-19).

#### 1.2.1.2. Navettes spatiales (5)

Les navettes spatiales, contrairement aux stations spatiales, ont la capacité de sortir dans l'espace et de revenir sur Terre afin d'être utilisées à nouveau. Elles ont été opérationnelles entre 1981 et 2011, avec 135 missions en micropesanteur. Deux navettes américaines sont malheureusement célèbres, *Challenger* en 1986 et *Colombia* en 2003, dues à leurs accidents mortels en plein vol. Cela permettait de faire des économies gigantesques, car elles étaient régulièrement utilisées pour mettre en orbite des satellites, rajouter des modules aux stations spatiales, ou encore servir de laboratoire en micropesanteur réelle. La durée d'un vol oscillait de 2 à 17 jours, et permettait donc aux membres d'équipage de réaliser leurs expériences en micropesanteur réelle durant une période relativement longue.

### 1.2.1.3. Vols paraboliques (6)

Les vols paraboliques 0g, ou vols zéro gravité, permettent de réaliser des recherches scientifiques en micropesanteur sans avoir à aller dans l'espace. Ils sont effectués pendant un vol en avion qui alterne montées et descentes, créant entre les deux des phases de micropesanteur d'environ 22 secondes.

Depuis 2015, l'entreprise *Novespace*, implantée à Bordeaux-Mérignac, exploite l'*Airbus A310 Zero G* pour des vols paraboliques scientifiques. Au cours des vols, il effectue cette manœuvre parabolique 31 fois.

La manœuvre se compose de trois phases :

- la ressource d'entrée en parabole, durant environ 20 secondes, avec une hypergravité ressentie de 1,8g
- la parabole, où les pilotes réduisent la puissance des moteurs, entraînant l'avion dans une chute libre de 22 secondes recréant ainsi la micropesanteur
- la ressource de sortie de parabole, durant laquelle l'avion reprend une trajectoire horizontale, les passagers ressentant à nouveau 1,8 fois leur poids sur Terre.

Les vols paraboliques de *Novespace* sont généralement effectués au-dessus de l'océan Atlantique, entre la Gironde et la Bretagne, et sont également accessibles au public pour la modique somme de 6000 euros.

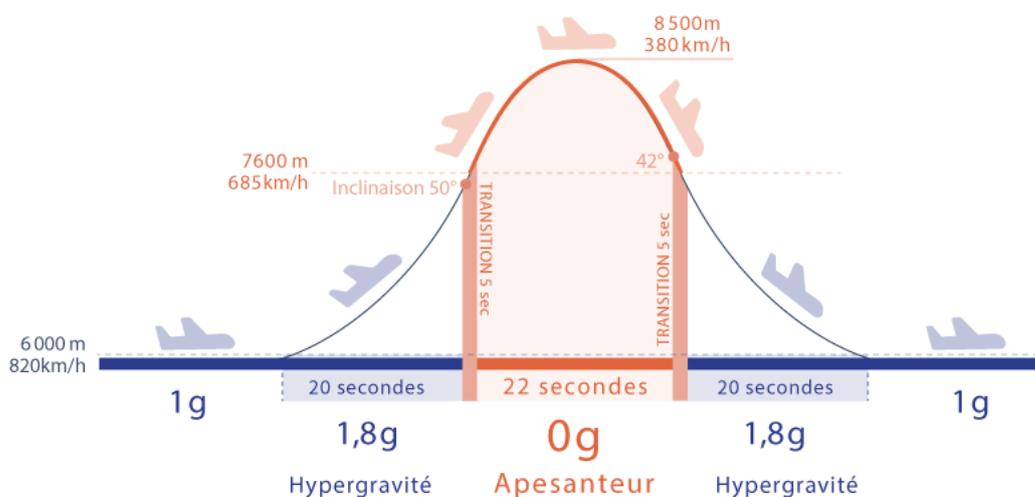


Figure 1: le vol parabolique zéro g (6)

#### 1.2.1.4. Capsules spatiales (7)

Les capsules spatiales sont des satellites envoyés dans l'espace grâce à une fusée, avec à l'intérieur des animaux ou des plantes, retournant ensuite sur Terre pour collecter les résultats des expériences mises en place.

Dans les années 1950, l'URSS envoie dans l'espace une cinquantaine de chiens en tant que cobayes pour étudier les effets physiologiques de la micropesanteur. C'est la chienne Laïka qui fut le premier être vivant à aller dans l'espace à bord de Spoutnik 2 en 1957.

La NASA crée également son programme : *Biosatellite*, avec seulement trois satellites lancés entre 1966 et 1969.

L'expérimentation animale a réellement avancée lors du programme soviétique « *Bion* », lancée en 1972 avec une coopération inattendue en pleine guerre froide entre les Etats-Unis d'Amérique et l'URSS. Entre 1973 et 1993, 11 satellites *Bion* ont été lancés et ont permis une centaine d'expérimentations sur le vivant dans des conditions de micropesanteur durant 5 à 21 jours. Le programme russe est relancé en 2005, et en 2013 un satellite de nouvelle génération, appelé *Bion M1*, décolle pour une durée de 30 jours avec comme équipage des souris, des geckos et des gerbilles.

#### 1.2.2. Micropesanteur simulée sur Terre

La recherche scientifique dispose depuis des décennies de différents moyens d'études en micropesanteur réelle. Cependant, il existe de nombreuses contraintes à ces études, comme la dangerosité des vols, le coût astronomique des missions (135 milliards de dollars de budget pour le programme *Apollo*), leur faible durée, et les autres facteurs rentrant en jeu tels que la nutrition, le stress ou encore les radiations. Cet ensemble de paramètres a amené à recréer sur Terre des conditions les plus proches possibles des vols spatiaux par le biais de protocoles ou de machines : c'est la micropesanteur simulée (5).

### 1.2.2.1. In vivo (5)(8)

#### 1. « Head down bed rest » ou l'alitement anti-orthostatique (9)

Ce protocole permet d'allonger une personne durant une période allant de 4 heures à 90 jours, avec le corps incliné à  $-6^\circ$ , la tête étant plus basse que les pieds. L'objectif est d'amener à des changements de fluide vers la tête, car sur Terre, la pression artérielle est plus grande dans les jambes que dans la tête, alors que c'est le contraire dans l'espace.

Le « *head down tilt* » (HDT) ou « *head down bed rest* » à 6 degrés d'inclinaison est la norme mondiale en ce qui concerne la simulation de la micropesanteur.

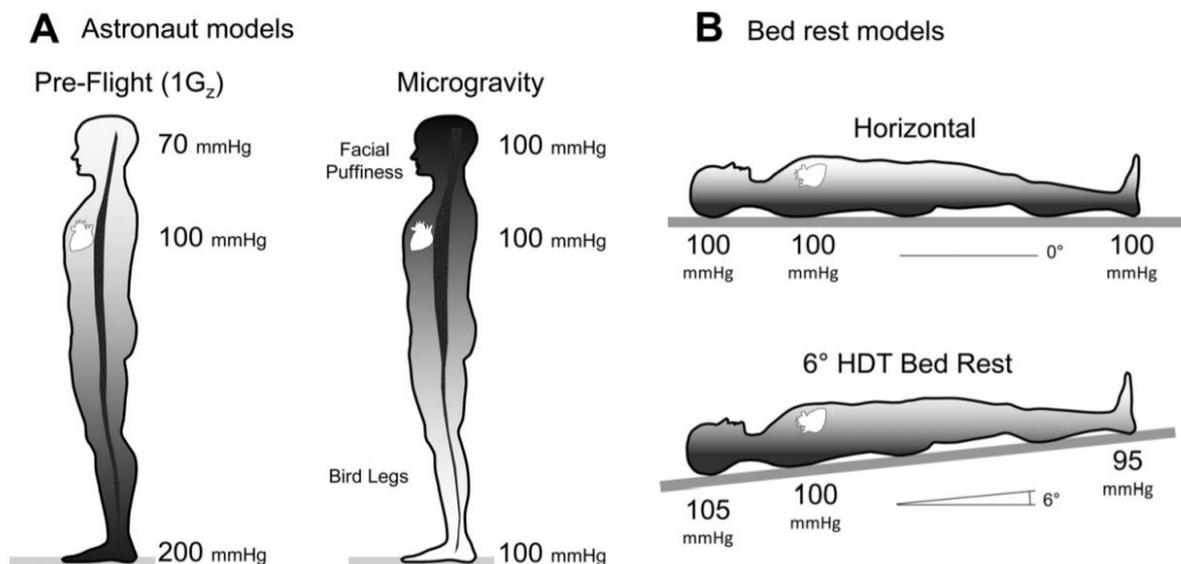


Figure 2 : pression artérielle hypothétique et accumulation de liquides tissulaires sur Terre et en micropesanteur (9)

## 2. Immersion sèche et mouillée (10)

Ces modèles permettent de simuler les facteurs de vol spatial comme la perte de soutien, l'inactivité physique et le déchargement.

L'immersion mouillée permet au sujet d'être en suspension directement au contact d'un fluide aqueux. L'expérience peut durer quelques heures seulement.

L'immersion sèche, quant à elle, permet au sujet d'être en suspension mais sans être directement en contact avec le fluide aqueux, et ceci à l'aide d'une membrane étanche en caoutchouc. L'expérimentation peut alors durer plusieurs semaines.

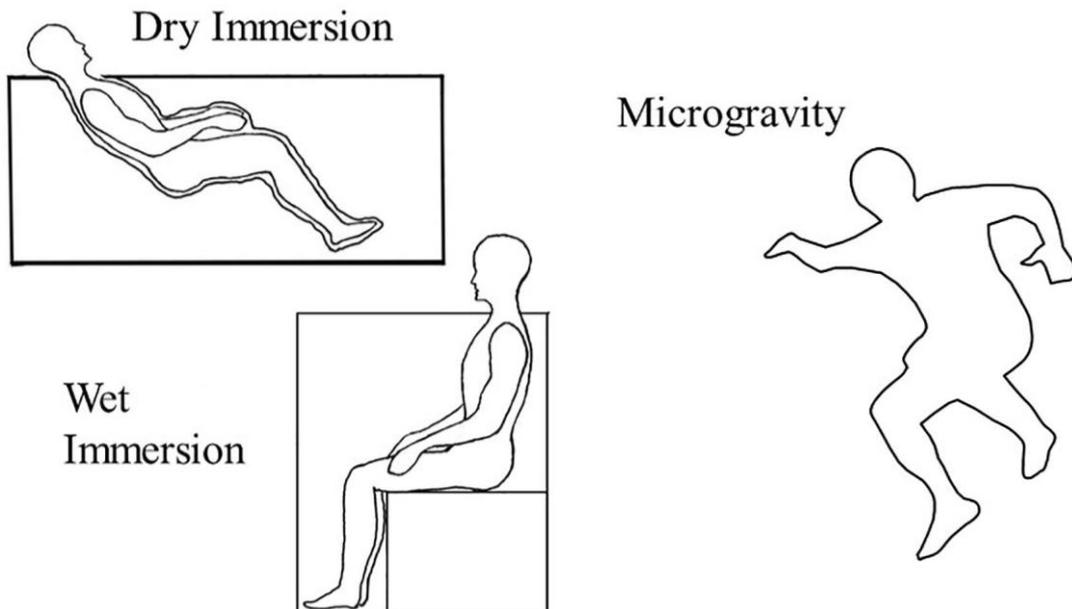


Figure 3 modifiée : exemples d'immersion sèche et mouillée par rapport à la micropesanteur réelle (à droite) (8)

### 3. Suspension

Cette méthode est utilisée seulement chez l'animal, le plus souvent sur le rat, où il est suspendu par la queue ou les membres postérieurs. Ainsi, ils sont inclinés avec un angle de 30° tête en bas, ce qui provoque un déplacement des fluides vers la tête et décharge les membres postérieurs, simulant les effets de la micropesanteur. Les expérimentations peuvent durer plusieurs semaines.

#### 1.2.2.2. In vitro

##### 1. Clinostat 2D (11)(12)

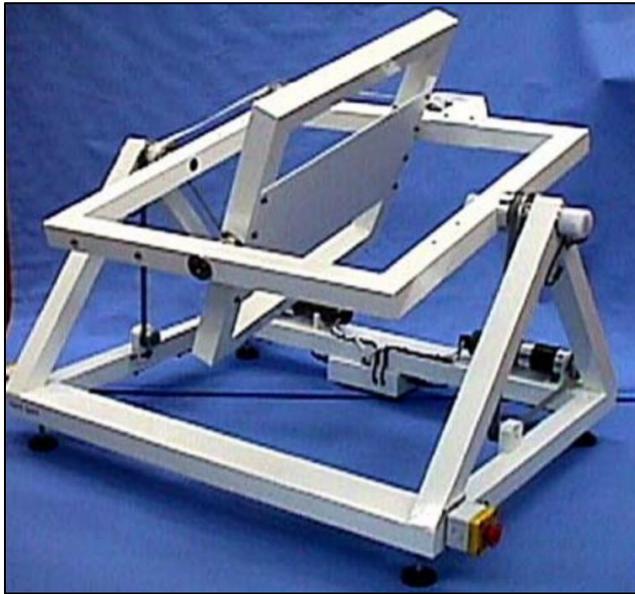
Le clinostat 2D ou « clinostat à un seul axe » est un appareil utilisant la rotation autour d'un axe afin de diminuer les effets de la gravité sur les échantillons présents à l'intérieur, pour arriver à des conditions similaires à la micropesanteur. Cela permet d'étudier des cellules animales ou végétales, dans un environnement où tous les paramètres peuvent être réglés, simulant la micropesanteur, la gravité lunaire ou encore la gravité sur Mars, et inhibant ainsi la sédimentation gravitationnelle.

Le système fonctionne à l'aide d'un disque rigide qui est attaché à un moteur électrique, avec une rotation circulaire autour de l'axe horizontal.

##### 2. RPM ou clinostat 3D (13)

Une machine de positionnement aléatoire, appelé RPM en anglais pour « *random positioning machine* », est une évolution du « clinostat à un seul axe » vers celui « à deux axes ». Il met en rotation des échantillons autour de deux axes indépendants permettant de supprimer l'effet de la gravité terrestre dans tous les plans.

Deux cadres tournent de manière aléatoire et indépendante, l'un placé à l'intérieur de l'autre, avec une vitesse choisie.



*Figure 4 : RPM avec deux cadres perpendiculaires entraînés indépendamment (13)*

### 3. Bioréacteur à paroi rotative ou RWV (14)

Le RWV, ou « *Rotating Wall Vessel* » en anglais, est un système de culture en suspension permettant le développement de cellules dans un environnement minimisant les contraintes mécaniques, comme le cisaillement. Ceci permet d'avoir des échantillons soumis aux mêmes conditions de micropesanteur que dans l'espace.

#### 1.3. Rappels : micropesanteur et tissus durs de la sphère oro-faciale (15)

Cette revue systématique fait suite au travail du Dr Kanoui. En effet, elle a réalisé la première revue systématique comparant les effets de la micropesanteur sur les os du massif crânio-facial aux effets sur les autres os du squelette, ainsi que les effets sur les tissus dentaires chez l'homme et chez l'animal aux niveaux macroscopique, cellulaire et moléculaire.

Il semble judicieux de faire un rappel des résultats, car son travail peut être considéré comme la première partie de cette série de revues concernant la micropesanteur et la sphère oro-faciale, celle que vous êtes en train de lire étant en quelque sorte la suite.

Les os et les muscles sont intimement liés, car la force des muscles appliquée aux os via les tendons sont un des facteurs amenant le phénomène de résorption-apposition du remodelage osseux.

#### 1.3.1. Tissu osseux

Différents effets de la micropesanteur ont pu être mis en évidence sur le tissu osseux au sein de cette revue.

Les effets ne sont pas uniformes quant au type d'os. Nous retrouvons une similarité des effets entre l'os de la mandibule et les os du squelette, avec une tendance à la perte osseuse. Cependant, les os du crâne ne sont pas touchés par cette perte, nous retrouvons même des effets positifs sur les paramètres osseux tels que la densité minérale ou le volume osseux.

#### 1.3.2. Tissu dentaire

Il existe malheureusement un très faible nombre d'études sur le sujet. Ces études sur les modifications dentaires en micropesanteur ne permettent pas de conclure sur des effets réels.

Dans le futur, avec les possibilités de voyages spatiaux toujours plus lointains et des durées beaucoup plus longues en micropesanteur, de nombreuses études feront la lumière sur ce thème très peu abordé dans la littérature.

## 2. REVUE SYSTEMATIQUE DE LA LITTERATURE

Maintenant que nous avons énoncé les bases physiques et techniques des expériences concernant la micropesanteur, nous pouvons nous intéresser aux données de la littérature. Les articles abordant le sujet de la micropesanteur sont nombreux. Il existe un nombre élevé d'études concernant la physiologie du corps humain et animal.

Depuis le milieu du XXème siècle, les études convergent vers les grandes fonctions physiologiques de l'être vivant. C'est-à-dire que les fonctions vitales ont surtout été investiguées, ou les fonctions indispensables à une expérience viable dans l'espace telles que les systèmes cardio-vasculaire, neurologique, musculo-squelettique, immunitaire, oculaire ou encore génétique. Cependant, certains domaines ont été plus ou moins délaissés, ne constituant pas de réelle urgence à l'exposition spatiale. Par exemple, la sphère oro-faciale est peu représentée dans la recherche scientifique. Malgré pléthore d'études concernant les muscles, seulement un faible pourcentage s'intéresse aux muscles masticateurs.

Depuis quelques années seulement, les scientifiques commencent à réellement expérimenter ce domaine, et ce grâce aux nouvelles perspectives de voyage sur Mars dans un futur proche. Cette nouvelle vision de la vie spatiale les oblige à se questionner sur les organes « secondaires » et leur adaptation à plusieurs années possibles de voyage interplanétaire, étant donné que l'on sait maintenant qu'il est possible de vivre dans l'espace durant de longues périodes sans problèmes majeurs.

### 2.1.Objectifs

Cette revue systématique de la littérature vise à décrire l'état actuel des connaissances concernant les effets de la micropesanteur sur les muscles, et plus particulièrement sur les muscles de la tête et du cou, ainsi que sur la salive et les glandes salivaires.

Une revue systématique de la littérature a été réalisé en 2019 sur les effets de la micropesanteur sur les os du massif crânio-facial et sur les tissus dentaires. Notre étude permettra donc d'élargir le recueil d'informations sur la sphère oro-faciale, permettant à celui ou celle qui le souhaite, de se documenter sur les effets de la micropesanteur sur les tissus durs oro-faciaux (os et dents) et mous (muscles, salive et glande salivaire).

## 2.2. Matériels et méthodes

### 2.2.1. Stratégie de recherche

La recherche bibliographique s'est réalisée en ligne sur les bases de données PubMed et Scopus, et a été réalisée selon les directives PRISMA (16).

### 2.2.2. Critères d'éligibilité

Dans le but de sélectionner les articles adéquats pour notre revue, nous avons établis des critères d'inclusion et d'exclusion.

#### 2.2.2.1. Critères d'inclusion

Les critères d'inclusion retenus pour la sélection des articles sont les suivants :

- Articles rédigés en anglais ou en français
- Etudes sur l'Homme ou sur l'animal
- Etudes évoquant les effets de la micropesanteur réelle ou simulée sur les muscles, la salive ou les glandes salivaires
- Mots clés présents dans le titre ou dans le résumé.

#### 2.2.2.2. Critères d'exclusion

Les critères d'exclusion retenus pour la sélection des articles sont les suivants :

- Les revues de la littérature n'ont pas été sélectionnées
- Les articles dont le texte intégral n'est pas disponible en anglais ou en français
- Les études concernant les méthodes de prévention des effets de la micropesanteur sur les muscles, la salive ou les glandes salivaires.
- Les articles publiés avant l'an 2000.

### 2.2.3. Sélection des articles : diagramme de flux PRISMA

La recherche d'articles a commencé en octobre 2020 et s'est faite grâce à l'utilisation de la formule de mots MeSH suivante :

***(microgravity OR zero-gravity OR hypogravity) AND ((space AND flight) OR spaceflight) AND weightlessness AND (muscle OR (masticatory AND muscle) OR saliva OR (salivary AND gland))***

Cette phrase a permis d'identifier 857 articles issus de PubMed et 488 issus de Scopus, pour un total de 1345 articles. Nous avons ensuite affiné notre sélection avec la lecture des titres et en appliquant les critères d'éligibilité, ce qui a permis de retenir 106 articles. Nous avons également éliminé les doublons qui étaient au nombre de 30. La lecture des résumés a permis d'exclure de notre revue 28 articles. Après la lecture complète de ces 48 articles, les textes intégraux de 4 articles ont été exclus, et 3 articles ont été inclus par effet boule de neige.

Pour finir, un total de 47 articles a été sélectionné pour la réalisation de cette revue de la littérature (*Figure 5*). Parmi cette sélection, 38 concernent les muscles et 9 sont relatifs à la salive et aux glandes salivaires.

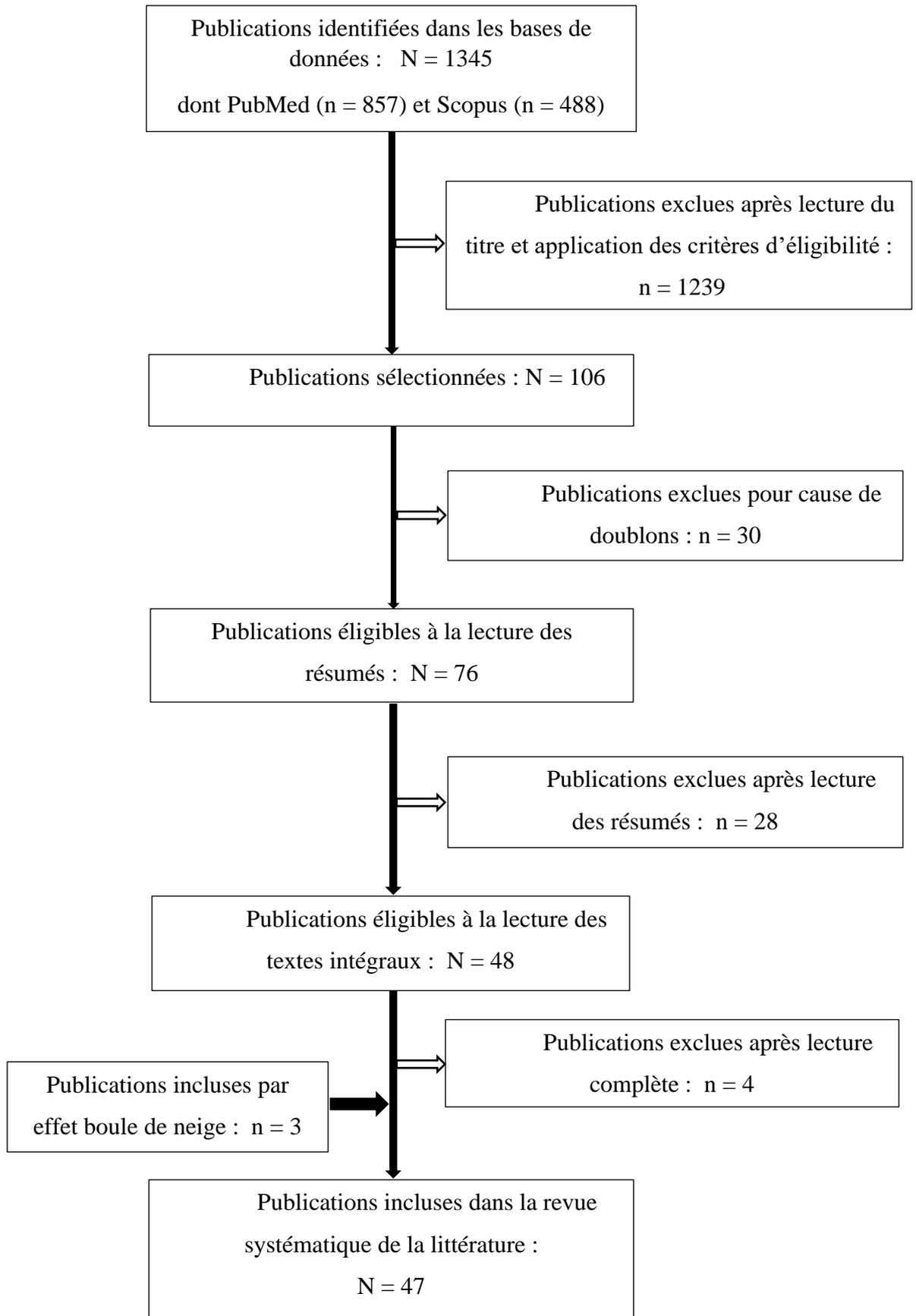


Figure 5: diagramme de flux PRISMA

#### 2.2.4. Extraction des données

Nous avons réalisé une grille de lecture afin d'extraire les données de nos articles sélectionnés. L'ensemble de ces informations sont disponibles en *Annexe 1*. Les éléments retenus sont :

- Titre de l'article, auteur, année
- Sujet (Homme ou animal)
- Conditions expérimentales (micropesanteur réelle ou simulée)
- Techniques utilisées
- Données analysées
- Effectif
- Tissu analysé
- Conclusions.

#### 2.3. Résultats

L'ensemble des informations concernant les articles sont regroupées dans la grille de lecture disponible en *Annexe 1*. Cela permet de catégoriser les effets de la micropesanteur sur les différents tissus et paramètres étudiés.

Afin d'apprécier les données suivantes, quelques points sont à définir, permettant une meilleure compréhension des éléments recueillis.

Nous nous intéressons dans cette revue à différents tissus mous, dont les muscles, et plus précisément les muscles squelettiques striés. Il existe chez l'Homme et chez l'animal trois types de tissus musculaires (17) :

- Le muscle lisse, à contraction involontaire, que l'on retrouve dans la paroi des organes, comme par exemple au niveau des vaisseaux sanguins, de l'estomac ou encore de l'utérus.
- Le muscle cardiaque, uniquement au niveau du cœur, qui est un muscle strié, et présente une contraction autonome.
- Le muscle squelettique, à contraction volontaire, qui est un muscle strié également.

C'est ce dernier qui nous intéresse dans notre revue. Il permet de mouvoir les membres et représente 42% de la masse corporelle chez l'homme contre 36% chez la femme. Il est composé de fibres de 2 types : à contraction lente et à contraction rapide.

Les fibres de type I, à contraction lente, sont riches en capillaires, avec une activité principalement aérobie, utilisant beaucoup d'oxygène pour pouvoir fonctionner (= métabolisme oxydatif). Les fibres se contractent avec une faible intensité, mais pendant une longue période. Exemples de muscles majoritairement composés de fibres lentes de type I : le muscle soléaire, le triceps brachial, etc.

Les fibres de type II, à contraction rapide, présentent différents sous-types selon leur vitesse et leur force : IIa, IIb, IIc, IIx. Elles ont une activité principalement anaérobie, utilisant en majeure partie la glycolyse (= métabolisme glycolytique). Les fibres se contractent avec une forte intensité, mais pendant une courte période. Exemples de muscles majoritairement composés de fibres rapides de type II : le muscle gastrocnémien, le long extenseur des orteils, le muscle plantaire, etc.

Au sein de ces articles, des muscles sont plus souvent étudiés que d'autres en micropesanteur. C'est le cas des muscles des membres inférieurs, qui sont facilement analysables et ayant pour certains des fonctions particulières.

Les muscles du mollet, par exemple, sont fortement représentés, composés du muscle gastrocnémien (phénotype principalement rapide) et du muscle soléaire (phénotype principalement lent). Le soléaire a la particularité d'être considéré comme un muscle « antigravité ». C'est un muscle postural de référence permettant d'étudier le mécanisme de la mauvaise adaptation, induite par la plasticité et la désuétude de la musculature squelettique chez l'Homme et le rongeur.

Son principal rôle lors de la locomotion est de contrer l'attraction terrestre, en s'extrayant de celle-ci. Nous retrouvons le même principe dans les muscles extenseurs des membres, qui permettent de repousser le corps en direction opposée par rapport au centre de la Terre.

A l'inverse, le triceps brachial ou les muscles fléchisseurs n'ont pas de fonction « antigravité ».

Concernant les sujets présents dans les études, nous retrouvons l'Homme et l'animal, avec le rongeur majoritairement représenté dans le modèle animal, que ce soit pour l'analyse musculaire ou salivaire. En effet, le modèle murin est très sollicité car la morphologie et la physiologie de leurs glandes salivaires sont similaires à celles de l'Homme.

Pour finir, la salive, produite par les glandes salivaires, joue un rôle majeur dans le maintien de la santé bucco-dentaire et permet d'obtenir des données générales sur la physiologie et la santé des sujets étudiés. De plus, elle est facilement collectée chez l'Homme alors que les glandes sont plus souvent étudiées chez les animaux.

Au sein des muscles squelettiques, nous séparons les muscles de la tête et du cou du reste des muscles. En effet, ce sont des muscles qui nous intéressent particulièrement dans notre domaine, appartenant à la sphère oro-faciale. Cela nous permet de distinguer les différences et les similarités avec les muscles squelettiques du reste du corps.

Les effets sont classés en 6 catégories, portant sur les muscles squelettiques, la salive et les glandes salivaires.

De plus, les muscles squelettiques (hors tête et cou) sont divisés en 3 catégories, permettant d'apprécier les effets de la micropesanteur à différentes échelles :

- Au niveau macroscopique : les caractères morphologiques
- Au niveau microscopique : les effets cellulaires
- Au niveau moléculaire.

Nous recensons au sein de cette revue 28 articles sur les muscles squelettiques au niveau macroscopique, 15 au niveau microscopique, 22 au niveau moléculaire, 5 sur les muscles de la tête et du cou, 7 sur la salive et 4 sur les glandes salivaires.

Parmi cette sélection d'articles, 28 concernent les animaux et 19 concernent l'être humain.

Dans les tableaux 1 et 2 suivants sont classés par ordre décroissants du nombre d'articles les catégories d'effets recueillis au sein des études incluses dans la revue de la littérature. Les tableaux 1 et 2 concernent respectivement les études sur le modèle animal et sur le modèle humain.

Types d'effets chez l' <b>animal</b>	Nombre d'articles	Articles
Effets moléculaires	20	(22), (24), (27), (31) - (38), (40), (44), (47) - (50), (52) - (54)
Effets macroscopiques / morphologiques	19	(22), (24), (29), (31) - (34), (35), (43) - (45), (47) - (54)
Effets microscopiques / cellulaires	12	(22), (33) - (35), (37), (40), (45), (47), (48), (51) - (53)
Effets sur les glandes salivaires	3	(62), (65), (67)
Effets sur les muscles de la tête et du cou	2	(43), (58),
Effets sur la salive	1	(65)

*Tableau 1 : Nombre et références des articles inclus dans la revue de la littérature classés selon leurs effets chez l'animal.*

Types d'effets chez l' <b>Homme</b>	Nombre d'articles	Articles
Effets macroscopiques / morphologiques	9	(23), (25), (28), (30), (39), (41), (46), (55), (56)
Effets sur la salive	6	(60), (61), (63), (64), (66), (68)
Effets microscopiques / cellulaires	3	(25), (26), (28)
Effets sur les muscles de la tête et du cou	3	(57), (59), (63)
Effets moléculaires	1	(42)
Effets sur les glandes salivaires	1	(63)

*Tableau 2 : Nombre et références des articles inclus dans la revue de la littérature classés selon leurs effets chez l'Homme.*

### 2.3.1. Effets sur les muscles squelettiques au niveau macroscopique/morphologique

Les tableaux 3 et 4 présentent les données se rapportant aux effets sur les muscles squelettiques au niveau macroscopique/morphologique. Nous comptons 19 études sur le modèle animal et 9 sur l'Homme.

Total : 19	Effets négatifs : 17 études (22), (24), (29), (32), (34), (36), (43) - (45), (47)-(54)	Pas d'effet : 7 études (22), (29), (31), (33), (36), (43), (47)	Effets « positifs » : 2 études (53), (54)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de la masse musculaire (plus importante dans le soléaire) : 8</li> <li>- Atrophie musculaire (plus rapide et sévère dans le soléaire) : 5</li> <li>- Diminution de la CSA (soléaire est le plus affecté) : 5</li> <li>- Diminution de la force : 4</li> <li>- Diminution de la masse corporelle : 3</li> <li>- Augmentation de l'indice de fatigue : 1</li> <li>- Diminution de la vitesse de raccourcissement maximale musculaire : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de modification de la masse musculaire : 4</li> <li>- Pas d'atrophie musculaire : 3</li> <li>- Pas de modification de la masse corporelle : 2</li> <li>- Pas d'effet sur la CSA (triceps brachial = pas de fonction antigraité) : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Atrophie mais schéma d'adaptation</i></li> <li>- <i>Plasticité rapide du muscle squelettique lors de vols courts</i></li> </ul>

*Tableau 3 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau macroscopique/morphologique chez l'animal.*

Les données relatives au modèle animal indiquent une disposition à la perte musculaire en micropesanteur, et plus particulièrement au niveau du muscle soléaire, dit muscle « antigraité », composé majoritairement de fibres lentes de type I. 17 études constatent des effets délétères sur les muscles squelettiques.

Cependant, 7 études constatent l'absence d'effet au niveau macroscopique, et en particulier sur les muscles n'ayant pas de fonction « antigraité », à l'inverse du muscle

soléaire, comme le triceps brachial, ou sur les muscles composés en majorité de fibres rapides de type II, tels que le long extenseur des orteils ou le gastrocnémien.

Pour finir, 2 études constatent des effets « positifs », comme l'aptitude d'adaptation et de plasticité des tissus musculaires squelettiques.

*N.B. : « La capacité d'un muscle à produire une force est proportionnelle à sa CSA (cross-sectional area), qui signifie « surface de section transversale musculaire », c'est-à-dire une surface de section théorique si tous les fascicules étaient placés dans l'axe longitudinal du muscle » (18).*

Total : 9	Effets négatifs : 8 études (23), (28), (30), (39), (41), (46), (55), (56)	Pas d'effet : 3 études (25), (30), (41)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de la force (plus importante dans le soléaire et dans les extenseurs par rapport aux fléchisseurs) : 5</li> <li>- Diminution de la CSA (dont l'extenseur du genou) : 3</li> <li>- Diminution de la contraction volontaire maximale et de la tension tétanique : 2</li> <li>- Atrophie : 1</li> <li>- Diminution de la masse musculaire : 1</li> <li>- Diminution de la capacité de travail : 1</li> <li>- Augmentation de l'indice de fatigue (<u>vol long</u> : extenseurs/fléchisseurs du genou, cheville, dos) : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'effet sur la force isométrique maximale et sur les caractéristiques force-vitesse : 1</li> <li>- Pas d'effet morphologique : 1</li> <li>- Pas de modification de la CSA (fléchisseur du genou) : 1</li> <li>- Pas d'effet sur l'indice de fatigue (<u>vol court</u> : extenseurs/fléchisseurs du genou, cheville, dos) : 1</li> </ul>

*Tableau 4 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau macroscopique/morphologique chez l'Homme.*

Les données relatives au modèle humain indiquent une disposition à la perte musculaire en micropesanteur, et plus particulièrement au niveau du muscle soléaire et des muscles extenseurs. 8 études constatent des effets délétères sur les muscles squelettiques.

Cependant, 3 études constatent l'absence d'effet au niveau macroscopique, et en particulier sur les muscles n'ayant pas de fonction « antigraité », comme les muscles fléchisseurs par exemple.

De plus, 1 étude indique l'absence de différence entre les hommes et les femmes concernant la perte de force (55).

### 2.3.2. Effets sur les muscles squelettiques au niveau cellulaire/microscopique

Les tableaux 5 et 6 présentent les données se rapportant aux effets sur les muscles squelettiques au niveau cellulaire/microscopique. Nous comptons 12 études sur le modèle animal et 3 sur l'Homme.

Total : 12	Effets négatifs : 10 études (22), (33), (35), (37), (40), (45), (47), (48), (51), (53)	Pas d'effet : 3 études (34), (51), (52)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transition du phénotype des fibres de type I (lent) à II (rapide) : 6</li> <li>- Atrophie des fibres de tout type (plus marqué dans le soléaire) : 5</li> <li>- Atrophie des fibres de type 1 : 2</li> <li>- Diminution de la rigidité maximale des fibres : 1</li> <li>- Diminution du nombre de capillaire par fibre : 1</li> <li>- Augmentation dans les fibres de l'expression de MHC de type Iix et Iib (rapide) : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Absence de dégénérescence des fibres, d'infiltration graisseuse ou de fibrose : 1</li> <li>- Pas d'effet sur la vitesse maximale de raccourcissement des fibres : 1</li> <li>- Rigidité normale des fibres : 1</li> </ul>

*Tableau 5 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau cellulaire/microscopique chez l'animal.*

Les données relatives au modèle animal indiquent une sensibilité particulière des fibres musculaires à la micropesanteur, avec le muscle soléaire plus touché. Les fibres de type I semblent être plus sensibles, avec des modifications du type de fibres s'orientant vers le passage à phénotype rapide. 12 études constatent des effets délétères sur les muscles squelettiques.

Cependant, 3 études constatent l'absence d'effet au niveau cellulaire.

*N.B.* : la chaîne lourde de la myosine, MHC, est une protéine structurelle majeure qui contrôle les propriétés contractiles intrinsèques (génération de force et raccourcissement) d'une fibre musculaire.

Total : 3	Effets négatifs : 2 études (26), (28)	Pas d'effet : 2 études (25), (26)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de la densité des filaments minces : 1</li> <li>- Diminution de la force par CSA des fibres : 1</li> <li>- Diminution de la rigidité, du tonus et de l'élasticité des fibres : 1</li> <li>- Atrophie des fibres de type I : 1</li> <li>- Augmentation de l'expression de fibres hybrides de type I/IIx : 1</li> <li>- Processus de dénervation précoce : 1</li> <li>- Atrophie des fibres (plus importante dans le soléaire que dans gastrocnémien) : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'effet sur la composition ou la taille des fibres : 1</li> <li>- Pas de modification de la densité et de l'espacement des myofilaments épais : 1</li> <li>- Pas de modification de la tension spécifique : 1</li> </ul>

*Tableau 6 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau cellulaire/microscopique chez l'Homme.*

Les données relatives à l'Homme indiquent une sensibilité particulière des fibres musculaires à la micropesanteur, avec un effet plus important dans le muscle soléaire que dans le gastrocnémien. 2 études constatent des effets délétères sur les muscles squelettiques.

Cependant, 2 études constatent l'absence d'effet au niveau cellulaire.

### 2.3.3. Effets sur les muscles squelettiques au niveau moléculaire

Les tableaux 7 et 8 présentent les données se rapportant aux effets sur les muscles squelettiques au niveau moléculaire. Nous comptons 20 études sur le modèle animal et 9 sur l'Homme.

Total : 20	Effets négatifs : 19 études (22), (24), (27), (31)-(38), (40), (44), (47)-(50), (53), (54)	Pas d'effet : 9 études (22), (24), (33), (34), (36), (38), (48), (52), (53)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Passage du métabolisme oxydatif à glycolytique : 2</li> <li>- Changements dans l'expression génique : 1</li> <li>- Augmentation de l'expression de gènes liés au stress : 1</li> <li>- Changements dans l'expression génique liée à la croissance musculaire et au type de fibre : 1</li> <li>- Diminution de l'expression de gènes myogéniques et adipogènes (épaule : vol long 135 jours) : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'augmentation de l'expression de gènes liés au stress : 1</li> <li>- Pas d'effet sur l'expression des gènes myogéniques et adipogènes (épaule : vol court 30 jours) : 1</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution des niveaux d'expression de l'ARNm des 3 HSP (muscle soléaire) : 1</li> <li>- Augmentation des taux d'ARNm et de protéines de myostatine : 1</li> <li>- Diminution des taux d'ARNm d'IGF-II : 1</li> <li>- Expression déséquilibrée des gènes mitochondriaux : 1</li> <li>- Augmentation de l'expression de gènes codant pour des enzymes limitant la vitesse de dégradation des protéines (ubiquitine ligase) : 1</li> <li>- Modification des niveaux d'ARNm des protéases musculaire : 1</li>   <li>- Diminution du pic respiratoire dans les fibres : 1</li> <li>- Dysfonctionnement mitochondrial : 1</li> <li>- Diminution de l'activité des enzymes oxydantes : 1</li> <li>- Diminution de l'activité enzymatique : 1</li> <li>- Diminution de l'activité de la SDH : 3</li> <li>- Diminution de l'intensité de la coloration de la SDH : 1</li> <li>- Diminution de la capacité oxydative : 1</li> <li>- Diminution de l'activité de la citrate synthase : 1</li>   <li><u>IN VITRO :</u></li> <li>- *Atténuation de la différenciation des myoblastes : 1</li> <li>- *Diminution du taux de protéines contractiles (myosine et tropomyosine) : 1</li> <li>- *Inhibition de la prolifération cellulaire : 1</li> <li>- *Augmentation de l'expression de la cycline B : 1</li> <li>- *Retard de croissance cellulaire : 1</li>   <li>- Prédominance de la dégradation protéique par rapport à la synthèse protéique</li> <li>- Dégradation des protéines contractiles musculaires : 1</li> <li>- Stimulation de l'ubiquitination des protéines et accumulation de fragments de dégradation de MHC : 1</li>   <li>- Diminution des protéines totales dans les fibres de type I et II : 1</li> <li>- Diminution de la teneur en protéines contractiles (titine et nébuline) : 1</li>   <li>- Diminution de l'isoforme de MHC-II<sub>d</sub> (gastrocnémien composante superficielle « blanche ») : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'effet sur les niveaux d'expression de l'ARNm des HSP (muscle plantaire) : 1</li>   <li>- Pas d'effet sur la quantité de protéines dans les fibres : 1</li> <li>- Teneur normale en beta et gamma-actine : 1</li>   <li>- Pas d'effet sur l'activité de SDH : 1</li>   <li><u>IN VITRO :</u></li> <li>- *Pas d'effet sur l'expression de la cycline D : 1</li>   <li>- Pas de modification de l'expression des isoformes de MHC : 1</li> <li>- Pas d'altération du profil de MHC (gastrocnémien composante profonde « rouge ») : 1</li> </ul>
---	---

*Tableau 7 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau moléculaire chez l'animal.*

Les données relatives au modèle animal présentent pléthore d'effets sur les paramètres musculaires au niveau moléculaire. Il existe de nombreuses modifications sur le plan de l'expression génique, de l'activité enzymatique, du cycle cellulaire, de la quantité de protéines ou au sein du métabolisme et du fonctionnement cellulaire. 20 études constatent des effets délétères sur les muscles squelettiques.

Cependant, 9 études constatent l'absence d'effet au niveau moléculaire.

*N.B. :*

- ° La succinate déshydrogénase (SDH) est une enzyme mitochondriale, qui participe à deux processus métaboliques majeurs. Chez l'Homme, un blocage de la SDH entraîne des maladies graves (neurodégénératives ou tumeurs). L'activité de la SDH est un marqueur pour le métabolisme oxydatif (19).
- ° L'analyse de la capacité oxydative musculaire se fait via l'analyse de l'activité de la citrate synthase.
- ° Les protéines de choc thermique (HSP) sont des protéines produites par les cellules en réponse à une exposition à des conditions de stress.
- ° La myostatine est un facteur de croissance qui limite la croissance des tissus musculaires.
- ° IGF-II est une hormone hypoglycémiante, qui stimule la prolifération cellulaire et régule la croissance.

Total : 1	Effets négatifs : 1 étude (42)	Pas d'effet : 1 étude (42)
	- Diminution du taux de testostérone ( <u>après un vol court</u> )	- Pas d'effet sur le taux de testostérone ( <u>après un vol long</u> ) - Pas d'effet sur les taux de cortisol et de SHBG

*Tableau 8 : Effets sur les muscles squelettiques au niveau moléculaire chez l'Homme.*

Les données relatives à l'Homme sont peu nombreuses et présentent une différence d'effets sur les paramètres musculaires au niveau moléculaire selon la durée d'exposition à la micropesanteur. Il existe une diminution du taux de testostérone à la suite d'un vol court, alors qu'après un vol long les taux de testostérone, de cortisol et de SHBG sont inchangés. Une seule et même étude contient ces informations.

*N.B.* :

° La testostérone est une hormone stéroïdienne du groupe des androgènes, hormone anabolisante, qui intervient notamment dans le processus de prise de masse musculaire en permettant l’hypertrophie musculaire (épaississement des fibres musculaires), donnant plus de volume et de force aux muscles. Le stress est l’un des facteurs pouvant influencer négativement le taux de testostérone.

° Le cortisol est une hormone de stress, qui joue un rôle majeur dans l’équilibre de la glycémie.

° SHBG est une protéine qui se lie fortement aux hormones sexuelles (testostérone et œstradiol) afin d'en limiter l'action. Plus le taux de SHBG est élevé, moins il y aura de testostérone libre (20).

#### 2.3.4. Effets sur les muscles de la tête et du cou

Les tableaux 9 et 10 présentent les données se rapportant aux effets sur les muscles de la tête et du cou. Nous comptons 2 études sur le modèle animal et 3 sur l’Homme.

Total : 2	Effets négatifs : 2 études (43), (58)	Pas d’effet : 1 étude (43)
	<p><u>MASSETER</u> : 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de la taille des fibres (après 2 semaines de régime liquide)</li> </ul> <p><u>Muscle rhomboïde</u> : 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Atrophie des fibres de type I</li> <li>- Diminution de la CSA des fibres de type I</li> <li>- Transition du phénotype des fibres du type I (lent) à II (rapide)</li> <li>- Passage du métabolisme oxydatif à glycolytique</li> <li>- Modifications dans l’expression des protéines (liées aux propriétés métaboliques et morphologiques)</li> </ul>	<p><u>MASSETER</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d’effet sur la masse musculaire</li> <li>- Pas d’effet sur la distribution de la taille des fibres</li> <li>- Pas de modification de l’expression génique</li> </ul>

*Tableau 9 : Effets sur les muscles de la tête et du cou chez l’animal.*

Les données relatives au modèle animal indiquent une disposition à la perte musculaire en micropesanteur, en particulier au niveau du muscle rhomboïde. 2 études constatent des effets délétères sur les muscles squelettiques.

Cependant, 1 étude constate l'absence d'effet sur le masséter (muscle masticateur).

Total : 3	Effets négatifs : 2 études (57), (63)	Pas d'effet : 2 études (57), (59)	Effets positifs : 1 étude (59)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de l'ouverture buccale, du mouvement de la langue et de la mandibule : 1</li> <li>- Perturbations posturales (en possible lien avec la tonicité du masséter) : 1</li> <li>- Augmentation de la tonicité du masséter à la fin de la période de MP simulée : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'effet sur la force de morsure maximale (MASSETER) : 1</li> <li>- Pas de dysfonctionnement des muscles masticateurs : 1</li> <li>- Pas d'effet sur l'infiltration graisseuse musculaire : 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muscles sterno-cléido-mastoïdien, trapèze, semi-épineux, petit rhomboïde :</li> <li>- Augmentation de la CSA</li> <li>- Hypertrophie post-vol</li> </ul>

*Tableau 10 : Effets sur les muscles de la tête et du cou chez l'Homme.*

Les données relatives à l'Homme indiquent une disposition au gain musculaire en micropesanteur, en particulier au niveau des muscles du cou. 1 étude constate des effets positifs sur les muscles squelettiques.

Cependant, 2 études constatent l'absence d'effet, en particulier sur les muscles masticateurs, et 2 études montrent des effets négatifs sur des paramètres en lien avec les muscles de la sphère oro-faciale.

### 2.3.5. Effets sur la salive

Les tableaux 11 et 12 présentent les données se rapportant aux effets sur la salive. Nous comptons 1 étude sur le modèle animal et 6 sur l'Homme.

Total : 1	Effets négatifs : 1 étude (65)
	- Diminution de l'expression de l'IgA

*Tableau 11 : Effets sur la salive animale.*

Concernant le modèle animal, une seule étude constate des effets délétères sur l'expression de l'immunoglobuline A, qui joue un rôle capital dans la fonction immunitaire des muqueuses.

Total : 6	Effets négatifs : 6 études (60), (61), (63), (64), (66), (68)	Pas d'effet : 1 étude (64)
	<p>Augmentation du stress oxydatif : 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution des concentrations en vitamines C et E (= antioxydants)</li> <li>- Augmentation de MDA et 8-OHdG (= marqueurs oxydatifs)</li> </ul> <p>- Augmentation du taux de cortisol, CgA et beta-endorphine (hormones de stress) : 2</p> <p>- Augmentation de l'alpha-amylase (biomarqueur du stress) : 2</p> <p>- Augmentation des taux de MMP-8 et 9 : 1</p> <p>- Augmentation de l'activité et de la quantité de Streptococcus mutans : 1</p> <p>- Diminution du taux d'Ig salivaires : 1</p> <p>- Diminution des biomarqueurs salivaires (sodium, potassium, calcium, phosphate, protéines) : 1</p> <p>- Diminution de l'activité de l'amylase (digestion de l'amidon) : 1</p> <p>- Augmentation du taux de LDH, MIP-1 alpha et thiocyanate (= perturbateur endocrinien) : 1</p> <p>- Diminution du débit salivaire : 2</p> <p>- Xérostomie : 1</p>	- Pas de modification du taux de cortisol : 1

*Tableau 12 : Effets sur la salive humaine.*

Les données relatives à l'Homme présentent de nombreux changements délétères. 6 études constatent des effets au niveau de la quantité et de la composition salivaire. Ces

modifications sont un lien avec des perturbations diverses, comme par exemple le lactate déshydrogénase (LDH) dont l'augmentation témoigne d'un dommage tissulaire dans l'organisme, la protéine inflammatoire macrophagique (MIP-1 alpha) augmentant lors d'une inflammation, ou encore les MMP qui sont impliqués fortement dans la destruction parodontale.

Cependant, 1 étude constate l'absence d'effet sur le taux de cortisol salivaire.

*N.B.* : Le malondialdéhyde (MDA) et la 8-OHdG sont des marqueurs oxydatifs salivaires et sériques, manifestation du stress oxydatif dans les tissus.

### 2.3.6. Effets sur les glandes salivaires

Les tableaux 13 et 14 présentent les données se rapportant aux effets sur les glandes salivaires. Nous comptons 3 études sur le modèle animal et 1 sur l'Homme.

Total : 3	Effets négatifs : 3 études (62), (65), (67)	Pas d'effet : 3 études (62), (65), (67)	Effets « positifs » : 1 étude (62)
	<u>Parotide :</u> - Modifications morphologiques : 1 - Modifications cellulaires (augmentation du nombre de vacuoles autophagiques et de cellules acineuses apoptotiques) : 1 - Modifications de l'expression des protéines sécrétoires : 1 - Changements dans la fonction des cellules canalaire : 1 - Diminution de la PSP : 1	- <u>Parotide</u> : pas de changement morphologique ou de dommage tissulaire : 1 - <u>Glande sous-maxillaire</u> : pas de changement morphologique : 1 - <u>Glande sublinguale</u> : pas de changement morphologique : 1 - <u>Glande sous-maxillaire (femelles)</u> : pas d'effet sur l'expression des protéines : 1	- <u>Glande sous-maxillaire (mâles)</u> : Augmentation des facteurs de croissance épidermique et nerveuse

*Tableau 13 : Effets sur les glandes salivaires animales.*

Les données relatives au modèle animal présentent des effets négatifs au niveau d'une glande salivaire en particulier, la parotide. 3 études constatent des effets délétères sur la parotide.

Cependant, 3 études constatent l'absence d'effet, et cela dans les trois types de glandes salivaires principales.

Pour finir, 1 étude constatent des effets « positifs », telle que l'augmentation des facteurs de croissance épidermique et nerveuse.

Total : 1	Effets négatifs : 1 étude (63)
	Gonflement et douleurs au niveau des ostiums des <u>glandes sous-maxillaires</u> et <u>sublinguales</u>

*Tableau 14 : Effets sur les glandes salivaires humaines.*

Concernant l'Homme, une étude montre des effets négatifs sur les glandes salivaires.

### 3. DISCUSSION

#### 3.1. Analyse de la pertinence de la méthodologie

Les articles inclus au sein de cette revue systématique de la littérature sont le résultat de recherches faites sur deux banques de données scientifiques : PubMed et Scopus. Des critères d'éligibilité ont été appliqués afin de permettre une sélection précise des articles. Cependant, des articles qui auraient pu être intéressants n'ont pas été retenus, et ce pour plusieurs raisons. Nous avons sélectionné uniquement les textes en anglais et en français, ce qui nous a empêché de découvrir la littérature abordant ce sujet en d'autres langues (études chinoises et japonaises principalement). De plus, la sélection s'est faite grâce à la lecture des titres, ce qui a sûrement éliminé des articles dont les titres ne semblaient pas intéressants, mais contenant des informations pertinentes.

Les articles retenus ont été publiés entre les années 2000 et 2020. Les études publiées avant l'an 2000 n'ont pas été intégrées, car les méthodes et techniques utilisées pour analyser et évaluer les tissus musculaires, la salive et les glandes salivaires ont évolué. Cela nous permet de pouvoir comparer les informations retenues, ayant été extraites avec une technologie similaire.

De plus, la sélection s'est faite en fin d'année 2020. Depuis, d'autres études concernant la micropesanteur ont vu le jour, nécessitant une actualisation de la littérature pour les futurs lecteurs.

Concernant les articles présents dans cette revue systématique, nous n'avons pas sélectionné uniquement des études sur les muscles de la sphère oro-faciale. En effet, les études sur les muscles de la tête et du cou sont peu nombreuses, ce qui nous a amené à inclure les muscles squelettiques du reste du corps, nous permettant ainsi d'observer la similarité ou non des effets de la micropesanteur entre ces deux groupes.

A présent, penchons-nous sur les difficultés rencontrées au sein des études. Depuis le commencement de la conquête spatiale, très peu de sujets sont allés dans l'espace. Bien que les méthodes de micropesanteur simulée existent et ont permis une augmentation importante du nombre d'expérimentations, les modèles vivants ayant expérimentés la micropesanteur réelle sont peu nombreux. Ce problème est d'autant plus vrai pour le modèle humain, ce qui nous amène à avoir des études chez l'Homme en micropesanteur réelle avec un nombre très restreint de participants. Pour augmenter le nombre de participants, les données sont extraites de différents vols se succédant, permettant ainsi de passer de quelques personnes à plusieurs dizaines, comme pour l'évaluation de la force isocinétique comportant 37 membres d'équipage à bord de l'ISS durant 163 +/- 38 jours. Cette étude a permis d'objectiver une perte de force musculaire et l'absence de différence entre les hommes et les femmes (55).

Au sein de cette revue systématique, et à travers les différentes données extraites, nous avons pu observer les nombreux effets de la micropesanteur. Cependant, tous ces effets ne peuvent être imputés à la micropesanteur seule. De nombreux éléments rentrent en jeu lors d'un vol spatial. Les astronautes rencontrent des conditions inhabituelles, comme l'isolement physique et social, l'altération du cycle jour-nuit, ou encore les phases de décollage et d'atterrissage étant source de stress intense pour l'équipage. De plus, les paramètres diffèrent largement entre les études, tels que la durée des vols, le sexe et l'âge des sujets, la nutrition ou la durée entre l'atterrissage et le prélèvement des données.

C'est pourquoi de nombreuses études intègrent en plus de leur groupe témoin habituel, un groupe témoin évoluant au sein d'un AEM ou d'une capsule de contrôle, c'est-à-dire répliquant les conditions de vie du vol spatial. C'est avec ce type de témoins que plusieurs études ont pu montrer que certains effets n'étaient pas dus à l'état de micropesanteur uniquement, mais à l'environnement dans lequel les sujets étaient placés, car les effets étaient les mêmes dans le groupe AEM et au sein du vol spatial (67).

De plus, des recherches ont montré que les rats logés en groupe dans les vols spatiaux présentaient sept fois plus de rotations de leur torse que les témoins au sol. Ainsi, le déchargement du système musculo-squelettique peut ne pas être réalisé en micropesanteur quand les animaux peuvent interagir les uns avec les autres.

## 3.2. Analyse des résultats

### 3.2.1. Les muscles squelettiques

Au sein de cette revue systématique, nous avons pu constater les différents effets de la micropesanteur sur les muscles squelettiques, la salive et les glandes salivaires.

Concernant les muscles, il y a une tendance à la perte musculaire avec la modification de nombreux paramètres au niveau morphologique, cellulaire et moléculaire. Cependant, les muscles ne réagissent pas tous de la même manière, suivant leurs fonctions et leurs compositions.

En effet, plusieurs études sur les muscles de la tête et du cou montrent un comportement différent face à la micropesanteur. Au niveau des muscles masticateurs et des muscles du cou, nous observons l'absence d'effets (43)(57)(59), voire une augmentation de la section transversale et une hypertrophie post-vol dans plusieurs muscles du cou (59).

Les muscles cervicaux ne sont pas soumis aux mêmes effets dégradants que la micropesanteur confère à la majorité des muscles.

Au niveau du muscle masséter, 2 études mettent en évidence l'absence d'effet sur la force de morsure maximale (57), et l'absence d'effet sur sa masse, sur la distribution de la taille des fibres et sur l'expression génique (43).

Par exemple, dans des situations cliniques telles que la myopathie en soins intensifs, les muscles masticateurs ne perdent pas de masse (43).

En général, une charge continue au cours d'un vol spatial empêche l'atrophie, mais les muscles masticateurs ont un point de consigne différent. Ces résultats indiquent qu'une charge mécanique continue du muscle squelettique dans un environnement de micropesanteur peut empêcher l'atrophie, mais peut ne pas être suffisante pour protéger contre la perte de puissance.

Tous ces changements affectent le tissu musculaire, mais certains muscles et mécanismes sont plus touchés par rapport aux autres.

Un vol prolongé en micropesanteur entraîne une perte musculaire et une réduction de la force, c'est l'atrophie spatiale. Quand l'organisme est exposé à la microgravité, les myoblastes

des muscles squelettiques sont déchargés mécaniquement et réagissent par une prolifération cellulaire atténuée, une progression du cycle cellulaire ralentie et une expression protéique modifiée (38). C'est le cas pour la majorité des muscles squelettiques.

Les changements les plus marqués sont observés dans les muscles à phénotype lent, composé en grande partie de fibres de type I, comme le muscle soléaire.

Les autres muscles sont moins touchés, principalement ceux présentant un phénotype rapide, composé majoritairement de fibres de type II. Par exemple, 7 études montrent l'absence d'atrophie, d'effet sur la section transversale, sur la force ou sur la masse musculaire au niveau du long extenseur des orteils, du gastrocnémien, du tibial antérieur, du muscle plantaire, du muscle vaste latéral, du fléchisseur du genou et du triceps brachial, qui lui, est un muscle à phénotype lent, mais n'a pas de fonction « antigravité » (Tableaux 3 et 4).

De plus, au sein d'un même muscle, les changements ne sont pas uniformes. Par exemple, nous avons une diminution de la masse et de la force hiérarchisée de façon décroissante : soléaire de type I > soléaire de type II > gastrocnémien de type I > gastrocnémien de type II (46). La plupart des études chez l'animal montre une atrophie préférentielle des fibres à contraction lente dont les propriétés mécaniques évoluent vers le type rapide.

Tous ces changements sont dus à de nombreuses modifications au niveau de l'expression génique, de l'activité enzymatique, du cycle cellulaire, de la quantité de protéines et au sein du métabolisme et du fonctionnement cellulaire.

3 études *in vitro* sont incluses dans la revue de la littérature et montrent qu'il existe au niveau des myoblastes une atténuation de la différenciation ainsi qu'une diminution du taux de protéines contractiles (myosine et tropomyosine) qui amènent à des conséquences sur la croissance et la réparation musculaire (27).

Un des mécanismes amenant à une diminution de la force musculaire est la diminution de l'affinité au  $Ca^{2+}$  (45).

Nous avons également observé dans 6 études une transition du phénotype des fibres de type I (lent) à II (rapide). Ce changement de phénotype est lié à une régulation négative des protéines mitochondriales et à une régulation positive des protéines glycolytiques, suggérant un passage du métabolisme oxydatif au métabolisme glycolytique (Tableaux 5 et 6).

Pour conclure, l'atrophie du muscle squelettique résulte d'une diminution de la teneur en protéines due à une diminution de la synthèse des protéines, d'une augmentation de la dégradation des protéines ou des deux combinées.

### 3.2.2. La salive et les glandes salivaires

Le nombre d'études sur la salive et les glandes salivaires est moindre par rapport aux muscles squelettiques. Cependant, nous pouvons observer des effets intéressants dans les articles retenus.

La salive est utile pour les analyses médicales générales et en particulier pour surveiller la physiologie et la santé des astronautes. Elle contient des protéines sécrétées par les glandes salivaires et est facilement collectée, ce qui facilite le prélèvement lors des missions spatiales.

C'est un fluide corporel de choix qui permet d'objectiver énormément de paramètres différents. Par exemple, l'environnement de vol spatial modifie l'expression protéique. La détermination des changements dans les protéines salivaires permet d'amener la mise en place de méthodes non invasives pour évaluer l'état des membres d'équipage, ce qui est indispensable dans les missions de longues durées.

Plusieurs études mettent en évidence une augmentation du stress suite à l'augmentation du taux d'hormones de stress dans la salive ainsi qu'une augmentation du stress oxydatif.

Ces paramètres sont observés à la fois en micropesanteur réelle et en micropesanteur simulée. Ces résultats permettent de confirmer l'importance des expériences réalisées sur Terre et suggèrent que l'allitement prolongé avec la tête en bas (HDT - 6 °) est une méthode fiable d'induction de stress psychologique et est donc utile pour les études qui visent à évaluer le stress, en mesurant les marqueurs de stress salivaires. En raison de l'augmentation future du nombre et de la durée des vols spatiaux, dont ceux à destination des stations spatiales en orbite de Mars, il est indispensable de réaliser des études supplémentaires sur l'importance biologique des changements induits par les vols spatiaux dans les paramètres de stress. Le HDT – 6° semble être un modèle au sol utile pour induire des changements de stress psychologique dans le système immunitaire.

De plus, les études présentent une augmentation de l'activité et de la quantité de *Streptococcus mutans*, ainsi que du taux de MMP-8 et 9. Les MMP sont des médiateurs clés de la destruction parodontale et contribuent à la progression de la parodontite (69).

Parmi les 6 études présentant des effets délétères, 2 études notent la diminution du débit salivaire, ainsi qu'une xérostomie. D'autres expériences devront être mises en place, pour se questionner sur les conséquences d'une xérostomie sur la santé bucco-dentaire lors d'un vol de plusieurs mois voire plusieurs années. En effet, si le risque de xérostomie est élevé, il faudra mettre en place des méthodes de prévention pour éviter l'apparition de lésions buccales, de caries, de maladies parodontales ou de candidoses pouvant amener à une mauvaise nutrition et à un inconfort physique et psychologique (70).

Nous pouvons dire que la micropesanteur induit des changements dans la composition salivaire, reflétant les effets sur l'organisme entier.

Concernant les glandes salivaires, 3 études investiguent le modèle animal, et seulement une le modèle humain, mettant en évidence un gonflement et des douleurs au niveau des ostiums des glandes sous-maxillaires et sublinguales.

Chez l'animal, les études révèlent des effets délétères dans la glande parotide au niveau morphologique, cellulaire et moléculaire, bien qu'une étude ait révélé l'absence d'effet.

Cependant, aucune modification n'est apparue dans les glandes sublinguales et sous-maxillaires.

Au cours d'une étude, le vol spatial a modifié l'expression des protéines sécrétoires dans la glande sous-maxillaire de souris mâles uniquement, et suggère que le sexe des animaux et la durée du vol peuvent affecter la réponse. Cette modification a été classée dans la colonne des effets « positifs » et correspond à l'augmentation des facteurs de croissance épidermique et nerveuse. Il faut prendre du recul quant à cette information qui peut avoir un double sens. En effet, le facteur de croissance épidermique joue un rôle dans la prolifération cellulaire, ce qui est souhaitable pour des cellules saines, mais qui l'est moins lors de cancers. De la même manière, le facteur de croissance nerveuse intervient au niveau de la croissance, de la prolifération et de la survie des neurones, mais aussi dans le circuit neuronal, augmentant la sensibilité à la douleur, lors d'une inflammation par exemple (21).

Les glandes salivaires individuelles réagissent donc différemment à la micropesanteur.

### 3.3.Perspectives

Nous avons pu voir au cours de cette revue systématique les nombreux effets induits par la micropesanteur, qu'elle soit réelle ou simulée. La plupart ont été classés en tant qu'effets « négatifs ». Cependant, il faut se questionner sur le caractère positif ou négatif de ces modifications. Par exemple, est-ce que le passage d'un phénotype de fibres lent à rapide dans les muscles squelettiques est réellement un effet délétère, ou simplement une adaptation à un nouvel environnement ? En effet, quel est l'avantage dans l'espace d'avoir des muscles posturaux puissants, ou des muscles de type I fortement développés servant en général aux efforts de longue durée ? Le seul problème que l'on peut voir ici est la perspective du retour sur Terre, ou du moins d'un retour à la gravité.

L'Homme et l'animal se sont toujours adaptés au mieux à toutes sortes d'environnements inhospitaliers, et ce, depuis des millions d'années. C'est pourquoi nous avons autour du monde pléthore d'ethnies, d'espèces et de races différentes, chacune s'acclimatant au mieux depuis des générations à des températures extrêmes, à différents types de nourriture ou de prédateurs.

A présent, concernant les études, nombreux sont les paramètres qui diffèrent entre chacune d'elles. C'est un problème pour l'analyse des résultats. Il est parfois difficile de conclure sur les effets de la micropesanteur car la mise en place des expérimentations n'est pas encore parfaitement standardisée entre les différents pays ou même entre les différentes missions. La tendance est à la normalisation, mais les instances devront faire encore plus d'efforts dans le futur afin d'uniformiser les paramètres. Par exemple, chez l'animal, de nombreuses études mettent en place, en plus de leurs témoins au sol placés dans des vivariums, des témoins au sein d'AEM, qui sont des enceintes répliquant les cages du vol spatial, la micropesanteur en moins.

Ce n'est pas le cas pour l'Homme. Il est souvent comparé à l'équipage du vol spatial, des témoins au sol soumis à la micropesanteur simulée. Mais l'environnement n'est pas modifié, il n'y a pas de confinement dans un espace clos, d'isolement physique ou social, comme peuvent endurer les astronautes lors de leurs missions pouvant durer plusieurs mois. Au sein de la revue, une étude a observé les effets sur la salive dans l'environnement simulé de

Mars, isolé et confiné dans la station de recherche de Mars aux Etats-Unis au milieu du désert (66). Cette étude a révélé des effets semblables à une mission spatiale, avec une augmentation des biomarqueurs salivaires de stress, une diminution de l'immunité ainsi que du débit salivaire. Il faudrait donc à l'avenir, pour comparer les effets de la micropesanteur réelle, mettre en place les techniques de micropesanteur simulée dans un environnement répliquant les stations spatiales.

Dans la continuité de ces efforts, la standardisation de tous les paramètres devra se faire, étant donné les nombreuses différences d'une étude à une autre, tels que la nutrition, l'âge, le sexe ou encore la durée des études.

Les expériences chez le modèle humain sont à améliorer au niveau de la représentativité des sexes. En effet, les femmes sont sous-représentées dans les études en micropesanteur réelle. Cela s'explique par le fait que parmi presque 600 personnes envoyées dans l'espace depuis le début de la conquête spatiale, seulement 11,4% sont des femmes (71). Cependant, c'est également le cas pour les expériences en micropesanteur simulée, où les sujets sont rarement des astronautes, mais plus souvent des personnes lambda acceptant, contre rémunération, de passer plusieurs semaines allongées avec la tête inclinée vers le bas par exemple. Au sein de la revue, la majorité des sujets en micropesanteur simulée sont des hommes (> 80%), pourtant les effets diffèrent entre les sexes. Il existe des différences entre les sexes au niveau des paramètres musculaires, des taux d'hormones, et de bien d'autres paramètres.

Les perspectives de voyage de très longues durées vont amener les instances spatiales à augmenter le nombre d'expérience chez la femme. A ce jour, la théorie est entière quant aux spécificités sexuelles de la femme, mais est déjà étudié chez l'animal. En effet, la reproduction animale a fait l'objet d'études en micropesanteur réelle. Il est aujourd'hui difficile à imaginer d'envoyer une femme enceinte dans l'espace pour observer les effets sur le développement embryonnaire. La communauté scientifique ne connaît pas non plus les effets de la micropesanteur sur les menstruations. En attente d'expérimentations à ce sujet, les femmes astronautes prennent des pilules pour éviter les règles pendant les missions. Cependant, ce type d'étude semble être inévitable dans un futur proche, lorsque les voyages sur Mars seront devenus ordinaires. Il n'est pas insensé de penser que l'on connaîtra peut-être, avant la fin du siècle, le nom du premier être humain né dans l'espace.

Les muscles squelettiques subissent de nombreuses modifications en micropesanteur réelle et simulée. Ces études permettent de prévoir les effets des missions spatiales et notamment des futurs voyages vers Mars, mais pas seulement. Beaucoup d'expérimentations servent à améliorer la vie sur Terre, et la recherche en micropesanteur est un moyen de mieux comprendre le fonctionnement à la surface de la Terre. Par exemple, des études sur le tissu musculaire n'ont pas pour objectif premier de se questionner sur les vols spatiaux de longue durée, mais s'interrogent sur l'atrophie musculaire des personnes alitées sur Terre et les méthodes pour y remédier. Cela s'applique à tous les domaines, que ce soit les sciences de la vie ou les sciences physiques.

En ce qui concerne la salive, les scientifiques voient en ce liquide biologique le moyen le plus simple et le plus rapide d'investiguer la santé générale des astronautes. Les prélèvements salivaires sont faits par les membres d'équipage en vol, mais ne sont analysés qu'à leur retour sur Terre. L'objectif dans le futur sera la conception d'un appareil d'analyses à bord même des engins spatiaux, permettant le *monitoring* quotidien des constantes mesurables dans la salive.

Dans cette revue systématique de la littérature, les effets de la micropesanteur ont été recherchés. Toutes ces études sont utiles pour l'élaboration de contre-mesures. Nombreux sont les articles qui abordent ce sujet, notamment pour contrer l'atrophie musculaire généralisée que connaissent les astronautes. Des dispositifs d'exercices de plus en plus complexes se développent à bord de l'ISS, mais ne permettent pas un maintien total des capacités musculaires. Dans l'immédiat, la communauté scientifique n'est pas entièrement confiante quant aux voyages vers Mars car malgré les contre-mesures physiques, médicamenteuses ou nutritionnelles, l'équipage connaît encore de grands changements biologiques. En effet, le record du plus long vol dans l'espace étant de 437 jours, il faudra compter environ 250 jours pour aller sur Mars, autant pour en revenir, et rajouter la période que passera les astronautes en orbite ou sur la planète, ce qui dépassera largement ce qui a déjà été fait en orbite de la Terre.

Dans notre revue, la période de micropesanteur réelle la plus longue expérimentée par l'Homme est de 215 jours.

## CONCLUSION

Cette revue de la littérature permet d'observer les effets de la micropesanteur et de comprendre qu'ils diffèrent selon les individus, les conditions de vol, le type de muscle ou le type de glandes salivaires.

La tendance au niveau des muscles squelettiques est une atrophie musculaire, plus marquée dans les muscles à phénotype lent et ayant une fonction antigraité. Cependant, les muscles masticateurs et les muscles du cou réagissent différemment. Ils ne connaissent pas, ou de manières minimales, les effets délétères que subissent les muscles du reste de l'organisme. Pour certains muscles du cou, nous observons même une augmentation de la section transversale.

Malgré le nombre réduit d'études, nous pouvons conclure que les modifications des glandes salivaires ne sont pas uniformes entre les différentes glandes. Nous observons des effets plus marqués au niveau la parotide, les autres glandes ne présentant que très peu de transformation.

La salive, quant à elle, connaît de nombreux changements, reflétant les effets sur la santé générale des organismes confrontés à la micropesanteur.

Toutes ces recherches permettent d'améliorer la vie sur Terre, mais aussi de se projeter pour les futures missions spatiales qui permettront d'explorer et de coloniser des contrées lointaines, à l'aide de vols de très longues durées.

## BIBLIOGRAPHIE

1. "Le principe de la chute des corps". [En ligne]. Disponible sur : [http://hommevolant.tpe2013.free.fr/le\\_principe\\_de\\_la\\_chute\\_des\\_corps\\_033.htm](http://hommevolant.tpe2013.free.fr/le_principe_de_la_chute_des_corps_033.htm). (page consultée le 3 mars 2021).
2. "Gravité et pesanteur". [En ligne]. Disponible sur : [http://www.neuroreille.com/levestibule/encarts/c\\_accueil-encart3.htm](http://www.neuroreille.com/levestibule/encarts/c_accueil-encart3.htm). (page consultée le 3 mars 2021).
3. "Futura. Station spatiale internationale". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/astronautique-station-spatiale-internationale-2571/>. (page consultée le 3 mars 2021).
4. "Les stations spatiales passées, présentes et futures – Société astronomique de France". [En ligne]. Disponible sur : <https://saf-astronomie.fr/les-stations-spatiales-passees-presentes-et-futures/>. (page consultée le 3 mars 2021).
5. Provost r. Adaptation cardiovasculaire de l'astronaute : en confinement et en microgravité réelle et simulée. Thèse : docteur de l'Université François Rabelais de Tours : 2015.
6. "Technique du vol parabolique zéro gravité". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.airzerog.com/fr/technique-vols-parabolique-zero-g/>. (page consultée le 4 mars 2021).
7. "Fundamental Space Biology". [En ligne]. Disponible sur : [https://web.archive.org/web/20070802081905/http://www.fundamentalbiology.arc.nasa.gov/science/SC\\_SFpast.html](https://web.archive.org/web/20070802081905/http://www.fundamentalbiology.arc.nasa.gov/science/SC_SFpast.html). (page consultée le cité 4 mars 2021).
8. Pandiarajan M, Hargens AR. Ground-Based Analogs for Human Spaceflight. *Front Physiol.* 23 juin 2020;11:716.
9. Hargens AR, Vico L. Long-duration bed rest as an analog to microgravity. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 15 avr 2016;120(8):891-903.
10. Tomilovskaya E, Shigueva T, Sayenko D, Rukavishnikov I, Kozlovskaya I. Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects. *Front Physiol.* 27 mars 2019;10:284.
11. Barjaktarović Z, Nordheim A, Lamkemeyer T, Fladerer C, Madlung J, Hampp R. Time-course of changes in amounts of specific proteins upon exposure to hyper-g, 2-D clinorotation, and 3-D random positioning of Arabidopsis cell cultures. *J Exp Bot.* 2007;58(15-16):4357-63.
12. Herranz R, Anken R, Boonstra J, Braun M, Christianen PCM, de Geest M, et al. Ground-Based Facilities for Simulation of Microgravity: Organism-Specific Recommendations for Their Use, and Recommended Terminology. *Astrobiology.* janv 2013;13(1):1-17.
13. Borst AG, van Loon JJWA. Technology and Developments for the Random Positioning Machine, RPM. *Microgravity Sci Technol.* nov 2009;21(4):287-92.

14. Radtke AL, Herbst-Kralovetz MM. Culturing and Applications of Rotating Wall Vessel Bioreactor Derived 3D Epithelial Cell Models. *J Vis Exp JoVE*. 3 avr 2012;(62):3868.
15. Kanoui D. Comparaison des effets de la micropesanteur d'un vol spatial sur l'os du massif cranio-facial, le squelette et les dents : une revue systématique. Thèse : docteur en chirurgie-dentaire : Bordeaux : 2019 :71.
16. Gedda M. Traduction française des lignes directrices PRISMA pour l'écriture et la lecture des revues systématiques et des méta-analyses. *Kinésithérapie, la Revue*. janv 2015;15(157):39-44.
17. "Les différents types de muscles - Institut de Myologie ". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.institut-myologie.org/enseignement/connaissances-sur-le-muscle/les-differents-types-de-muscles/>. (page consultée le 2 juin 2021).
18. Bonnel PF. La pennation musculaire (sarcomères, fibres, fascicules musculaires et aponévroses) (2e partie). :7.
19. Favier J, Letouzé É. Mutations de la succinate déshydrogénase et méthylation de l'ADN - Un nouveau lien entre métabolisme cellulaire, épigénétique et cancer. *Med Sci (Paris)*. 1 déc 2013;29(12):1092-4.
20. "SHBG - Glossaire | Laboratoire, radiologie, sommeil et génétique |". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.biron.com/fr/glossaire/shbg/>. (page consultée le 2 juillet 2021).
21. "Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine" [En ligne]. Disponible sur : <https://dictionnaire.academie-medecine.fr/index.php?q=facteur+de+croissance+%C3%A9pidermique>. (page consultée le 2 juin 2021).
22. Sandonà D, Desaphy J-F, Camerino GM, Bianchini E, Ciciliot S, Danieli-Betto D, et al. Adaptation of mouse skeletal muscle to long-term microgravity in the MDS mission. *PloS One*. 2012;7(3):e33232.
23. Koryak YA. Architectural and functional specifics of the human triceps surae muscle in vivo and its adaptation to microgravity. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 1 avr 2019;126(4):880-93.
24. Belozerova IN, Nemirovskaya TL, Shenkman BS, Kozlovskaya IB. Characteristic of changes in the structure and metabolism of the vastus lateralis muscles in monkeys after space flight. *Neurosci Behav Physiol*. sept 2003;33(7):735-40.
25. Trappe SW, Trappe TA, Lee GA, Widrick JJ, Costill DL, Fitts RH. Comparison of a space shuttle flight (STS-78) and bed rest on human muscle function. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. juill 2001;91(1):57-64.
26. Riley DA, Bain JL, Thompson JL, Fitts RH, Widrick JJ, Trappe SW, et al. Decreased thin filament density and length in human atrophic soleus muscle fibers after spaceflight. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. févr 2000;88(2):567-72.
27. Torgan CE, Burge SS, Collinsworth AM, Truskey GA, Kraus WE. Differentiation of mammalian skeletal muscle cells cultured on microcarrier beads in a rotating cell culture system. *Med Biol Eng Comput*. sept 2000;38(5):583-90.

28. Demangel R, Treffel L, Py G, Brioché T, Pagano AF, Bareille M-P, et al. Early structural and functional signature of 3-day human skeletal muscle disuse using the dry immersion model. *J Physiol*. 1 juill 2017;595(13):4301-15.
29. Schuenke MD, Reed DW, Kraemer WJ, Staron RS, Volek JS, Hymer WC, et al. Effects of 14 days of microgravity on fast hindlimb and diaphragm muscles of the rat. *Eur J Appl Physiol*. août 2009;106(6):885-92.
30. Tesch PA, Berg HE, Bring D, Evans HJ, LeBlanc AD. Effects of 17-day spaceflight on knee extensor muscle function and size. *Eur J Appl Physiol*. janv 2005;93(4):463-8.
31. Ishihara A, Nagatomo F, Terada M, Fujino H, Kondo H, Ishioka N. Effects of microgravity on the mouse triceps brachii muscle. *Muscle Nerve*. juill 2015;52(1):63-8.
32. Allen DL, Bandstra ER, Harrison BC, Thorng S, Stodieck LS, Kostenuik PJ, et al. Effects of spaceflight on murine skeletal muscle gene expression. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. févr 2009;106(2):582-95.
33. Hansen G, Martinuk KJB, Bell GJ, MacLean IM, Martin TP, Putman CT. Effects of spaceflight on myosin heavy-chain content, fibre morphology and succinate dehydrogenase activity in rat diaphragm. *Pflugers Arch*. mai 2004;448(2):239-47.
34. Shen H, Lim C, Schwartz AG, Andreev-Andrievskiy A, Deymier AC, Thomopoulos S. Effects of spaceflight on the muscles of the murine shoulder. *FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol*. déc 2017;31(12):5466-77.
35. Shenkman BS, Belozeroва IN, Lee P, Nemirovskaya TL, Kozlovskaya IB. Effects of weightlessness and movement restriction on the structure and metabolism of the soleus muscle in monkeys after space flight. *Neurosci Behav Physiol*. sept 2003;33(7):717-22.
36. Ishihara A, Fujino H, Nagatomo F, Takeda I, Ohira Y. Gene expression levels of heat shock proteins in the soleus and plantaris muscles of rats after hindlimb suspension or spaceflight. *J Physiol Sci JPS*. déc 2008;58(6):413-7.
37. Gambará G, Salanova M, Ciciliot S, Furlan S, Gutschmann M, Schiffl G, et al. Gene Expression Profiling in Slow-Type Calf Soleus Muscle of 30 Days Space-Flown Mice. *PloS One*. 2017;12(1):e0169314.
38. Benavides Damm T, Franco-Obregón A, Egli M. Gravitational force modulates G2/M phase exit in mechanically unloaded myoblasts. *Cell Cycle Georget Tex*. 15 sept 2013;12(18):3001-12.
39. Kawashima S, Akima H, Kuno S-Y, Gunji A, Fukunaga T. Human adductor muscles atrophy after short duration of unweighting. *Eur J Appl Physiol*. août 2004;92(4-5):602-5.
40. Ulanova A, Gritsyna Y, Vikhlyantsev I, Salmov N, Bobylev A, Abdusalamova Z, et al. Isoform composition and gene expression of thick and thin filament proteins in striated muscles of mice after 30-day space flight. *BioMed Res Int*. 2015;2015:104735.
41. Koryak YA. Isokinetic Force and Work Capacity After Long-Duration Space Station Mir and Short-Term International Space Station Missions. *Aerosp Med Hum Perform*. 1 mai 2020;91(5):422-31.

42. Smith SM, Heer M, Wang Z, Huntoon CL, Zwart SR. Long-duration space flight and bed rest effects on testosterone and other steroids. *J Clin Endocrinol Metab.* janv 2012;97(1):270-8.
43. Philippou A, Minozzo FC, Spinazzola JM, Smith LR, Lei H, Rassier DE, et al. Masticatory muscles of mouse do not undergo atrophy in space. *FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol.* juill 2015;29(7):2769-79.
44. Lalani R, Bhasin S, Byhower F, Tarnuzzer R, Grant M, Shen R, et al. Myostatin and insulin-like growth factor-I and -II expression in the muscle of rats exposed to the microgravity environment of the NeuroLab space shuttle flight. *J Endocrinol.* déc 2000;167(3):417-28.
45. Kischel P, Stevens L, Montel V, Picquet F, Mounier Y. Plasticity of monkey triceps muscle fibers in microgravity conditions. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. mai 2001;90(5):1825-32.
46. Fitts RH, Trappe SW, Costill DL, Gallagher PM, Creer AC, Colloton PA, et al. Prolonged space flight-induced alterations in the structure and function of human skeletal muscle fibres. *J Physiol.* 15 sept 2010;588(Pt 18):3567-92.
47. Tascher G, Brioché T, Maes P, Chopard A, O’Gorman D, Gauquelin-Koch G, et al. Proteome-wide Adaptations of Mouse Skeletal Muscles during a Full Month in Space. *J Proteome Res.* 7 juill 2017;16(7):2623-38.
48. Harrison BC, Allen DL, Girten B, Stodieck LS, Kostenuik PJ, Bateman TA, et al. Skeletal muscle adaptations to microgravity exposure in the mouse. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. déc 2003;95(6):2462-70.
49. Nikawa T, Ishidoh K, Hirasaka K, Ishihara I, Ikemoto M, Kano M, et al. Skeletal muscle gene expression in space-flown rats. *FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol.* mars 2004;18(3):522-4.
50. Ikemoto M, Nikawa T, Takeda S, Watanabe C, Kitano T, Baldwin KM, et al. Space shuttle flight (STS-90) enhances degradation of rat myosin heavy chain in association with activation of ubiquitin-proteasome pathway. *FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol.* mai 2001;15(7):1279-81.
51. Fitts RH, Desplanches D, Romatowski JG, Widrick JJ. Spaceflight effects on single skeletal muscle fiber function in the rhesus monkey. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* nov 2000;279(5):R1546-1557.
52. Ogneva IV, Maximova MV, Larina IM. Structure of cortical cytoskeleton in fibers of mouse muscle cells after being exposed to a 30-day space flight on board the BION-M1 biosatellite. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 15 mai 2014;116(10):1315-23.
53. Kraemer WJ, Staron RS, Gordon SE, Volek JS, Koziris LP, Duncan ND, et al. The effects of 10 days of spaceflight on the shuttle Endeavor on predominantly fast-twitch muscles in the rat. *Histochem Cell Biol.* nov 2000;114(5):349-55.
54. Kourtidou-Papadeli C, Kyparos A, Albani M, Frossinis A, Papadelis CL, Bamidis P, et al. Electrophysiological, histochemical, and hormonal adaptation of rat muscle after prolonged hindlimb suspension. *Acta Astronaut.* 2004;54(10):737-47.

55. English KL, Lee SMC, Loehr JA, Ploutz-Snyder RJ, Ploutz-Snyder LL, Reeves JM. Isokinetic strength changes following long-duration spaceflight on the ISS. *Aerosp Med Hum Perform.* 2015;86:A68-77.
56. Chang DG, Healey RM, Snyder AJ, Sayson JV, Macias BR, Coughlin DG, et al. Lumbar spine paraspinal muscle and intervertebral disc height changes in astronauts after long-duration spaceflight on the International Space Station. *Spine.* 2016;41(24):1917-24.
57. Treffel L, Dmitrieva L, Gauquelin-Koch G, Custaud M-A, Blanc S, Gharib C, et al. Craniomandibular system and postural balance after 3-day dry immersion. *PLoS ONE.* 2016;11(2).
58. Ohira T, Ohira T, Kawano F, Shibaguchi T, Okabe H, Goto K, et al. Effects of gravitational loading levels on protein expression related to metabolic and/or morphologic properties of mouse neck muscles. *Physiol Rep.* 1 janv 2014;2(1):e00183.
59. McNamara KP, Greene KA, Tooze JA, Dang J, Khattab K, Lenchik L, et al. Neck Muscle Changes Following Long-Duration Spaceflight. *Front Physiol.* 2019;10:1115.
60. Rai B, Kaur J, Catalina M. Bone mineral density, bone mineral content, gingival crevicular fluid (matrix metalloproteinases, cathepsin K, osteocalcin), and salivary and serum osteocalcin levels in human mandible and alveolar bone under conditions of simulated microgravity. *J Oral Sci.* 2010;52(3):385-90.
61. Rai B, Kaur J, Catalina M, Anand SC, Jacobs R, Teughels W. Effect of Simulated Microgravity on Salivary and Serum Oxidants, Antioxidants, and Periodontal Status. *J Periodontol.* oct 2011;82(10):1478-82.
62. Hand AR, Dagdeviren D, Larson NA, Haxhi C, Mednieks MI. Effects of spaceflight on the mouse submandibular gland. *Arch Oral Biol.* févr 2020;110:104621.
63. Rai B, Kaur J, Foing BH. Evaluation by an aeronautic dentist on the adverse effects of a six-week period of microgravity on the oral cavity. *Int J Dent.* 2011;2011:548068.
64. Sams CF, Crucian BE, Stowe RP, Mehta SK, Yetman DL, Leal MJ, et al. Immune status, latent viral reactivation, and stress during long-duration head-down bed rest. *Aviat Space Environ Med.* 2009;80(5 PART 2):A37-44.
65. Mednieks M, Khatri A, Rubenstein R, Burlison JA, Hand AR. Microgravity alters the expression of salivary proteins. *Oral Health Dent Manag.* juin 2014;13(2):211-6.
66. Rai B, Kaur J. Periodontal status, salivary immunoglobulin, and microbial counts after short exposure to an isolated environment. *J Oral Sci.* 2013;55(2):139-43.
67. Dagdeviren D, Beallias J, Khan I, Mednieks MI, Hand AR. Response of the mouse sublingual gland to spaceflight. *Eur J Oral Sci.* oct 2018;126(5):373-81.
68. Rai B, Kaur J. Salivary stress markers and psychological stress in simulated microgravity: 21 days in 6° head-down tilt. *J Oral Sci.* mars 2011;53(1):103-7.
69. Mattout C. Le rôle de l'inflammation. 2010 ;4.

70. "Oral Science | Xérostomie". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.oralscience.ca/fr/protocoles/xerostomie/> ((page consultée le 6 juillet 2021)

71. "11,4 % de femmes dans l'Espace : qui sont ces astronautes (pas) comme les autres ?" [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ladydata.fr/femmes-astronautes-espace/> (page consultée le 6 juillet 2021)

## ANNEXE

### Annexe 1 : grille de lecture des articles sélectionnés

ARTICLES de (22) à (25)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Sandonà D, Desaphy J-F, Camerino GM, Bianchini E, Ciciliot S, Danieli-Betto D, et al. Adaptation of mouse skeletal muscle to long-term microgravity in the MDS mission. PloS One. 2012;7(3):e33232.	Souris	MP réelle : ISS 91 jours	- Immunofluorescence - Analyses morphométriques et immunohistochimiques	- Caractéristiques fibres musculaires - Chaîne lourde de la myosine (CMH) - Expression génique	3	Au sol : - 3 souris dans cage de laboratoire normale - 3 dans AEM		- Muscle soléaire - Muscle long extenseur des orteils (EDL)	- Atrophie musculaire dans tous les types de fibres du muscle soléaire à contraction lente - CMH : transition lente à rapide - Divers gènes liés au stress à la hausse dans l'EDL de vol spatial, et non dans le soléaire - Après 91 jours : atrophie évidente dans le muscle soléaire antigravité, mais absente dans le muscle EDL
Koryak YA. Architectural and functional specifics of the human triceps surae muscle in vivo and its adaptation to microgravity. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. 1 avr 2019;126(4):880-93.	Homme	MP réelle 213 +/- 30,5 jours	Images ultrasonores longitudinales	- Contraction volontaire maximale (MVC) - Tension tétanique (TT) - Temps de contraction volontaires et électriquement provoqués - Manque de force (MF)	8 hommes	Non		Muscle triceps sural regroupant : - muscles gastrocnémien médial et latéral - muscle soléaire	- MVC et TT ont diminué de 42 et 26%, respectivement, et le manque de force a augmenté de 50%. - Muscles ayant des rôles fonctionnels différents peuvent réagir différemment au déchargement
Belozerova IN, Nemirovskaya TL, Shenkman BS, Kozlovskaya IB. Characteristic of changes in the structure and metabolism of the vastus lateralis muscles in monkeys after space flight. Neurosci Behav Physiol. sept 2003;33(7):735-40.	Singe (Macaque rhésus)	MP réelle : capsule dans BION-11	Morphométrie	- Protéines - Pic respiratoire des fibres - Activité enzymatique - Section transversale (CSA)	2	Témoins au sol : 8		Muscle quadriceps (m. vaste latéral)	- Quantité de protéines totales dans les fibres musculaires n'a pas diminué - Diminution du pic respiratoire dans le pool de fibres musculaires après le vol spatial - Diminution de l'activité des enzymes oxydantes (en particulier dans les fibres rapides du muscle) - Diminution CSA des fibres musculaires de type 1 et de type 2
Trappe SW, Trappe TA, Lee GA, Widrick JJ, Costill DL, Fitts RH. Comparison of a space shuttle flight (STS-78) and bed rest on human muscle function. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. juill 2001;91(1):57-64.	Homme	MP réelle : navette spatiale Columbia (STS-78) 17 jours	Biopsie	Taille, composition et caractéristiques contractiles des fibres musculaires	4 hommes	Témoins au sol : 8 hommes : <i>bed rest (BR)</i> = repos au lit avec inclinaison tête en bas de 6 degrés (HDT - 6°)		Muscle du mollet	- Force isométrique maximale du mollet et caractéristiques force-vitesse inchangées - Pas d'effet sur la composition des fibres ou la taille des fibres - Aucun changement de la force et de la morphologie des muscles du mollet après les 17 jours ni en BR - Suggestion : la séquence de test utilisée peut avoir servi de contre-mesure d'entraînement en résistance pour atténuer la perte de force musculaire totale

ARTICLES de (26) à (29)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Riley DA, Bain JL, Thompson JL, Fitts RH, Widrick JJ, Trappe SW, et al. Decreased thin filament density and length in human atrophic soleus muscle fibers after spaceflight. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. févr 2000;88(2):567-72.	Homme	MP réelle : STS-78 17 jours	- Microscope électronique - Biopsie	- Densité et espacement des myofibrilles - Force	4 hommes	Témoins au sol : 17 jours : <i>bed rest</i> HDT -6°		Muscle soléaire	- Densité des filaments épais et espacement n'ont pas été modifiés par le vol spatial - Densité des filaments minces de contrôle a diminué dans la zone de bande A de chevauchement - Force par section transversale des fibres soléaires atrophiques a légèrement diminuée de 7 à 9%, et la tension spécifique est restée aux niveaux de contrôle après 17 jours d'alitement
Torgan CE, Burge SS, Collinsworth AM, Truskey GA, Kraus WE. Differentiation of mammalian skeletal muscle cells cultured on microcarrier beads in a rotating cell culture system. Med Biol Eng Comput. sept 2000;38(5):583-90.	Souris	MP simulée : bioréacteur (rotary cell culture system : RCCS)	- Coloration immunohistochimique - Analyse Western	- Différenciation des myoblastes - Taux des protéines contractiles		Cultures témoins tridimensionnelles constituées de myoblastes cultivés sur des billes de microporteurs dans des sacs en téflon		In vitro : myoblastes murins	- Myoblastes cultivés dans le bioréacteur présentent une atténuation de la différenciation, en comparaison avec les cultures témoins - Diminution, par rapport aux cultures témoins, des taux des protéines contractiles myosine (diminution de 47%) et tropomyosine (diminution de 63%) - Conséquences sur la croissance et la réparation musculaires pendant les vols spatiaux
Demangel R, Treffel L, Py G, Brioché T, Pagano AF, Bareille M-P, et al. Early structural and functional signature of 3-day human skeletal muscle disuse using the dry immersion model. J Physiol. 1 juill 2017;595(13):4301-15.	Homme	MP simulée : immersion sèche 3 jours	- Tests de contraction - Analyse IRM et expériences invasives sur les fibres musculaires	- Fonction et structure du muscle - Contraction volontaire maximale (MVC) et viscoélasticité - Cellulaire : fibres musculaires	12	Non		Muscle quadriceps (m. droit fémoral)	- Diminution de 9,1% de MVC - Diminution de la rigidité et du tonus - Diminution de l'élasticité - Au niveau cellulaire : atrophie des fibres musculaires de type I et une proportion accrue de co-expression de fibres hybrides de type I / IIX - Augmentation (de 6 fois) des fibres musculaires NCAM +, montrant un processus de dénervation précoce
Schuenke MD, Reed DW, Kraemer WJ, Staron RS, Volek JS, Hymer WC, et al. Effects of 14 days of microgravity on fast hindlimb and diaphragm muscles of the rat. Eur J Appl Physiol. août 2009;106(6):885-92.	Rat	MP réelle : navette spatiale STS-62 14 jours		- Masse musculaire - Répartition des types de fibres - Section transversale	12	12 témoins au sol		Muscles des membres postérieurs contenant principalement des fibres rapides : - muscle long extenseur des orteils (EDL) - gastrocnémien superficiel "blanc" et profond "rouge"	- Atrophie importante dans presque tous les types de fibres des muscles des membres postérieurs à contraction rapide - Diminution masse musculaire (8-9%) - Diminution section transversale - Aucun changement dans la masse corporelle totale des animaux

ARTICLES de (30) à (33)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Tesch PA, Berg HE, Bring D, Evans HJ, LeBlanc AD. Effects of 17-day spaceflight on knee extensor muscle function and size. Eur J Appl Physiol. janv 2005;93(4):463-8.	Homme	MP réelle : STS-78 17 jours	IRM	- Section transversale - Force musculaire	4 hommes	8 hommes		- Muscles extenseurs et fléchisseurs du genou - Muscles fessiers	- Diminution de la force (10%) - Diminution CSA de l'extenseur du genou et des muscles fessiers (8%) - Aucun changement : CSA du muscle fléchisseur du genou - 8 témoins : force musculaire inchangée
Ishihara A, Nagatomo F, Terada M, Fujino H, Kondo H, Ishioka N. Effects of microgravity on the mouse triceps brachii muscle. Muscle Nerve. juill 2015;52(1):63-8.	Souris	MP réelle : STS-135 13 jours	- Système de traitement d'images assisté par ordinateur - Histochimie	- Section transversale des fibres - Intensité de coloration succinate déshydrogénase (SDH) - Activité SDH	7	Témoins : 7		Muscle triceps brachial ( <u>pas de fonction antigraité</u> )	- Pas de modification : poids corporel, poids musculaire ou CSA - Réduction de l'intensité de coloration SDH de tous les types de fibres - Réduction activité SDH musculaire - Diminution de la capacité oxydative, mais pas une atrophie
Allen DL, Bandstra ER, Harrison BC, Thorng S, Stodieck LS, Kostenuik PJ, et al. Effects of spaceflight on murine skeletal muscle gene expression. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. févr 2009;106(2):582-95.	Souris	MP réelle : STS-108 11 jours	- Analyse de l'expression des puces à ADN - QRT-PCR	- Changements dans les niveaux d'ARNm - Poids - CSA	4	Témoins au sol : - 5 contrôles - 5 suspensions - 5 suspensions puis rechargement		Muscle gastrocnémien	- Changements significatifs dans l'expression de l'ARNm des gènes associés à la croissance musculaire et au type de fibre - Diminution poids corporel - Réductions CSA - Diminution de l'activité de la citrate synthase - 272 ARNm modifiés par les vols spatiaux, dont la majorité affichant des réponses similaires à la suspension des membres postérieurs
Hansen G, Martinuk KJB, Bell GJ, MacLean IM, Martin TP, Putman CT. Effects of spaceflight on myosin heavy-chain content, fibre morphology and succinate dehydrogenase activity in rat diaphragm. Pflugers Arch. mai 2004;448(2):239-47.	Rat	MP réelle : SLS-2 14 jours	- Analyses immunohistochimiques - Électrophorèse	- Chaîne lourde de myosine, - Taille des fibres - Distribution des types de fibres - Propriétés métaboliques - Activité SDH	5 mâles	Témoins au sol : 5		- Gastrocnémien médial (MG) - Tibial antérieur (TA) - Diaphragme	- Muscles gastrocnémien médial et tibial antérieur : transitions de type de fibres lentes à rapides - Pas de changements atrophiques dans le diaphragme, MG ou TA. - Activité de la succinate déshydrogénase inchangée dans le diaphragme, mais inférieure de 34% dans TA - Changements adaptatifs délétères dans les muscles des membres postérieurs, mais pas dans le diaphragme

ARTICLES de (34) à (35)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Shen H, Lim C, Schwartz AG, Andreev-Andrievskiy A, Deymier AC, Thomopoulos S. Effects of spaceflight on the muscles of the murine shoulder. FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol. déc 2017;31(12):5466-77.	Souris	MP réelle : - 15 jours STS-131 - 13 jours STS-135 - 30 jours Bion-M1	- qRT-PCR - Tomographie	- Expression génique - Propriétés des fibres - Force de préhension	21 (= 8+7+6)	Témoins au sol : 30 (= 8+15+7)		Muscles de l'épaule (deltoïde et coiffe des rotateurs)	- Muscle deltoïde générateur de mouvement était plus sensible à la microgravité que les muscles de la coiffe des rotateurs stabilisateurs de l'articulation - STS-131 : expression réduite des gènes myogéniques et adipogènes, alors qu'aucun changement ou une expression accrue de ces gènes a été observée chez les souris de la mission Bion-M1 - STS-135 et Bion-M1 : aucun changement pathologique apparent, tel qu'une dégénérescence des fibres, une infiltration graisseuse ou une fibrose - Réduction significative de la force de préhension, malgré peu de changements structurels
Shenkman BS, Belozerova IN, Lee P, Nemirovskaya TL, Kozlovskaya IB. Effects of weightlessness and movement restriction on the structure and metabolism of the soleus muscle in monkeys after space flight. Neurosci Behav Physiol. sept 2003;33(7):717-22.	Singe	MP réelle : BION-11 14 jours	- Analyse cytophotométrique	- Activité de la succinate déshydrogénase (SDH) - Taille des fibres - Quantité protéique - Nombre de capillaire par fibre	2	8 témoins		Muscle soléaire	- Diminution activité SDH - Diminution de la taille des fibres de type 1 et 2 (bien que la proportion de fibres de type 2 dans le soléaire était faible) - Diminution protéines totales dans les fibres de type 1 et 2 - Diminution nombre de capillaires par fibre

ARTICLES de (36) à (38)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Ishihara A, Fujino H, Nagatomo F, Takeda I, Ohira Y. Gene expression levels of heat shock proteins in the soleus and plantaris muscles of rats after hindlimb suspension or spaceflight. J Physiol Sci JPS. déc 2008;58(6):413-7.	Rat	- MP réelle : 9 jours  - MP simulée : suspension par les membres postérieurs (hindlimb suspension = HLS) 14 jours	PCR	- Niveaux d'expression génique des protéines de choc thermique (HSP = protéines produites par les cellules en réponse à une exposition à des conditions de stress) - Niveaux d'expression d'ARNm de HSP27, HSP70 et HSP84 - Poids musculaire	8 (= 3 + 5)	Témoins au sol / vivarium : 8 (= 3 + 5)		- Muscle soléaire (phénotype principalement lent)  - Muscle plantaire (phénotype principalement rapide)	- Diminution des niveaux d'expression de l'ARNm des 3 HSP dans le muscle soléaire par la suspension des membres postérieurs et le vol spatial - Pas de changement des niveaux d'expression d'ARNm des 3 HSP dans le muscle plantaire - Diminution du poids relatif du muscle soléaire dans le groupe des membres postérieurs suspendus - Aucune différence dans le poids relatif du muscle plantaire entre les groupes témoins et postérieurs en suspension - Diminution du poids absolu du muscle soléaire dans le groupe vol spatial - La diminution des niveaux d'expression d'ARNm des HSP dans le muscle à contraction lente après la suspension des membres postérieurs et le vol spatial est liée à une réduction des niveaux d'activité mécanique et neurale.
Gambara G, Salanova M, Ciciliot S, Furlan S, Gutschmann M, Schiffl G, et al. Gene Expression Profiling in Slow-Type Calf Soleus Muscle of 30 Days Space-Flown Mice. PloS One. 2017;12(1):e0169314.	Souris	MP réelle : BION-M1 30 jours	- qRT-PCR - Immunohistochimie	- Expression génique - Propriétés fibres	5	Témoins : - 5 vivarium - 5 habitat de vol répliqué (AEM)		- Muscle soléaire (phénotype principalement lent) - Muscle long extenseur des orteils (phénotype principalement rapide)	- Atrophie des fibres - Changement de type de myofibres du type I à II - Jusqu'à 680 gènes différenciellement exprimés dans le soléaire spatial, et seulement 72 dans le long extenseur des doigts
Benavides Damm T, Franco-Obregón A, Egli M. Gravitational force modulates G2/M phase exit in mechanically unloaded myoblasts. Cell Cycle Georget Tex. 15 sept 2013;12(18):3001-12.	Souris	MP simulée : RPM = 3D clinostat	BD FACSCalibur	- Capacité proliférative - Progression du cycle cellulaire - Expression des cyclines B et D		Témoins : cellules cultivées dans des conditions normales et d'hypergravité (hyperfuge)		- In vitro  - Myoblastes de muscles squelettiques	- Inhibition de la prolifération cellulaire (accumulation des cellules en phase G2 / M) - Augmentation expression de la cycline B, mais pas de la cycline D - Retard de croissance cellulaire - Pendant l'exposition à la microgravité, les myoblastes des muscles squelettiques sont déchargés mécaniquement et répondent par une prolifération cellulaire atténuée, une progression du cycle cellulaire ralentie et une expression protéique modifiée

ARTICLES de (39) à (42)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Kawashima S, Akima H, Kuno S-Y, Gunji A, Fukunaga T. Human adductor muscles atrophy after short duration of unweighting. Eur J Appl Physiol. août 2004;92(4-5):602-5.	Homme	MP simulée : repos au lit horizontal 20 jours	IRM	Section transversale	5 hommes et 5 femmes	Non		Groupe musculaire adducteur	- Diminution CSA du groupe adducteur et de ses muscles individuels - Rétablissement à la valeur de base dans un délai d'un mois
Ulanova A, Gritsyna Y, Vikhlyantsev I, Salmov N, Bobylev A, Abdusalamova Z, et al. Isoform composition and gene expression of thick and thin filament proteins in striated muscles of mice after 30-day space flight. BioMed Res Int. 2015;2015:104735.	Souris	MP réelle : BION-M1 30 jours	- Coloration Pro-Q Diamond - Immunoblot - qRT-PCR	- Expression génique de la titine et de la nébuline - Propriétés fibres	5	Témoins : 5 vivarium		- Muscle gastrocnémien - Muscle tibial antérieur (TA) - Muscle Psoas	- Prédominance des processus de dégradation des protéines sur les processus de leur synthèse dans ces muscles - Changements phénotypiques : passage de fibres musculaires de type lent à rapide dans TA et gastrocnémien - Diminution de la teneur en titine et en nébuline dans les muscles squelettiques
Koryak YA. Isokinetic Force and Work Capacity After Long-Duration Space Station Mir and Short-Term International Space Station Missions. Aerosp Med Hum Perform. 1 mai 2020;91(5):422-31.	Homme	MP réelle : station orbitale Mir 213 jours et ISS 10 jours	- Système de rééducation isocinétique multi-articulaire LIDO® - Dynamométrie isocinétique	- Fonctions contractiles - Capacité de travail des muscles - Indice de fatigue	9 et 5	Non		Muscles extenseurs et fléchisseurs du dos, du genou et de la cheville	- Diminution la plus importante de la force articulaire maximale observée pour les extenseurs du dos, du genou et de la cheville par rapport aux fléchisseurs - Diminution de la capacité de travail musculaire après vols spatiaux à court et à long terme. - Indice de fatigue après un vol spatial de courte durée : pas de changement - Augmentation de l'indice de fatigue (14,1%) après un vol spatial de longue durée
Smith SM, Heer M, Wang Z, Huntoon CL, Zwart SR. Long-duration space flight and bed rest effects on testosterone and other steroids. J Clin Endocrinol Metab. janv 2012;97(1):270-8.	Homme	- MP réelle : longue durée 48 à 215 jours ISS et Skylab, courte durée 12 à 13 jours navettes spatiales STS-121 et STS-115  - MP simulée : <i>bed rest</i> HDT -6° 30 à 90 jours	- Radio-immunoessais - Chromatographie en phase liquide avec spectrométrie de masse en tandem (LC-MS-MS)	- Testostérone et statut hormonal - Cortisol sérique et urinaire - SHBG	63 (= 15 + 9 + 9 + 30)	Non		- In vitro - Échantillons de sang et d'urine	- Aucune preuve de diminution de la testostérone pendant le vol spatial de longue durée ou l'alitement - Testostérone totale, libre et biodisponible : pas de modification pendant le vol spatial de longue durée, mais diminution le jour de l'atterrissage et après un vol spatial de courte durée. - Aucun changement dans les autres hormones mesurées - Après 12 à 13 jours de vol spatial, la testostérone totale sérique a diminué d'environ 30%

ARTICLES de (43) à (45)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Philippou A, Minozzo FC, Spinazzola JM, Smith LR, Lei H, Rassier DE, et al. Masticatory muscles of mouse do not undergo atrophy in space. FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol. juill 2015;29(7):2769-79.	Souris	MP réelle : navette spatiale STS-135 13 jours	- Leica DMR microscope - Immunoblot - qRT-PCR	- Expression génique - Taille des fibres - Masse musculaire	15	Témoins au sol : 30	Masséter (MA)	Tibial antérieur (TA)	- TA : diminution de la masse musculaire - MA : pas de changement de masse musculaire - Force myofibrille TA : diminution de 3 fois de la force spécifique et de la vitesse de raccourcissement maximale des muscles TA - Pas de changements d'expression génique dans les MA - Après 2 semaines de régime liquide : diminution de la taille des fibres superficielles de MA - Masse corporelle moyenne inchangée - Diminution masse musculaire TA et réduction de 20% du rapport masse musculaire TA / masse corporelle - Pas de changement du rapport masse musculaire MA / masse corporelle - Pas de changement dans la distribution de la taille des fibres musculaires MA
Lalani R, Bhasin S, Byhower F, Tarnuzzer R, Grant M, Shen R, et al. Myostatin and insulin-like growth factor-I and -II expression in the muscle of rats exposed to the microgravity environment of the NeuroLab space shuttle flight. J Endocrinol. déc 2000;167(3):417-28.	Rat	MP réelle : STS-90 NeuroLab 17 jours	- Transcription inverse / PCR - Analyse Northern blot - Immunohistochimie - Test TUNEL et par HPLC	- Niveaux de myostatine et d'IGF-I et -II - ARNm de myostatine, d'IGF-I, d'IGF-II et de protéasome 2c, ubiquitine - Masse musculaire - Poids corporel	12	Témoins au sol : - 12 vivarium - 12 AEM		- Tibial antérieur - Biceps fémoral - Quadriceps - Gastrocnémien	- Diminution poids corporel de 5% - Perte de masse dans tous les groupes musculaires.  - > La perte de masse musculaire squelettique pendant le vol spatial est associée à une augmentation des taux d'ARNm et de protéines de myostatine dans le muscle squelettique, et à une diminution des taux d'ARNm d'IGF-II.
Kischel P, Stevens L, Montel V, Picquet F, Mounier Y. Plasticity of monkey triceps muscle fibers in microgravity conditions. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. mai 2001;90(5):1825-32.	Singe	MP réelle : BION-11 14 jours	Micromètre binoculaire	Propriétés fibres musculaires : - Phénotype - Atrophie - Force - Affinité au Ca <sup>2+</sup>	2	Témoins au sol : - 3 immobilisation du bras - 4 cages		Triceps brachial (majoritairement composé de fibres lentes)	- Changements de lents à rapides dans les fibres à base de myosine. - Processus atrophique plus marqué dans les fibres lentes - Immobilisation du bras : aucune atrophie - Diminution de la force associée à une diminution de l'affinité au Ca <sup>2+</sup> du système contractile

ARTICLES de (46) à (48)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Fitts RH, Trappe SW, Costill DL, Gallagher PM, Creer AC, Colloton PA, et al. Prolonged space flight-induced alterations in the structure and function of human skeletal muscle fibres. J Physiol. 15 sept 2010;588(Pt 18):3567-92.	Homme	MP réelle : ISS 180 jours	Scion Image software	Propriétés fibres : - Diamètre - Force - Masse	9	Non		Muscles gastrocnémiens et soléaires	- Diminutions de la masse et de la force (hiérarchie des effets : soléaire de type I > soléaire de type II > gastrocnémien de type I > gastrocnémien de type II) - Atrophie des fibres (20% du diamètre dans les fibres soléaires de type I) - Diminution force maximale dans tous les types de fibres avec la plus grande perte (55%) dans le soléaire
Tascher G, Brioche T, Maes P, Chopard A, O’Gorman D, Gauquelin-Koch G, et al. Proteome-wide Adaptations of Mouse Skeletal Muscles during a Full Month in Space. J Proteome Res. 7 juill 2017;16(7):2623-38.	Souris	MP réelle : BION-M1 30 jours	- Test de Bradford - Western blot - Spectrométrie de masse	- Protéome musculaire - Masse Propriétés fibres musculaires : - Phénotype - Atrophie - Performance	9	Témoins : - 5 vivarium - 5 AEM - 5 vivarium 38 jours		Muscles : - Soléaire - Long extenseur des orteils (EDL) - Vaste latéral (VL)	- Diminution des performances musculaires due à : dysfonctionnement mitochondrial, passage du type métabolique et du type de fibre vers les fibres glycolytiques de type II - Atrophie musculaire due aux modifications de l'équilibre protéique, de la voie mTOR, de la myogenèse et de l'apoptose - Réduction de la masse du soléaire et de l'EDL, mais pas du VL - Diminution : taille des myofibres chez les soléaires et les EDL - 8 jours de récupération après le vol n'ont pas été suffisants pour restaurer complètement les changements induits par le vol
Harrison BC, Allen DL, Girten B, Stodieck LS, Kostenuik PJ, Bateman TA, et al. Skeletal muscle adaptations to microgravity exposure in the mouse. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. déc 2003;95(6):2462-70.	Souris	MP réelle : navette spatiale Endeavour STS-108 / UF-1 11 jours	Immunohistochimie	- Taille des fibres - Protéine - Activité enzymatique - Section transversale - Expression de l'isoforme de la chaîne lourde de la myosine (CMH) - Capacité oxydative musculaire via l'analyse de l'activité de la citrate synthase (CS)	12	Témoins : - 12 AEM 12 cage		Muscles : - Soléaire - Gastrocnémiens Plantaire	- Diminution CSA en vol - Soléaire : augmentation fibres exprimant le CMH IIx et IIb - Gastrocnémiens et plantaire : aucune modification de l'expression des isoformes du CMH - Gastrocnémien : diminution de l'activité de la citrate synthase - Perte masse corporelle 5% - Diminution de l'activité enzymatique en vol - Soléaire plus affecté que le gastrocnémien et le plantaire - Fibres musculaires du soléaire 22,1% plus petites, gastrocnémien : 10,2%, plantaire : 10,8%

ARTICLES de (49) à (51)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Nikawa T, Ishidoh K, Hirasaka K, Ishihara I, Ikemoto M, Kano M, et al. Skeletal muscle gene expression in space-flown rats. FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol. mars 2004;18(3):522-4.	Rat	MP réelle : STS-90 16 jours	- Puce à ADN - RT-PCR	- Expression génique de 26 000 gènes - Poids muscle - CSA		Témoins au sol : - Suspendus par la queue - Dénervés - vivarium		Muscle gastrocnémien	- Expression déséquilibrée des gènes mitochondriaux : dislocation des mitochondries (conduisant à une atrophie) - Augmentation expression des gènes codant pour des enzymes limitant la vitesse de dégradation des protéines (ubiquitine ligase) - <u>Dénervation a provoqué l'atrophie musculaire la plus forte parmi ces trois protocoles</u> - Diminution CSA par myofibre de muscles gastrocnémiens : dans le contrôle, vol spatial, les rats suspendus par la queue et dénervés respectivement de 366, 212, 295 et 53 µm <sup>2</sup> - Plus grand changement dans l'expression génique du muscle gastrocnémien chez les rats des vols spatiaux que chez les rats en suspension ou dénervés
Ikemoto M, Nikawa T, Takeda S, Watanabe C, Kitano T, Baldwin KM, et al. Space shuttle flight (STS-90) enhances degradation of rat myosin heavy chain in association with activation of ubiquitin-proteasome pathway. FASEB J Off Publ Fed Am Soc Exp Biol. mai 2001;15(7):1279-81.	Rat	- MP réelle : STS-90, 16 jours  - MP simulée : suspension par la queue, 10 jours	- Western blot - RT-PCR	- Dégradation de la chaîne lourde de la myosine de type rapide (CMH) - Expression des protéases - Poids muscle	6	Témoins au sol : - 6 AEM - 6 vivarium		- Gastrocnémien - Soléaire	- Vol et suspension : stimulation de l'ubiquitination de protéines et l'accumulation de fragments de dégradation du CMH dans les muscles. - Diminution poids réel des muscles gastrocnémiens - Muscle soléaire : atrophie la plus rapide et la plus sévère - Modification niveaux d'ARNm des protéases musculaires - Dégradation des protéines contractiles musculaires, y compris le CMH, peut-être par une voie protéolytique dépendante de l'ubiquitine
Fitts RH, Desplanches D, Romatowski JG, Widrick JJ. Spaceflight effects on single skeletal muscle fiber function in the rhesus monkey. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. nov 2000;279(5):R1546-1557.	Singe	MP réelle : BION-11 14 jours	Morphométrie	- Propriétés des fibres musculaires individuelles à contraction lente et rapide - Force - Rigidité - Vitesse de contraction	2	Témoins : - 5 vivarium - 2 capsule de contrôle (AEM)		- Soléaire - Gastrocnémien médial (MG)	- Vol : diminution force maximale - Baisse rigidité maximale des fibres - Gastrocnémien médial : vol mais pas capsule : diminution diamètre et force fibre de type I - Aucun effet sur la vitesse maximale de raccourcissement des fibres - Capsule et vol : atrophie et réduction de la force et de la puissance dans la fibre de type I du soléaire - Cependant, seul le vol a provoqué une atrophie et une réduction de la force dans la fibre de type I du MG

ARTICLES de (52) à (55)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Ogneva IV, Maximova MV, Larina IM. Structure of cortical cytoskeleton in fibers of mouse muscle cells after being exposed to a 30-day space flight on board the BION-M1 biosatellite. J Appl Physiol Bethesda Md 1985. 15 mai 2014;116(10):1315-23.	Souris	MP réelle : BION-M1 30 jours	- Microscopie à force atomique - Immunoblot - RT-PCR	- Organisation du cytosquelette cortical dans les fibres musculaires - Poids muscle	6	Témoins : - 8 vivarium - 7 capsule de contrôle (AEM)		- Muscle soléaire - Muscle tibial antérieur	- Rigidité transversale normale du cytosquelette cortical des fibres - Teneur normale en bêta et gamma-actine dans les fibres du muscle soléaire et tibial antérieur - Poids moyen du muscle tibial antérieur et soléaire : diminution
Kraemer WJ, Staron RS, Gordon SE, Volek JS, Koziris LP, Duncan ND, et al. The effects of 10 days of spaceflight on the shuttle Endeavor on predominantly fast-twitch muscles in the rat. Histochem Cell Biol. nov 2000;114(5):349-55.	Rat	MP réelle : navette spatiale Endeavour 10 jours	Analyse histochimique qualitative	- Section transversale (CSA) - Composition de la chaîne lourde de myosine (CMH)	12	Témoins : 12		- Muscle long extenseur des orteils (EDL) - Gastrocnémien	- Diminution : taille des fibres musculaires dans gastrocnémien et EDL - Diminution EDL : isoforme du CMH IId - Diminution gastrocnémien : isoforme du CMH IId dans la composante superficielle (blanche) - Aucune altération du profil du CMH dans la composante profonde (rouge) - Atrophie dans les muscles EDL et gastrocnémien - Résultats mettent en évidence la <u>plasticité rapide du muscle squelettique lors de vols spatiaux de courte durée</u>
Kourtidou-Papadeli C, Kyparos A, Albani M, Frossinis A, Papadelis CL, Bamidis P, et al. Electrophysiological, histochemical, and hormonal adaptation of rat muscle after prolonged hindlimb suspension. Acta Astronaut. 2004;54(10):737-47.	Rat	MP simulée : suspension par les membres postérieurs (HLS) 45 à 70 jours	- Enregistrements électrophysiologiques - Colorations histochimiques	- Adaptabilité musculaire et fatigabilité - Masse musculaire	7 rats Wistar	Groupe contrôle : 7		- Muscle soléaire - Long extenseur des orteils (EDL)	- Perte de masse musculaire plus importante dans le muscle soléaire - Atrophie musculaire mais schéma d'adaptation - indice de fatigue : augmentation pour les rats HLS, mais diminution pour les rats témoins - histochimie : passage du métabolisme oxydatif au métabolisme glycolytique
English KL, Lee SMC, Loehr JA, Ploutz-Snyder RJ, Ploutz-Snyder LL, Reeves JM. Isokinetic strength changes following long-duration spaceflight on the ISS. Aerosp Med Hum Perform. 2015;86:A68-77.	Homme	MP réelle : ISS 163 +/- 38 jours	Régression linéaire à effets mixtes	- Changements de force isocinétique - Récupération	37 membres d'équipage	Non		- Genou et cheville : flexion/extension	- Force isocinétique : diminution - Perte de force : <u>pas de différence entre les hommes et les femmes</u> - Au retour sur Terre, la force est largement récupérée en 30 jours

ARTICLES de (56) à (59)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	MUSCLES DE LA TÊTE ET DU COU	MUSCLES SQUELETTIQUES	CONCLUSIONS
Chang DG, Healey RM, Snyder AJ, Sayson JV, Macias BR, Coughlin DG, et al. Lumbar spine paraspinal muscle and intervertebral disc height changes in astronauts after long-duration spaceflight on the International Space Station. Spine. 2016;41(24):1917-24.	Homme	MP réelle : ISS 6 mois	Imagerie par résonance magnétique de 3 Tesla	- Section transversale - Récupération	6 membres d'équipage	Non		Muscle paraspinal lombaire	- Diminution CSA - Atrophie musculaire - Récupération incomplète du CSA 46 jours après le vol, par rapport aux niveaux avant le vol
Treffel L, Dmitrieva L, Gauquelin-Koch G, Custaud M-A, Blanc S, Gharib C, et al. Craniomandibular system and postural balance after 3-day dry immersion. PLoS ONE. 2016;11(2).	Homme	MP simulée : immersion sèche 3 jours	- Capteurs piézorésistifs - MyotonPRO	- Force de morsure maximale - Propriétés mécaniques de la mâchoire et des muscles cervicaux - Effets de l'activité motrice de la mâchoire sur la stabilité posturale - Tonicité	12 hommes	Non	- Masséter - Muscle du cou : sterno-cléido-mastoïdien		- Force de morsure maximale : aucun changement - Paramètres posturaux : modifiés - Pas de différences significatives dans les données stabilométriques selon la position mandibulaire - Tonicité du masséter : augmentation immédiatement après la fin de la période d'immersion sèche - Aucun dysfonctionnement des muscles masticateurs - Lien entre les perturbations posturales après immersion sèche et tonicité du masséter
Ohira T, Ohira T, Kawano F, Shibaguchi T, Okabe H, Goto K, et al. Effects of gravitational loading levels on protein expression related to metabolic and/or morphologic properties of mouse neck muscles. Physiol Rep. 1 janv 2014;2(1):e00183.	Souris	MP réelle : ISS Système tiroir à souris (MDS) 3 mois	- Microscope à fluorescence - iTRAQ®	- Poids - Métabolisme Propriétés fibres : - Phénotype - Taille - Expression des protéines - CSA des fibres CMH	3	- Témoins au sol dans vivarium : 5 - Suspension des membres postérieurs au sol : 5 - Exposition 2G en utilisant une centrifugeuse animale : 4	Muscles du cou : - Muscle rhomboïde		- Passage du phénotype des fibres du type I à II - Atrophie des fibres de type I - Passage du métabolisme oxydatif au métabolisme glycolytique - Diminution : CSA des fibres CMH de type I Changements dans l'expression des protéines liées aux propriétés métaboliques et morphologiques dans le muscle du cou
McNamara KP, Greene KA, Tooze JA, Dang J, Khattab K, Lenchik L, et al. Neck Muscle Changes Following Long-Duration Spaceflight. Front Physiol. 2019;10:1115.	Homme	MP réelle : ISS 4 à 6 mois	- IRM	- Section transversale - Infiltration de graisse musculaire de la musculature du cou	6 membres d'équipage	- Non	Muscles du cou : - Trapèze - Semi-épineux de la tête - Sterno-cléido-mastoïdien - Petit rhomboïde		- Augmentation CSA : trapèze, semi-épineux de la tête, sternocléidomastoïdien, petit rhomboïde - Aucun changement dans l'infiltration graisseuse - Hypertrophie post-vol : semi-épineux, sternocléidomastoïdien, trapèze et petit rhomboïde - Les muscles cervicaux ne sont pas soumis aux mêmes effets dégradants que la microgravité confère à la majorité des muscles - Aucun des muscles n'a montré de diminutions statistiquement significatives de leurs CSA en raison d'une microgravité prolongée.

ARTICLES de (60) à (62)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	GLANDES SALIVAIRES	SALIVE	CONCLUSIONS
Rai B, Kaur J, Catalina M. Bone mineral density, bone mineral content, gingival crevicular fluid (matrix metalloproteinases, cathepsin K, osteocalcin), and salivary and serum osteocalcin levels in human mandible and alveolar bone under conditions of simulated microgravity. J Oral Sci. 2010;52(3):385-90.	Homme	MP simulée : <i>bed rest</i> HDT -6° 3 semaines	- Absorbiométrie à rayons X à double énergie - Test immuno-enzymatique ELISA	- Taux de métalloprotéinase matricielle MMP-8, de MMP-9 et d'ostéocalcine	- 10 hommes - 10 femmes	Non		- Salive - Parodonte	- Augmentation : taux d'ostéocalcine, de MMP-8 et de MMP-9 dans sérum et salive
Rai B, Kaur J, Catalina M, Anand SC, Jacobs R, Teughels W. Effect of Simulated Microgravity on Salivary and Serum Oxidants, Antioxidants, and Periodontal Status. J Periodontol. oct 2011;82(10):1478-82.	Homme	MP simulée : <i>bed rest</i> HDT -6° Avant/après 60 jours	- Méthode à l'acide thiobarbiturique de Buege et Aust - Chromatographie liquide - Test ELISA	- Marqueurs oxydatifs salivaires et sériques : MDA, 8-OHdG, vitamines C et E = antioxydants. - Paramètres parodontaux cliniques (profondeur de sondage et perte d'attache).	20 hommes	Non		- Salive - Parodonte	- Diminution : concentrations vitamines C et E sériques et salivaires - Augmentation : concentrations de MDA et de 8-OHdG - perte d'attache et profondeur de sondage plus élevés mais pas statistiquement significatifs - Augmentation du stress oxydatif dans l'environnement de microgravité, mais n'a pas influencé de manière significative les paramètres parodontaux après 2 mois
Hand AR, Dagdeviren D, Larson NA, Haxhi C, Mednieks MI. Effects of spaceflight on the mouse submandibular gland. Arch Oral Biol. févr 2020;110:104621.	Souris	MP réelle : - souris femelles navette spatiale américaine STS -131 et STS-135 pendant 15 et 13 jours - souris mâles biosatellite russe Bion-M1 30 jours	- Microscopie électronique à transmission - Immunohistochimie - Microscopie optique et électronique - Marquage immunogold	- Morphologie des protéines sécrétaires - Biochimie	- 8 souris STS 131 - 7 souris STS 135 - 6 souris BION M1	Témoins au sol (AEM) : 8 + 5 + 4	- Glande sous-maxillaire - Parotide		- Contrairement à la glande parotide, pas de changements morphologiques dans la glande sous-maxillaire (aucune différence dans la morphologie des cellules acineuses ou canalaire. Tous les organites cellulaires présentaient une apparence normale et les cellules acineuses et canalaire avaient un complément complet de granules sécrétaires.) - Souris femelles : aucun changement dans l'expression des protéines - Souris mâles : augmentation des facteurs de croissance épidermique et nerveuse après 30 jours dans l'espace

ARTICLES de (63) à (65)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	GLANDES SALIVAIRES	SALIVE	CONCLUSIONS
Rai B, Kaur J, Foing BH. Evaluation by an aeronautic dentist on the adverse effects of a six-week period of microgravity on the oral cavity. Int J Dent. 2011;2011:548068.	Homme	MP simulée : <i>bed rest</i> HDT -6° 6 semaines)	- Chromatographie en phase liquide à haute performance - Test ELISA	- Marqueurs oxydatifs salivaires : MDA, 8-OHdG, vitamines C et E = antioxydants. - Fonction nerveuse faciale - Système chimio-sensoriel - Biomarqueurs salivaires - Débit salivaire - Ouverture de la bouche - Morphologie	10 hommes	Non	Canaux des glandes sous-maxillaires et sublinguales	Salive	- Augmentation : LDH, MIP 1 alpha, MDA, 8-OHdG et thiocyanate - Diminution : débit salivaire - Diminution de biomarqueurs salivaires : sodium, potassium, calcium, phosphate, protéines, activité de l'amylase, vitamines E et C - Diminution : ouverture de la bouche, mouvement de la langue et de la mandibule - Augmentation des scores de douleur : régions de l'angle mandibulaire - Gonflement et douleurs au niveau de l'ostium du canal sous-maxillaire et sublingual - <u>L'effet réversible de la microgravité est un œdème du visage, une modification du goût, des douleurs dentaires et de la xérostomie</u>
Sams CF, Crucian BE, Stowe RP, Mehta SK, Yetman DL, Leal MJ, et al. Immune status, latent viral reactivation, and stress during long-duration head-down bed rest. Aviat Space Environ Med. 2009;80(5 PART 2):A37-44.	Homme	MP simulée : <i>bed rest</i> HDT -6° 90 jours	- Analyse d'immuno-phénotype - EIA	Niveaux d'hormones de stress	5 hommes et 5 femmes	Non		- Salive - Stress	Pas de modification du taux de cortisol
Mednieks M, Khatri A, Rubenstein R, Burleson JA, Hand AR. Microgravity alters the expression of salivary proteins. Oral Health Dent Manag. juin 2014;13(2):211-6.	Souris	MP réelle : navette spatiale STS-131 et 135 pendant 15 et 13 jours	- Westernblot - TEM (microscope) - Puce à ADN	- Immunocytochimie - Morphologie - Expression protéine	15 souris femelles adultes	Témoins : - 23 souris AEM - 15 vivarium	Parotide	Salive	- Modifications dans l'expression de protéines sécrétoires dans la parotide par rapport aux témoins. - Morphologie : pas de modification des acini parotidiens et des conduits - Modifications cellulaires : augmentation du nombre de vacuoles autophagiques dans les cellules acineuses et de cellules acineuses apoptotiques - Les cellules du canal intercalé et du canal strié de certains animaux en vol contenaient de grandes vacuoles similaires à celles décrites chez les rats diabétiques → changement dans la fonction des cellules canalaire - Diminution de l'expression de l'IgA - Aucun dommage tissulaire significatif n'a été observé, par conséquent, les différences de niveau moléculaire dues aux déplacements dans l'espace peuvent être des <u>réponses homéostatiques, un ajustement à un environnement modifié</u>

ARTICLES de (66) à (68)	SUJET	CONDITIONS	TECHNIQUES	DONNEES	EFFECTIF	SUJET SAIN	GLANDES SALIVAIRES	SALIVE	CONCLUSIONS
Rai B, Kaur J. Periodontal status, salivary immunoglobulin, and microbial counts after short exposure to an isolated environment. J Oral Sci. 2013;55(2):139-43.	Homme	- Pas de MP - Environnement de Mars simulé, isolé et confiné à la station de recherche du désert de Mars, aux États-Unis	Test ELISA	- Débit salivaire - Test de stress - Taux d'immunoglobuline salivaire, cortisol, $\alpha$ -amylase - Microbiote salivaire	12 hommes			- Salive - Parodontie - Stress	- Augmentation : activité et quantité de S. mutans - Augmentation : cortisol salivaire, $\alpha$ -amylase et stress - Diminution : IgG salivaires - Réduction du débit salivaire et des taux d'Ig probablement responsable de l'augmentation des taux de bactéries et de levures.
Dagdeviren D, Beallias J, Khan I, Mednieks MI, Hand AR. Response of the mouse sublingual gland to spaceflight. Eur J Oral Sci. oct 2018;126(5):373-81.	Souris	MP réelle : navettes spatiales STS 131 : 15 jours et STS 135 : 13 jours	- Immunohistochimie - Microscopie électronique à transmission - Marquage immunogold	- Ultrastructure - Expression protéines : protéine sécrétoire parotidienne (PSP)	8 + 7 souris	Témoins au sol : 8 + 4 dans AEM	Glande sublinguale (pour comparer aux effets sur la parotide)		- Aucune différence observée dans la structure des cellules acineuses muqueuses ou séreuses ou des cellules du canal entre les glandes sublinguales des souris de contrôle au sol (AEM) et des souris en vol. - Etudes antérieures ont montré une autophagie et une apoptose de cellules acineuses séreuses parotides - Protéine sécrétoire parotidienne diminuée
Rai B, Kaur J. Salivary stress markers and psychological stress in simulated microgravity: 21 days in 6° head-down tilt. J Oral Sci. mars 2011;53(1):103-7.	Homme	MP simulée : bed rest HDT -6° 21 jours	- CST (current stress test) - YKO70 Human CgA EIA kit - Cortisol EIA kit - Alpha-amylase assay kit - bêta-endorphin S-1134 kit	- Stress psychologique - Test de stress actuel : marqueurs de stress salivaire (hormone de stress : chromogranine-A (CgA), cortisol, alpha-amylase, bêta-endorphine)	12 hommes	Non		- Salive - Stress	- Augmentation : stress psychologique et sécrétion de CgA, de cortisol, d'alpha-amylase et de bêta-endorphine - Augmentation du score CST moyen. - Corrélations significatives entre les niveaux de marqueurs de stress salivaire et le score CST - Le 6 ° HDT semble être un modèle valide pour induire des changements de stress psychologique dans le système immunitaire

## Collège des Sciences de la Santé

### UFR des Sciences Odontologiques

# Serment

En présence de mes Maîtres et de mes condisciples, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de l'art dentaire.

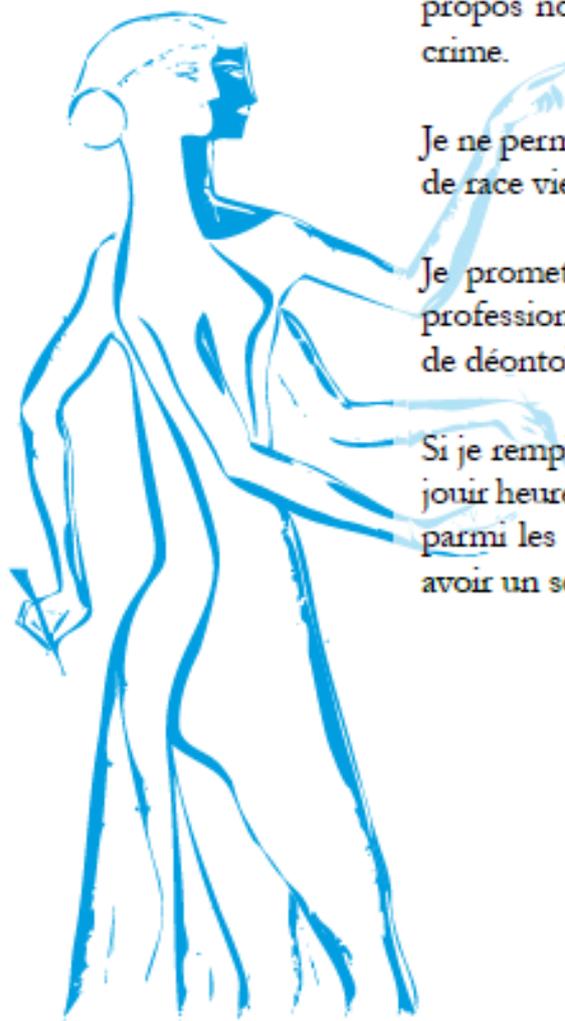
Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un honoraire au-dessus de mon travail. Ma langue taira les secrets qui me seront confiés. Admis à l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe.

Mes connaissances et mon état ne serviront ni à diffuser des propos non avérés, ni à corrompre les mœurs, ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des conditions de croyance, de nation et de race viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Je promets et je jure de conformer strictement ma conduite professionnelle aux principes et aux règles prescrites par le code de déontologie.

Si je remplis ce serment sans l'enfreindre, qu'il me soit donné de jouir heureusement de la vie et de ma profession, honoré à jamais parmi les hommes. Si je le viole et que je me parjure, puissé-je avoir un sort contraire.



Vu, Le Président du Jury,

Date, Signature :

Vu, la Directrice de l'UFR des Sciences Odontologiques,

Date, Signature :

Vu, le Président de l'Université de Bordeaux,

Date, Signature :

**TITRE : Comparaison des effets de la micropesanteur d'un vol spatial sur les muscles squelettiques de la tête et du cou, la salive et les glandes salivaires : revue systématique de la littérature.**

Résumé :

L'exploration spatiale s'intéresse aujourd'hui à la planète Mars, et il ne faudra attendre que quelques années avant que les premiers astronautes y soient envoyés. L'un des grands défis de ces avancées est la durée record du vol spatial vers la planète rouge, qui exposera les membres d'équipage à plus de 500 jours de micropesanteur. Cet environnement provoque de nombreux effets sur l'organisme. A l'aide des bases de données PubMed et Scopus, et des critères PRISMA, nous avons inclus 47 publications au sein de cette revue systématique de la littérature. Nous rappellerons les bases de la micropesanteur et évoquerons les différentes méthodes d'expérimentations en micropesanteur réelle et simulée. L'objectif est d'étudier les effets de la micropesanteur sur les muscles de la tête et du cou en les comparant aux muscles squelettiques du reste du corps. Nous nous intéresserons également aux perturbations ciblant la salive et les glandes salivaires. Les études en micropesanteur montrent une tendance à la perte musculaire au niveau des muscles squelettiques, mais les muscles masticateurs ne semblent pas être affectés, comme certains muscles du cou qui présentent même une hypertrophie musculaire. Les effets sur la salive sont nombreux et reflètent l'état de santé général des individus. Pour finir, malgré un faible nombre d'études sur ce sujet, les effets semblent différer selon le type de glandes salivaires.

Mots clés : micropesanteur, vol spatial, muscle, muscle masticateur, salive, glande salivaire.

**TITLE : Comparison of the effects of microgravity during spaceflight on head and neck skeletal muscles, saliva and salivary glands : systematic literature review.**

Abstract :

Space exploration is now interested by the planet Mars, and it will only be a few years before the first astronauts are sent on a manned mission to Mars. One of the big challenges of these advancements is the record length of spaceflight towards the red planet, which will expose crew members to more than 500 days of microgravity. This environment causes many effects on the body. Using PubMed and Scopus databases, and PRISMA criteria, we selected 47 publications in this systematic literature review. We will recall the basics of microgravity and discuss the different methods of experiments in real and simulated microgravity. The aim is to study the effects of microgravity on head and neck skeletal muscles by comparing them to muscles in the rest of the body. We will also be interested in disturbances targeting saliva and salivary glands. Microgravity studies show a tendency for muscle loss in skeletal muscles, but masticatory muscles do not appear to be affected, such as some neck muscles which even show muscular hypertrophy. The effects on saliva are numerous and reflect the general health of individuals. Finally, despite a small number of studies on this subject, the effects seem to differ depending on the type of salivary glands.

Key words : microgravity, spaceflight, muscle, masticatory muscle, saliva, salivary gland.