



**HAL**  
open science

# Incidence des changements de pression atmosphérique et de gravité sur la santé de l'appareil manducateur

William Gerbereux

► **To cite this version:**

William Gerbereux. Incidence des changements de pression atmosphérique et de gravité sur la santé de l'appareil manducateur. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. hal-03297983

**HAL Id: hal-03297983**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03297983v1>**

Submitted on 23 Jul 2021

**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.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Académie NANCY-METZ  
UNIVERSITÉ DE LORRAINE  
FACULTÉ D'ODONTOLOGIE**

Année 2019

N°10535

**THÈSE**

Pour le

**DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

par

**William GERBEREUX**

Né le 24 août 1992 à Vesoul (70)

**INCIDENCE DES CHANGEMENTS DE  
PRESSION ATMOSPHÉRIQUE ET DE  
GRAVITÉ SUR LA SANTE DE L'APPAREIL  
MANDUCATEUR**

Présentée et soutenue publiquement : le 11/01/2019

**Examineurs de la thèse :**

Pr C. STRAZIELLE

Dr M. VINCENT

Dr S. CLERC

Dr F. CAMELOT

Professeur des Universités

Maître de Conférences

Assistant Hospitalo-Universitaire

Docteur en Chirurgie Dentaire

Président-directeur

Juge

Juge

Invité

***« Par délibération en date du 11 décembre 1972, la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propre à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation »***

**Président : Professeur Pierre MUTZENHARDT**

**Doyen : Professeur Jean-Marc MARTRETTE**

Vice-Doyens : Dr Céline CLEMENT – Dr Rémy BALTHAZARD – Dr Anne-Sophie VAILLANT

Membres Honoraires : Dr L. BABEL – Pr. S. DURIVAUX – Pr A. FONTAINE – Pr G. JACQUART – Pr D. ROZENCWEIG - Pr ARTIS - Pr M. VIVIER

Doyens Honoraires : Pr J. VADOT, Pr J.P. LOUIS

Professeur émérite : Pr M-P FILLEUL

<b>Département Odontologie pédiatrique</b> <b>Sous-section 56-01</b>	Mme	<b><u>DROZ Dominique</u></b>	Maître de Conférences *
	Mme	JAGER Stéphanie	Maître de Conférences *
	M.	PREVOST Jacques	Maître de Conférences
	Mme	HERNANDEZ Magali	Maître de Conférences *
	M.	LEFAURE Quentin	Assistant
<b>Département Orthopédie dento-faciale</b> <b>Sous-section 56-01</b>	Mme	DARSAT Claire	Assistante*
	M.	<b><u>EGLOFF Benoît</u></b>	Maître de Conférences *
	Mme	GREGOIRE Johanne	Assistante
<b>Département Prévention, épidémiologie, économie de la santé, odontologie légale</b> <b>Sous-section 56-02</b>	Mme	LAWTON Mathilde	Assistante
	Mme	<b><u>CLÉMENT Céline</u></b>	Maître de Conférences *
	M.	BAUDET Alexandre	Assistant *
<b>Département Parodontologie</b> <b>Sous-section 57-01</b>	Mme	NASREDDINE Greyce	Assistante
	M.	<b><u>AMBROSINI Pascal</u></b>	Professeur des Universités *
	Mme	BISSON Catherine	Maître de Conférences *
	M.	JOSEPH David	Maître de Conférences *
	M.	LACH Patrick	Assistant
	Mme	MAYER-COUPIN Florence	Assistante
<b>Département Chirurgie orale</b> <b>Sous-section 57-01</b>	Mme	PAOLI Nathalie	Enseignante univ. – Praticien attachée*
	Mme	<b><u>GUILLET-THIBAUT Julie</u></b>	Maître de Conférences *
	M.	BRAVETTI Pierre	Maître de Conférences
	Mme	PHULPIN Bérengère	Maître de Conférences *
	M.	CLERC Sébastien	Assistant*
	M.	HASNAOUI Nasr	Assistant
<b>Département Biologie orale</b> <b>Sous-section 57-01</b>	Mme	KICHENBRAND Charlène	Enseignante univ. – Praticien attachée*
	M.	<b><u>YASUKAWA Kazutoyo</u></b>	Maître de Conférences *
	M.	MARTRETTE Jean-Marc	Professeur des Universités *
<b>Département Dentisterie restauratrice, endodontie</b> <b>Sous-section 58-01</b>	Mme	EGLOFF-JURAS Claire	Assistante*
	M.	<b><u>MORTIER Éric</u></b>	Professeur des Universités *
	M.	AMORY Christophe	Maître de Conférences
	M.	BALTHAZARD Rémy	Maître de Conférences *
	M.	ENGELS-DEUTSCH Marc	Maître de Conférences
	M.	VINCENT Marin	Maître de Conférences*
	Mme	GEBHARD Cécile	Assistante
	M.	GEVREY Alexis	Assistant
<b>Département Prothèses</b> <b>Sous-section 58-01</b>	M.	GISSY Renaud	Assistant *
	M.	<b><u>DE MARCH Pascal</u></b>	Maître de Conférences
	M.	SCHOUVER Jacques	Maître de Conférences
	Mme	VAILLANT Anne-Sophie	Maître de Conférences *
	Mme	CORNE Pascale	Maître de Conférences Associée *
	M.	CIESLAK Steve	Assistant
	M.	HIRTZ Pierre	Assistant *
	M.	MAILLET Maxime	Assistant
	Mme	MOEHREL Bethsabée	Assistante
<b>Département Fonction-dysfonction, imagerie, biomatériaux</b> <b>Sous-section 58-01</b>	M.	VUILLAUME Florian	Assistant
	Mme	<b><u>STRAZIELLE Catherine</u></b>	Professeur des Universités *
	Mme	MOBY (STUTZMANN) Vanessa	Maître de Conférences *
	M.	SALOMON Jean-Pierre	Maître de Conférences

**Souligné : responsable de département**

\* temps plein

**Mis à jour le 01/09/2018**

À notre juge, directeur et présidente de thèse

**Mademoiselle le Professeur Catherine STRAZIELLE**

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en science neurologique

Habilitée à diriger des recherches en Odontologie

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier

Sous-section : Dentisterie restauratrice, endodontie, prothèse, fonction-dysfonction, imagerie, biomatériaux

Responsable du département de Fonction-dysfonction, imagerie, biomatériaux

Vous nous avez fait l'honneur de présider et de diriger ce travail, avec un fort engouement pour le sujet proposé. Nous vous remercions pour l'aide précieuse que vous nous avez apportée tout au long de l'écriture de ce travail, et ce, malgré vos nombreuses responsabilités.

Nous vous remercions également pour la personne formidable que vous êtes, pour vos qualités relationnelles, votre patience, votre soutien et pour la bienveillance que vous apportez à chaque étudiant et à chacun de vos patients, mais aussi pour le travail que vous accomplissez tous les jours au sein du service hospitalier.

À notre juge

**Monsieur le Docteur Marin VINCENT**

Docteur en Chirurgie Dentaire

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section : Dentisterie restauratrice, endodontie, prothèse, fonction-dysfonction, imagerie

Vous nous avez fait l'honneur de participer à la composition de ce jury.

Nous vous sommes redevables pour vos qualités en tant qu'enseignant. Nous tenons à vous remercier pour votre amabilité, votre prévenance, mais surtout pour nous avoir donné goût en la profession de Chirurgien-dentiste.

À notre juge

**Monsieur le Docteur Sébastien CLERC**

Docteur en Chirurgie Dentaire

Assistant Hospitalo-Universitaire

Sous-section : Chirurgie orale ; parodontologie ; biologie orale

Nous vous devons une immense gratitude pour avoir pris part à ce jury.

Nous vous remercions pour votre dévouement et pour l'enthousiasme dont vous avez fait preuve pour le sujet.



À notre invité

**Monsieur le Docteur Frédéric CAMELOT**

Docteur en Chirurgie Dentaire

Ancien Assistant Hospitalo-Universitaire des CSERD

Vous nous avez fait l'honneur de bien vouloir faire partie de notre jury de thèse. Nous profitons de cette occasion pour vous remercier personnellement pour vos qualités d'attention, d'empathie, et de la générosité dont vous faites preuve envers les étudiants. Vous avez été un professeur altruiste et bienfaisant tout au long de notre cursus universitaire.

Remerciements:

**À mes Parents, mes Frères, ma Sœur,**

Je vous remercie d'avoir toujours été présents pendant toutes mes années d'études.

**À Benjamin,**

LDPNP, plein de voyages fait ensemble, certains plus longs que d'autres qu'il en devenait compliqué de se supporter. Je n'oublie pas le projet de construction d'un cabinet d'ici quelques années. Et à la montagne !

**À Guillaume,**

GPA, le mec qui, à chaque fois qu'il est chez moi, ne peut s'empêcher de faire une bêtise, comme dévaster mon appartement, jeter des trucs par la fenêtre et j'en passe,... Mais pourquoi sommes-nous amis ? Indiana Jones des temps modernes (le seul mec qui met une veste de costume avec un chapeau de cowboy). En vrai tu as été d'un grand soutien, un super binôme à Brabois, malgré quelques expériences un peu folkloriques, et tu sais auxquelles je pense. Pleins de réussites pour l'Avenir !

**À Charlotte,**

Gl, ma Chachou, toujours à l'ouest. Tu nous fais tellement rire lorsque tu nous partages fréquemment tes expériences toutes aussi loufoques les unes que les autres. Tu as été mon petit rayon de soleil pendant ces années.

**À Zineb,**

Ma Zizi, on s'est rencontré sur les bancs de la fac, et tu es toujours l'une des personnes en qui je peux le plus faire confiance. Pour cela je te dis un grand merci. On se revoit aussi souvent que possible dans les années à venir.

**À Julien, Julien, Anne-Sophie, Angélique, Victor, Marine,**

Notre petit groupe, formé il n'y a pas si longtemps que ça, mais c'est toujours avec une immense joie que nous nous retrouvons tous ensemble. Nous avons passé des moments formidables, week-ends, et surtout les vacances ! J'espère que tous ces moments vont continuer pour des années encore.

**À Paul,**

Coach en JJB, coach psychologique, coach en développement personnel, le coach des coaches ! Merci d'avoir été aussi souvent présent. Je suis content que tu aies enfin trouvé ta voie dans la psychologie, je te souhaite vraiment d'exceller dans ce domaine fait pour toi.

**À Benjamin, Jecolia,**

Même si nous avons rarement l'occasion de nous voir, c'est toujours avec une grande joie que nous nous retrouvons autour d'un bon repas. Je vous remercie de m'avoir toujours soutenu tout au long des études et de m'avoir fait rentrer dans un cercle d'ami aussi immense et généreux.

**À Lara, Benjamin,**

Vous faites une famille formidable qui ne cesse de grandir d'année en année. Vous êtes passés par des moments difficiles mais vous avez su faire face, et ce, avec vos valeurs. Merci d'avoir été aussi souvent présents.

**À Quentin, Mathilde,**

C'est toujours avec plaisir que l'on se voit. Le road trip que l'on a fait ensemble restera une expérience mémorable, tellement de souvenirs que l'on se récite à chacune de nos retrouvailles. Les difficultés du passé sont derrière vous, les plus beaux moments de votre vie sont devant vous. Merci de toujours me soutenir pour la chanson !!! Il est venu ...

**À Agathe, Louis,**

Nos petits RDV dans un bar les soirs autour d'une bière sont tellement plaisants et reposants. Nous discutons de nous, de nos vies et pas de notre métier, et ça fait vraiment énormément de bien.

**À Camille, Lucie, Laura,**

Les premières personnes que j'ai côtoyées à la Fac. Souvent ensemble dans les amphis comme dans les soirées.

**À Monique,**

Merci de m'avoir encouragé durant toutes ces années dans la voie de la dentisterie, et pour l'immense cadeau que vous m'avez fait.

**À Yaël, ses assistantes,**

Merci de m'avoir accueilli dans ton cabinet, de m'avoir permis d'acquérir la confiance pour la pratique de ce métier formidable. Je te remercie aussi d'avoir partagé tes connaissances et ton expérience.

Et à tous les autres : **Florian, Miclo, Bouchard** et **Nathalie, Roxane, la famille Riondet, la famille Bareth, Tara, Thibault, Sarah, Laetitia**, le reste de ma famille, (tant d'autres noms que je n'ai pas cités)... Nous avons très certainement partagé ensemble un moment unique et personnel, je vous remercie aussi !

# SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES .....	11
LISTE DES TABLEAUX.....	14
INTRODUCTION.....	15
1. LE CORPS HUMAIN SOUMIS AUX CHANGEMENTS DE PRESSION ATMOSPHÉRIQUE ET DE GRAVITÉ.....	17
1.1. Rappels physiques et liens entre poids, masse, volume et pression.....	17
1.2. Populations et situations sous l'influence de ces phénomènes physiques. .	22
2. EFFETS DES VARIATIONS DE PRESSION ATMOSPHÉRIQUE DU CORPS HUMAIN .....	26
3. LA SANTÉ DE L'APPAREIL MANDUCATEUR SOUMIS AUX CHANGEMENTS DE PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.....	28
3.1. Effets sur l'appareil stomatognathique.....	28
3.2. Effets sur l'appareil auditif.....	28
3.3. Effets sur le nerf trijumeau.....	31
3.4. Effets sur le sinus maxillaire .....	34
3.5. Effets sur la santé dentaire des personnes soumises régulièrement à des variations de pression.....	39
3.6. Effets sur le parodonte et sur la muqueuse buccale.....	54
4. SPÉCIFICITÉS DES SOINS BUCCO-DENTAIRES.....	57
4.1. Soins préventifs.....	57
4.2. Recommandations.....	63
4.3. Analyse d'un questionnaire.....	69
5. LES VARIATIONS DE GRAVITÉ : RÉPERCUSSIONS SUR LE CORPS HUMAIN ET L'APPAREIL MANDUCATEUR.....	79
5.1. Effets sur l'appareil locomoteur .....	80
5.2. Effets sur le métabolisme et sur le système immunitaire.....	88
5.3. Effets sur le système vasculaire .....	89
5.4. Effets sur le système nerveux.....	90
5.5. Effets sur les structures de la cavité buccale.....	91
5.6. La gravité, nouvelle approche thérapeutique et dentisterie du futur ?.....	99
CONCLUSION.....	101
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	102
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ÉLECTRONIQUES .....	107
TABLE DES MATIERES.....	108

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Schéma représentant, en aéronautique, l'altitude en fonction de la pression. Il est observable sur celui-ci que, plus l'altitude va diminuer (lors de la descente) et plus la pression barométrique va augmenter, et inversement (Source : Macaluso et Galli, 2005) ..... 23
- Figure 2 : Schéma représentant, en aéronautique, l'altitude en fonction de l'expansion gazeuse. Plus l'altitude augmente, plus le volume d'un gaz augmente (source : Macaluso et Galli, 2005) ..... 24
- Figure 3 : Représentation schématique de l'oreille moyenne montrant le passage du nerf facial (VII) le long de la paroi médiale de l'oreille moyenne interne (source : Baker et coll., 2011)..... 30
- Figure 4 : Clichés radiographiques illustrant le premier cas clinique. a : orthopantomogramme montrant le kyste résiduel de 37, envahissant la région osseuse radulaire de 36, entouré par un os sclérotique de plus forte densité et présentant une intime proximité avec le nerf alvéolaire inférieur qui semble être refoulé en direction basse de la mandibule. b : coupe transversale du scanner de la région mandibulaire gauche et montrant la présence kystique avec une dimension de 30 mm dans l'axe antéro-postérieur, et de 16 mm dans l'axe transversale, la corticale linguale ne montrant qu'1mm. c : coupe frontale de la région mandibulaire gauche témoignant de l'intimité du kyste résiduel avec le nerf alvéolaire inférieur. d : Orthopantomogramme post opératoire réalisé plusieurs mois après l'opération chirurgicale, la lésion est totalement résorbée et l'os mandibulaire reconstruit (source : Macaluso et Galli, 2005) ..... 32
- Figure 5 : Représentations schématiques de la forme implosive d'un barotraumatisme sinusien représentant le lien entre la cavité nasale et le sinus maxillaire. Ces deux cavités sont séparées par l'ostium, qui va s'opposer à l'équilibrage des pressions du fait de son état pathologique (Sources : a : Cudennec et Trannoy, 1994 ; b : Verdalle et Morvan, 2013). ..... 35
- Figure 6 : Représentation schématique du sinus maxillaire et de la fosse nasale reliés par l'ostium, avec P1 la pression intrasinusienne et P2 la pression dans la fosse nasale (source : Verdalle et Morvan, 2013). ..... 36
- Figure 7 : Représentations schématiques de la forme explosive d'un barotraumatisme sinusien représentant le lien entre la cavité nasale et le sinus maxillaire. Ces deux cavités sont séparées par l'ostium, qui va s'opposer à l'équilibrage des pressions du fait de son état pathologique (Sources : a : Cudennec et Trannoy, 1994 ; b : Verdalle et Morvan, 2013). ..... 38

Figure 8 : Images illustrant les résultats obtenus pour des molaires contenant une boulette de coton et ayant subi des cycles de pression. a : image illustrant la fracture d'une obturation temporaire. b : image illustrant une fracture de la face proximale d'une molaire de l'expérience (source : Gunepin et coll., 2016) .....	49
Figure 9 : a : Radiographie panoramique post barotrauma montrant de délogement de restaurations sur 14 et 15, et une fracture de la restauration sur 46. Avec « dislodged restorations » pour restaurations délogées et « fractured restoration » pour restauration fracturée. b : photographie illustrant les restaurations sur 14 et 15 qui se sont délogées. c : photographie montrant une première molaire mandibulaire avec une restauration à l'amalgame fracturée (source : Chakraborty et coll., 2015) 51	51
Figure 10 : Exemple d'une couronne délogée après barotraumatisme dentaire, indépendante de l'expérience (source : Chakraborty et coll., 2015) .....	53
Figure 11 : Photographie de la cavité buccale du patient ayant subi une onde de choc par l'explosion d'un pneu. Des lacérations des muqueuses buccales sont largement visibles dans les fonds des vestibules mandibulaires droit et gauche (source : Chakraborty et coll., 2015).....	55
Figure 12 : Face recto du support visuel à destination des Chirurgiens-dentistes (source : document personnel) .....	65
Figure 13 : Face verso du support visuel à destination des Chirurgiens-dentistes, cette face présentant les différentes recommandations à respecter en fonction de l'acte odontologique pratiqué sur le patient (source : document personnel) .....	66
Figure 14 : Face recto du support visuel à destination des patients (source : document personnel).....	67
Figure 15 : Face verso du support visuel à destination des patients, cette face illustrant les recommandations que le patient doit respecter pour conserver une santé orale optimale en cohérence avec sa pratique (source : document personnel) .....	68
Figure 16 : Diagramme représentant la thérapeutique appliquée par l'échantillon sur une patientèle soumise à des variations de pression (source : document personnel) .....	74
Figure 17 : Schéma représentant l'importance des différentes zones du squelette humain modifiées par une absence de gravité après un vol spatial (source : Vico et Hargens, 2018).....	81
Figure 18 : Photographie montrant Charles Conrad, commandant de la mission Skylab 2, lors d'un examen bucco-dentaire réalisé par le médecin-chef Josepf Kerwin (source : Häuplik-Meusburger et coll., 2016).....	96

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Présentation de la variation de pression atmosphérique en fonction de l'altitude (source : Illman, 1971).....	23
Tableau 2 : Comparatif des barodontalgies directes et indirectes (source : Zadik, 2009b) .....	43
Tableau 3 : Détails des signes cliniques et diagnostics des quatre types de barodontalgies directes en aéronautique (source : Kini et coll., 2015) .....	44
Tableau 4 : Recueil des recommandations importantes à respecter dans les différents domaines de la pratique odontologique pour les personnes soumises à des fluctuations de pression (source : document personnel).....	63
Tableau 5 : Pourcentage de réponses obtenues en fonction de l'Université de formation initiale des Chirurgiens-dentistes ayant répondu au questionnaire (Source : document personnel).....	71
Tableau 6 : Pourcentage des Chirurgiens-dentistes ayant répondu au questionnaire en fonction de l'expérience professionnelle.....	71
Tableau 7 : Comparaison des réponses du questionnaire entre l'Université de Nancy et les réponses totales obtenues (source : document personnel).....	77



## INTRODUCTION

Un environnement qui s'écarte de la norme à laquelle un individu est habitué déclenche des réactions adaptatives variables en fonction de l'écart entre le milieu habituel et le milieu réel. Certains environnements extrêmes nécessiteront l'utilisation de moyens technologiques adaptés et entraîneront des phénomènes physiologiques d'adaptation visant au minimum à assurer la survie, voire maintenir une activité normale. Toutefois, cette acclimatation ne se fait pas sans limites et sans effets à plus ou moins long terme sur l'organisme.

Nous allons nous intéresser à deux types d'environnements extrêmes caractérisés par des variations physiques : 1) **de pression barométrique**, dite atmosphérique en altitude et dans l'air et hydrostatique en plongée et 2) **de gravité**, une condition encore peu usuelle mais qui pourrait devenir plus fréquente avec la conquête de l'espace et un développement prochain des vols et séjours spatiaux.

Lors d'une diminution de pression atmosphérique, divers organes dans le corps humain, notamment les poumons, l'estomac, les sinus faciaux et l'oreille moyenne contiennent des gaz qui vont se dilater lors d'une diminution de pression atmosphérique. Ces organes étant des cavités closes, le volume des gaz va augmenter et va pouvoir causer un inconfort voir un dysfonctionnement de l'organe (Zadik, 2009a). Les organes dentaires sont également des cavités closes et ils ne sont pas épargnés par ces phénomènes de pression. Ils peuvent être à l'origine de fortes douleurs et peuvent même représenter un risque mortel dans certains cas (Agrawal et Singh, 2012).

Les premières mentions de douleurs dues à la pression atmosphérique datent de 1923. Mais, durant la seconde guerre mondiale, en 1945, avec l'apparition des avions subsoniques qui volaient à une altitude de 25 000 pieds (environ 7500 mètres), les équipages aériens ont commencé à se plaindre de douleurs dentaires aiguës nécessitant une consultation urgente. Cette symptomatologie a pris le nom « d'aérodontalgie ». Cependant, comme il a été remarqué que ces douleurs dentaires touchaient également les plongeurs et les sous-marinières, elles prirent le

nom de « tooth squeeze » ou « dent comprimée ». Le terme a donc été modifié en utilisant le préfixe « baro » créant la locution plus appropriée « barodontologie » pour parler plus généralement des pathologies observées au niveau des organes dentaires lorsqu'ils sont soumis à des variations de pression barométrique (Robichaud et McNally, 2005 ; Kumar et coll., 2015 ; Al Thomali et Durgesh, 2016 ; Nogueira et coll., 2016). La barodontologie reste une discipline mal connue et les chirurgiens-dentistes sont peu informés et mal formés car le sujet est peu, ou pas du tout, enseigné dans les universités (Gunepin et coll., 2015).

Les effets de la gravité sur le corps humain et plus particulièrement sur l'appareil manducateur sont encore moins connus car la discipline est jeune et encore expérimentale. Actuellement, les missions se développent et servent, entre autres, à multiplier les études sur l'adaptation du corps humain à l'hypogravité.

Après des rappels physiques sur la pression barométrique et la gravité et la description des populations ciblées, nous consacrerons une grande partie de notre ouvrage à l'étude des effets de la pression barométrique sur l'organisme et plus précisément sur l'appareil manducateur. Cette revue de la littérature nous permettra d'élaborer une synthèse des pathologies oro-faciales causées par l'exposition à des variations de pression et un recueil de bonnes pratiques spécifiques sera proposé aux chirurgiens-dentistes pour une prise en charge curative plus adaptée. La réalisation d'un questionnaire soumis aux Chirurgiens-dentistes diplômés en France complètera cette étude. La dernière partie de notre ouvrage traitera des connaissances actuelles des effets de la gravité sur l'appareil manducateur et des possibilités de soins dans l'espace.

# 1. LE CORPS HUMAIN SOUMIS AUX CHANGEMENTS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE ET DE GRAVITE

## 1.1. Rappels physiques et liens entre poids, masse, volume et pression.

- Liens entre pression et volume

La loi de Boyle et Mariotte permet d'expliquer les phénomènes odontologiques se produisant lorsque le patient est soumis à des **variations de pression environnante**. Celle-ci stipule que, « à une température donnée, le volume d'un gaz est inversement proportionnel à la pression ambiante ». Il en résulte la formule mathématique suivante :

$$PV = KT$$

Avec P : Pression, V : Volume, K : constante de Boltzmann ( $1,38064852 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ), T : Température.

Ce qui signifie donc que lorsqu'une personne monte en altitude, la pression environnante diminue, et l'air contenu dans les cavités aériques présentes dans le corps humain, qu'elles soient naturelles, artificielles et / ou pathologiques, va tendre à augmenter son volume. À l'inverse, lors de la plongée sous-marine, la pression environnante augmente et le volume diminue, le processus contraire du précédent (Cudennec et Trannoy, 1994 ; Robichaud et McNally, 2005).

Ainsi, il est important de savoir dissocier le milieu hypobare du milieu hyperbare (Cudennec et Trannoy, 1994 ; Robichaud et McNally, 2005):

- Le milieu est **hyperbare** si la pression environnante à ce milieu est **supérieure** à la pression atmosphérique située au niveau de la mer ;
- Le milieu est **hypobare** si la pression environnante à ce milieu est **inférieure** à la pression atmosphérique située au niveau de la mer.

Par ailleurs, en plus de la variation verticale de pression atmosphérique qui correspond aux exemples cités précédemment, il existe une variation horizontale. Celle-ci est due à l'existence de zones de dépression, où la pression atmosphérique est inférieure à 1013 hPa, des zones anticyclones, où la pression atmosphérique est supérieure à 1013 hPa, et des zones isobariques. Les dépressions sont présentes par mauvais temps, alors que les anticyclones sont associés au beau temps (Durden, 2010).

- Liens entre poids, masse, gravité et accélération

La notion de **gravité** a été inventée par Isaac Newton. Sa théorie de la **gravitation universelle**, est à l'origine de la découverte de l'attraction terrestre qui est formulé de la manière suivante :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{M_A M_B}{d^2}$$

Avec  $M_A$  et  $M_B$  : la Masse en kilogramme,  $d$  : la distance en mètre,  $F_{A/B}$  et  $F_{B/A}$  : la Force en newton,  $G$  : constante universelle de gravitation ou constante de Newton.

Cette formule met en lien l'importance que joue la différence de masse de deux objets pour une distance définie pour qu'ils puissent s'attirer. Elle permet également d'expliquer pourquoi les astronautes ne sont pas soumis à la gravité, leur masse étant trop faible pour la distance Terre-astronaute.

Poids, masse et force de gravité sont trois notions distinctes à différencier :

- La **masse** ( $m$ ) correspond à l'ensemble de la matière qui va constituer un objet.
- Le **poids** ( $p$ ) est le produit de la **masse** et de la **force de gravité** ( $g$ ).
- Sur terre la gravité est égale à 1. Cette valeur sert de référence pour le reste de l'univers.

$$p = m \times g$$

Tout corps doté d'une masse proche de la terre va naturellement être attiré par le champ de pesanteur. Il s'agit d'un champ d'accélération. Newton a défini que tous les corps sont dotés d'une masse, dont la terre et les corps célestes, et sont responsables d'une force attractive sur les autres corps massifs.

Les notions de gravité et de pesanteur sont à discerner :

- La **gravité** considère que deux objets ont chacun une masse non nulle considérée comme matériel et situé en un point et n'ayant aucun volume propre. Autrement formulé, il s'agit de rester au même endroit sur terre avec une vitesse nulle. La notion d'accélération n'intervient pas. Il existe une constante universelle de gravitation.

Elle est approximativement égale à :  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ .

- La **pesanteur** prend en compte l'**accélération**. Une planète tourne sur elle-même, ainsi le mouvement d'une planète a une influence sur chacun de ces points. Tout point situé sur une planète se voit exercer une force supplémentaire due à ce mouvement. L'accélération de pesanteur est notée  $g$ , elle est approximativement équivalente à  $9.81 \text{ m.s}^{-2}$  qui correspond à  $9,806 65 \text{ N.Kg}^{-1}$ .

$g$  étant donc une unité d'accélération correspondant à l'accélération de la pesanteur à la surface de la terre.

$$F = m \times g$$

Avec  $F$  la force de pesanteur terrestre,  $g$  l'accélération de pesanteur terrestre,  $m$  la masse du corps proche de la Terre.

Cette formule permet de calculer la force exercée sur un corps en fonction de sa masse et de l'accélération terrestre.

Ainsi tout corps présent sur terre subit 2 forces : l'attraction terrestre, et la force qui fait tourner le corps à la même vitesse qu'un point à la surface de la terre, c'est-à-dire l'accélération. En effet, tout corps présent sur terre, même s'ils sont immobiles, subissent une force d'accélération. L'accélération est donc dépendante de la vitesse de rotation de la terre sur elle-même qui est dépendante de sa masse. Ainsi le calcul de la force subie par un corps sur terre peut se calculer d'une autre façon :

$$F = \frac{m \times M \times G}{R^2}$$

Avec F la force, m la masse du corps présent sur terre, M la masse de la terre, G la constante de gravitation, R le rayon de la terre.

**La force d'accélération permet de distinguer la gravité de la pesanteur.** La formule mathématique permettant de calculer la pesanteur (g) en fonction de la gravité (G) est la suivante :

$$g = G \times \frac{M^{\text{terre}}}{R^{\text{terre}^2}}$$

Une navette spatiale est en chute libre, c'est son accélération qui lui permet d'être en orbite autour de la terre et qui l'empêche de venir s'écraser au contact de la terre.

On distinguera deux types d'accélération (Heiskanen et Moritz, 1967 ; Brulle, 2008) :

- **L'accélération verticale**, dans un axe perpendiculaire à la surface de la terre. Les pilotes d'avion sont les principaux intéressés par ce type d'accélération. Lors d'une accélération dirigée vers le haut, g est positif. Le sang a tendance à se diriger vers la partie inférieure de corps humain. Selon les études, le corps peut résister jusqu'à 5 g sans perdre connaissance. Cependant il existe

des équipements spéciaux (combinaisons) pour lutter contre les phénomènes biologiques en concentrant une plus grande quantité sanguine vers la partie haute du corps et permettant aux pilotes de supporter jusqu'à 9 g. Quand la force g augmente, la symptomatologie suivante va progressivement apparaître :

- Le voile gris, la personne perd la perception des couleurs.
- La vision du tunnel, la vision périphérique disparaît progressivement.
- Le voile noir, la vision disparaît totalement sans perte de connaissance.
- Le black-out, la personne subit une perte de connaissance.
- Le décès, si l'accélération ne cesse pas d'augmenter après la symptomatologie précédemment citée.

Quand la force g est négative, c'est-à-dire dirigée vers le bas, le sang va se diriger vers la partie supérieure du corps humain. La limite est située entre 2 et 3 g. La personne peut subir une voile rouge, c'est-à-dire une vision rougeâtre. Ce phénomène est dû à une dilatation des vaisseaux capillaires de l'œil. Les vaisseaux de l'œil et du cerveau peuvent s'œdématiser et éclater sous l'influence de l'augmentation de la pression sanguine.

- **L'accélération horizontale**, où la force d'accélération est parallèle à la surface de la terre. La tolérance du sujet est bien meilleure par rapport à l'accélération verticale. Le corps humain peut supporter jusqu'à 12 g en position allongée sur le ventre, et 17 g en position allongée sur le dos.

Les notions d'hypergravité et d'hypogravité sont essentielles à la compréhension du sujet (Abe et coll., 2001 ; Yin et coll., 2010 ; May 2017) :

- **L'hypergravité** est la condition dans laquelle la force de gravité est supérieure à la terre, autrement dit, supérieur à 1 g. Les conditions d'**hypergravité** sont recherchées sur terre pour la recherche sur la physiologie humaine en combat aérien et en vol spatial, mais aussi pour des essais de matériaux et d'équipements pour les missions spatiales.
- **L'hypogravité** est donc la situation inverse de l'**hypergravité**, c'est-à-dire une condition dans laquelle la force de gravité est inférieure à la terre, entre 0 et 1 g. La **microgravité** correspond à la situation selon laquelle l'ensemble des

forces gravitationnelles soumises à un corps possède une résultante très faible par rapport à la pesanteur à la surface de la terre, autrement formulé, dans un état où la force de gravité se rapproche de 0 g.

**Hypogravité** et **microgravité** sont des situations où les forces de gravitation sont très faibles, soit parce que un point précis se trouve très éloigné de tout corps massif, ou soit parce que les influences gravitationnelles de plusieurs corps massifs s'appliquent sur ce point précis. La microgravité ne peut donc pas se produire au voisinage de la terre.

## **1.2. Populations et situations sous l'influence de ces phénomènes physiques.**

- **Les alpinistes**, tout comme le **personnel aérien** pour le cas des aéronefs qui ne sont pas munis de cabine de pressurisation. Ils subissent une variation de pression de l'air, quand l'altitude augmente, il y a une réduction de la densité de l'air et de la pression de l'air (tableau 1). À 18 000 pieds (5500mètres), la pression de l'air est moitié celle du niveau de la mer, et à 33 000 pieds (10000 mètres), un quart seulement (figure 1 et 2). Les changements de pression théoriquement possibles en altitude vont de 1 atmosphère au niveau du sol à 0 atmosphère dans l'espace. Il y a une régulation de pression dans les avions grâce des soupapes de décharge. Ainsi, personnels et passagers des aéronefs voyageant dans des cabines non pressurisées sont des sujets à risque (Macaluso et Galli, 2005 ; Robichaud et McNally, 2005 ; Gulve et Gulve, 2013 ; Mandke et Garg, 2015).



Tableau 1 : Présentation de la variation de pression atmosphérique en fonction de l'altitude (source : Illman, 1971)

Altitude en mètre	Pression en hPa
0 m	1013.25
500 m	954.61
1000 m	898.76
1500 m	845.58
2000 m	794.98
2500 m	746.86
3000 m	701.12
3500 m	657.68
4000 m	616.45
4500 m	577.33
5000 m	540.25
6000 m	471.87
7000 m	410.66
8000 m	356.06
9000 m	307.48
10000 m	264.42
11000 m	226.37

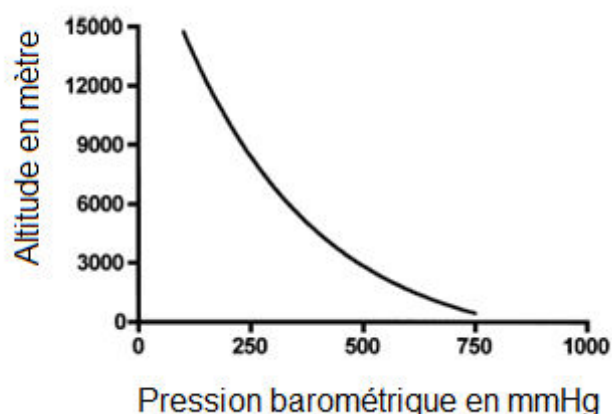


Figure 1 : Schéma représentant, en aéronautique, l'altitude en fonction de la pression. Il est observable sur celui-ci que, plus l'altitude va diminuer (lors de la descente) et plus la pression barométrique va augmenter, et inversement (Source : Macaluso et Galli, 2005)

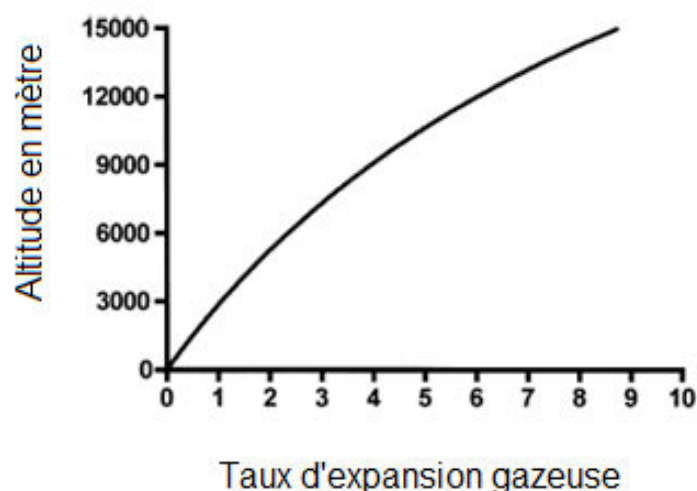


Figure 2 : Schéma représentant, en aéronautique, l'altitude en fonction de l'expansion gazeuse. Plus l'altitude augmente, plus le volume d'un gaz augmente (source : Macaluso et Galli, 2005)

- **Les plongeurs et les scaphandriers**, il faut savoir que plus ils plongent profondément, et plus la pression environnante augmente à raison d'1 atmosphère tous les 10 mètres. Les changements barométriques pendant la plongée sont très importants et responsables d'une pathogenèse plus fréquente que les modifications barométriques observées en vol (Venutolo et coll, 2007 ; Gulve et Gulve, 2013). Les professionnels soumis au milieu hyperbare sont nombreux. Ils sont classés en « mention » (Méliet, 2016) :
  - Mention A : travaux subaquatiques, effectués par des entreprises certifiées (par exemple des travaux en rivière, mer ou plan d'eau : barrages, puits, forage, aménagements de berges...) ;
  - Mention B : interventions subaquatiques dans les activités physiques ou sportives, l'archéologie sous-marine et subaquatique, les arts, spectacles et médias, les cultures marines et l'aquaculture, la défense, la pêche et les récoltes subaquatiques, les secours et la sécurité, les techniques, sciences et autres interventions ;
  - Mention C : interventions sans immersion dans les domaines de la défense, le domaine médical, les secours et la sécurité, les techniques, sciences et autres interventions ;

- Mention D : travaux sans immersion effectués par des entreprises certifiées (par exemple : tubistes, creusement de galeries, tunnels, terrassement ...).

Ces personnes ont un suivi médical obligatoire dans le cadre de leurs activités professionnelles. Aucune mention, par contre, n'est faite quant à des contrôles réguliers chez un chirurgien-dentiste.

- **Les astronautes** sont des personnels aériens pouvant être placés dans un état d'antigravité, c'est-à-dire dans un environnement où leur organisme n'est plus soumis à la gravité terrestre.

Astronautes, cosmonautes, spationautes, taïkonautes correspond au même métier, ce sont les membres d'un équipage spatial. Cette terminologie diffère selon les pays : les astronautes ont une origine américaine, les cosmonautes une origine russe, les spationautes une origine française, et les taïkonautes une origine chinoise.

- Sur terre il est très compliqué de se trouver en état de microgravité. Toutefois certaines situations de microgravité de courte durée peuvent être ressenties, comme par exemple, dans les montagnes russes ou en état de chute libre, dans les parcs d'attraction.

Enfin, certaines expositions peuvent être accidentelles ou dictées par des raisons médicales :

- **Les engins explosifs**, ou toute autre source potentiellement génératrice d'une onde de choc lors de leurs explosions, sont susceptibles de créer une onde de choc, augmentant de façon rapide et brutale la pression au niveau du lieu d'impact de cette onde. (Chakraborty et coll., 2015).
- L'« **oxygéno-thérapie hyperbare** est une thérapie qui a pour but d'apporter une quantité importante d'oxygène à une pression supérieure à la pression atmosphérique standard » (Boussuges et coll., 1993).

## 2. EFFETS DES VARIATIONS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE DU CORPS HUMAIN

La pression atmosphérique est un sujet largement étudié dans la littérature. De nombreuses publications ont décrit les conséquences de la pression atmosphérique sur le corps humain. Nous ne ciblerons que certains points.

Concernant les conséquences osseuses que peut subir le corps humain lorsqu'il est en milieu hyperbare, les résultats restent controversés. La composition minérale osseuse et la densité minérale osseuse sont deux paramètres largement étudiés. L'étude de Wesolowska et ses collaborateurs (2011) montre une absence de variation de ces paramètres signant ainsi un catabolisme inchangé. Il faut noter que dans cette étude, le seul facteur étudié est le temps de plongée, et non la profondeur de plongée qui est un facteur proportionnel à la pression environnante (Wesolowska et coll., 2011).

Toutefois, après une exposition hyperbare de plusieurs mois ou plusieurs semaines, il est possible d'observer dans de rares cas une nécrose osseuse avasculaire, nommée dans cette situation **ostéonécrose dysbarique** (Wilmshurst et Ross, 1998). Cette lésion osseuse est asymptomatique. Elle reste toutefois préoccupante car elle peut subir des complications malignes. Si cette pathologie est à proximité d'une articulation, la **dégénérescence articulaire** peut être rapide et sévère. La tête humérale est le lieu privilégié de l'ostéonécrose dysbarique juxta-articulaire chez le plongeur. Le risque de développer une telle pathologie augmente avec la profondeur et à la durée sous l'eau ; cependant elle a déjà été décrite après une seule longue exposition hyperbare avec décompression rapide (Wilmshurst et Ross, 1998).

Une séance de plongée associe un milieu hyperbare, une hyperoxie et une activité physique. Tous ces facteurs provoquent une **réponse inflammatoire** avec l'expression des gènes codant pour les cytokines et des gènes liés à la voie de signalisation de la synthèse du monoxyde de carbone (Sureda et coll., 2014).

Lors de la remontée, la baisse rapide de pression environnante peut causer des accidents de décompression. Pour rappel « *un palier de décompression est le temps durant lequel il faut rester à un certain niveau de plongée permettant d'abaisser les taux d'azote et d'hélium dans les tissus. Ce procédé permet d'éviter les accidents de*

*décompression* » qui se traduisent par la **formation de bulles gazeuses** dans le corps (Bilopavlovic et coll., 2013).

Des agrégations phospholipidiques peuvent survenir autour de bulles d'air intravasculaires. Elles vont alors déclencher l'activation des plaquettes et des facteurs de coagulation (notamment le facteur XII), entraînant un **risque de coagulation intravasculaire** (Bruy, 2005).

Lors de la décompression, des bulles de gaz (d'hélium ou d'azote) sont fabriquées dans le système veineux croisant le système artériel. Une étude a montré, après des plongées consécutives à une profondeur de 18 mètres, tout en respectant les règles de sécurité (respect des paliers de décompression), une production importante de bulles mais aucun signe de lésion neuronale ou de la barrière hémato-encéphalique (Bilopavlovic et coll., 2013).

Toutefois, un état de stress stimule la sécrétion de cortisol, tout comme un état hyperbare. Cette information a été prouvée par un taux de cortisol salivaire augmenté. D'autres paramètres ont également été étudiés, comme la vitesse moyenne de réponse à des questions, la santé mentale générale et la fatigue mentale. L'analyse de ces paramètres a mis en évidence une réduction des performances cognitives après la plongée (Pourhashemi et coll., 2016).

### 3. LA SANTÉ DE L'APPAREIL MANDUCATEUR SOUMIS AUX CHANGEMENTS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE

Les changements de pression touchent d'autres organes de la portion céphalique du corps humain que les organes dentaires. À l'instar de l'appareil locomoteur, ils ont un effet sur l'appareil stomatognathique et ils peuvent causer un barotraumatisme de l'oreille externe ou moyenne, une barosinusite, ou encore des maux de tête (Zadik, 2009a).

#### 3.1. Effets sur l'appareil stomatognathique

Chez les plongeurs, la contraction quasi permanente des mâchoires et les variations de pression peuvent induire des blessures au niveau des structures oro-faciales. Ce syndrome est nommé « ***diver's mouth syndrome*** » ou « **syndrome de la bouche du plongeur** ». Les personnes peuvent présenter un inconfort ou une douleur au niveau des articulations temporo-mandibulaires. Ces douleurs articulaires semblent avoir une prévalence augmentée chez les femmes. Selon certains auteurs, ce sont les symptômes plus fréquemment rencontrés, un quart des plongeurs en souffrirait (Feng et coll., 2016).

De plus, la pratique de la plongée sous-marine peut exacerber des troubles temporomandibulaires préexistants. Plusieurs symptômes sont visibles, comme des douleurs musculaires et articulaires, un dérangement interne du disque temporomandibulaire et des maux de tête (Drucker et Zadik, 2013).

Par ailleurs, le condyle mandibulaire a une vascularisation de type terminale assurée par l'artère alvéolaire inférieure responsable de 80% de la vascularisation mandibulaire. Les accidents de décompression atteignant cette zone anatomique sont tragiques et peuvent causer une **ostéonécrose dysbarique aseptique du col et du condyle de l'articulation temporomandibulaire** (Bruy, 2005).

#### 3.2. Effets sur l'appareil auditif

Le **barotraumatisme de l'oreille externe** est causé par une lésion de la muqueuse du conduit auditif externe en raison de l'espace hermétique entre un objet obstruant le conduit (comme un bouchon d'oreille par exemple) et la membrane tympanique.

Pendant une phase d'augmentation de pression atmosphérique externe, un différentiel de pression entre l'espace clos de l'oreille externe et l'espace externe se crée. Ainsi, la couche externe de l'épithélium de la membrane tympanique et/ou de l'épithélium externe du canal subissent alors des phénomènes d'aspiration par rapport au tissu sous-jacent créant un vide partiel. Des zones hémorragiques sous-épithéliales se forment et créent des douleurs (Murrison et coll., 1991 ; Pathak, 2015 ; Carmichael et Boyev, 2016).

Le **barotraumatisme de l'oreille moyenne** est une inflammation traumatique aiguë ou chronique dans l'espace de l'oreille moyenne produite par un différentiel de pression entre l'air présent dans la cavité tympanique et celle de l'atmosphère environnante. L'oreille moyenne est ventilée par le tube auditif ou trompe d'Eustache, maintenu béant grâce à la contraction des muscles tenseur du voile du palais et salpingo-pharyngien. Cependant, lors d'une augmentation rapide de pression atmosphérique, la pression négative développée dans l'oreille moyenne ne disparaît plus spontanément et un vide partiel se crée entraînant la rétraction de la membrane tympanique, et causant une hémorragie (Zadik, 2009a ; Pathak, 2015). Ce processus peut se corriger en équilibrant la pression présente dans l'oreille moyenne avec celle de l'environnement, ou en rétablissant la perméabilité du tube auditif. Dans certains cas une tympanostomie chirurgicale pourra être proposée (Murrison et coll., 1991 ; Carmichael et Boyev, 2016).

Le barotraumatisme de l'oreille moyenne peut également causer une paralysie faciale, nommée **baroparésie faciale**. La pression élevée de l'oreille moyenne, transmise au canal facial situé le long de la paroi interne de l'oreille moyenne (figure 3) peut entraîner une neuropraxie ischémique du nerf facial. Ce phénomène est unilatéral et est visible en plongée pendant ou après la remontée. La résolution est spontanée et s'effectue rapidement après la remontée car le débit sanguin reprend juste après que la pression dans l'oreille moyenne ne devienne inférieure à la pression de fermeture capillaire. Cette parésie peut impliquer les muscles faciaux, mais également les capacités sensorielles gustatives de la langue par l'intermédiaire de la corde du tympan (Zadik et Drucker, 2011).

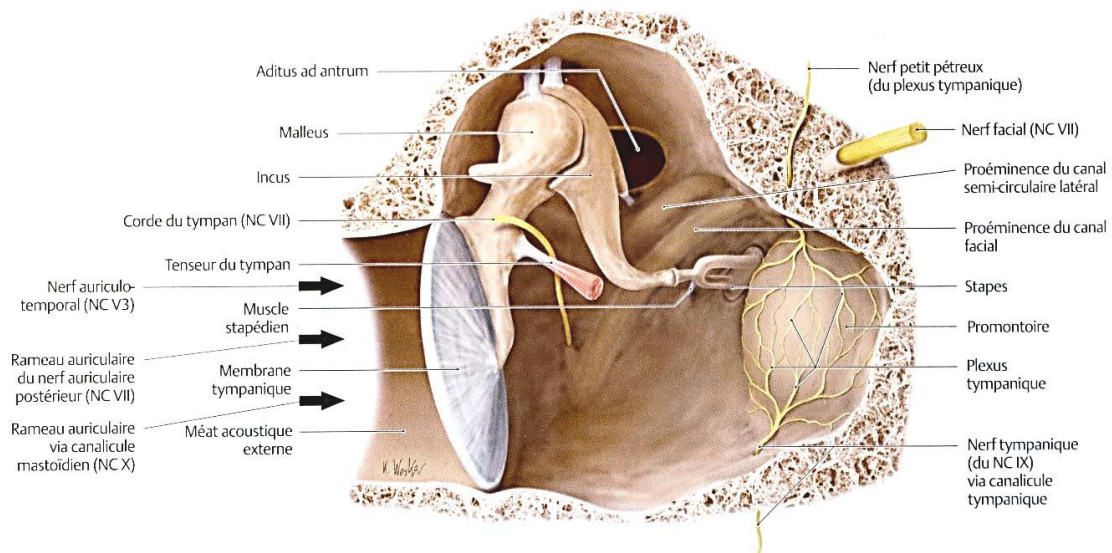


Figure 3 : Représentation schématique de l'oreille moyenne montrant le passage du nerf facial (VII) le long de la paroi médiale de l'oreille moyenne interne (source : Baker et coll., 2011)

Une douleur faciale peut également signer une **décompression**. Comme nous l'avons vu, lors d'une remontée rapide, la décompression est rapide, et s'accompagne d'une décharge d'azote dissous et la création de bulles de gaz. Ces bulles gazeuses peuvent se loger dans le tissu nerveux central, ou migrer via le flux sanguin vers d'autres parties du corps. Ce phénomène peut avoir de graves conséquences pour de multiples organes. La baroparésie faciale est à exclure lorsque ses symptômes ne se résolvent pas spontanément. Il est donc urgent d'adresser le patient et de prescrire des stéroïdes en première intention (Murrison et coll., 1991 ; Drucker et Zadik, 2013).

Dans ce contexte il est important de savoir qu'une malocclusion dentaire peut causer un dysfonctionnement du tube auditif. Un projet préventif et / ou thérapeutique, prothétique ou d'orthopédie dentofaciale, peut être envisagé afin d'éviter le barotraumatisme (Zadik et Drucker, 2011). En effet il a été prouvé que les enfants avec un **overbite** dentaire sont à fort risque de développer des dysfonctionnements du tube auditif. Il est plus compliqué, avec cette pathologie fonctionnelle, de réaliser des échanges gazeux corrects et d'équilibrer la pression dans l'oreille moyenne et les espaces mastoïdiens (McDonnell et coll., 2001).



### 3.3. Effets sur le nerf trijumeau

Des céphalées sont parfois ressenties après une plongée. Environ 7% des céphalées subies après une plongée ont pour cause une pathologie dentaire. En effet, le retour à une pression normale peut exacerber une symptomatologie dentaire préexistante pouvant être à l'origine d'une céphalée. Certaines douleurs dentaires peuvent avoir pour origine des modifications de structures nerveuses dues à la pression. Cette symptomatologie est nommée **baroparésie des nerfs crâniens trijumeau (V) et facial (VII)** (Al Thomali et Durgesh, 2016).

Nous allons illustrer les effets sur le nerf trijumeau par deux cas cliniques.

1<sup>er</sup> cas : un patient est allé consulter son dentiste car il a constaté une perte sensitive de la lèvre inférieure gauche. Ce symptôme était sélectivement présent lors de vols sur certains avions de ligne. Ce patient ne présentait aucune déficience du système nerveux après un examen neurologique. L'orthopantomogramme a révélé une lésion intra osseuse de 3 x 1,5 cm en regard de 36 et 37 (avec 37 absente) encerclée par une marge ostéosclérotique. Cette lésion était très proche du nerf alvéolaire inférieur, et semblait être refoulée vers le bas (figure 4 a). Au scanner cette lésion ne traversait pas les corticales vestibulaire et linguale qui se révélaient très fines (figure 4b, 4c). Une ablation chirurgicale de la lésion kystique a été réalisée, ainsi qu'une résection apicale de la dent numéro 36. L'examen histologique a diagnostiqué un kyste résiduel après avulsion de 37. Un orthopantomogramme de contrôle réalisé plusieurs mois après a montré une lésion osseuse totalement cicatrisée (figure 4d), et le patient n'a plus jamais ressenti de paresthésie du nerf alvéolaire inférieur lors de ses voyages en avion. Une pression intra-kystique, par le biais d'une augmentation de volume dans cette cavité, comprimait les fibres sensibles du nerf alvéolaire à chaque fois que le patient prenait l'avion. Cette compression le privait d'oxygène, bloquant ainsi sa conduction nerveuse. Ainsi la compression intra-kystique est à l'origine de symptômes dont l'importance est proportionnelle à l'altitude où se trouve le patient. Plus l'intervalle de compression est long, plus la latence avant récupération est longue également (Macaluso et Galli, 2005 ; Chakraborty et coll., 2015).

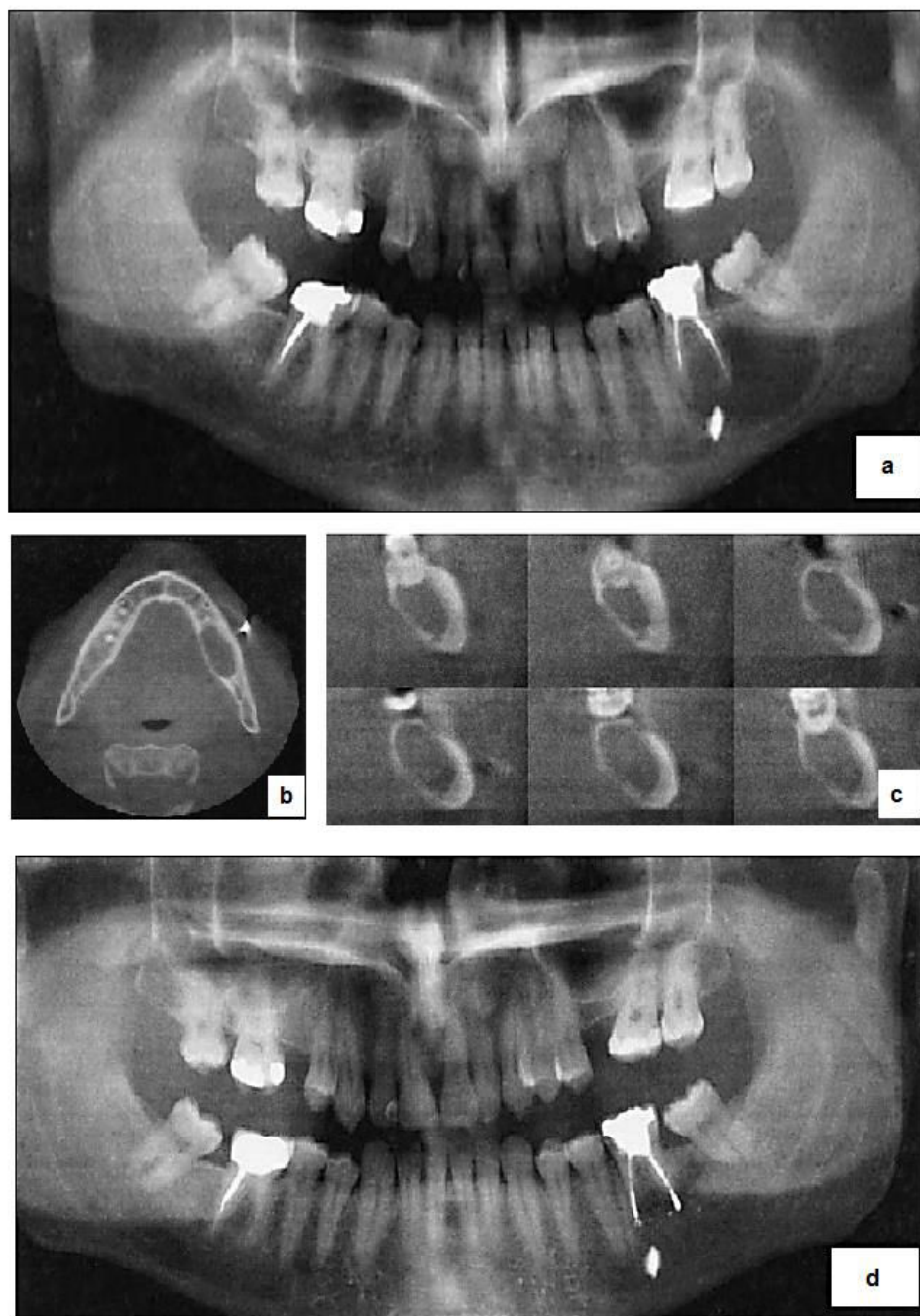


Figure 4 : Clichés radiographiques illustrant le premier cas clinique. **a** : orthopantomogramme montrant le kyste résiduel de 37, envahissant la région osseuse radiculaire de 36, entouré par un os sclérotique de plus forte densité et présentant une intime proximité avec le nerf alvéolaire inférieur qui semble être refoulé en direction basse de la mandibule. **b** : coupe transversale du scanner de la région mandibulaire gauche et montrant la présence kystique avec une dimension de 30 mm dans l'axe antéro-postérieur, et de 16 mm dans l'axe transversale, la corticale linguale ne montrant qu'1mm. **c** : coupe frontale de la région mandibulaire gauche témoignant de l'intimité du kyste résiduel avec le nerf alvéolaire inférieur. **d** : Orthopantomogramme post opératoire réalisé plusieurs mois après l'opération chirurgicale, la lésion est totalement résorbée et l'os mandibulaire reconstruit (source : Macaluso et Galli, 2005)

2<sup>ème</sup> cas : un patient a décrit des céphalées, un engourdissement de la lèvre supérieure, des dents, des gencives, et des surfaces internes et externes de la joue droite durant la pratique de la plongée sous-marine. Ces symptômes ont disparu 30 minutes après le retour à la surface. Les maux de tête qui accompagnaient les symptômes faciaux ont disparu dans un délai de 45 minutes suite à un épisode d'acouphènes. Il avait déjà vécu un événement similaire à deux reprises. Ce patient rapporte, 30 ans plus tôt, un accident avec fracture de l'os maxillaire droit, ainsi que plusieurs impactions dentaires. Lors de l'examen neurologique, les paires de nerfs crâniens étaient sans particularité à l'exception du nerf trijumeau. Une zone circulaire de 4cm (zone de paresthésie) de diamètre présentait des sensations réduites où la discrimination des sensations thermiques au chaud et au froid ainsi que des sensations tactiles ne semblait plus exister. Les dents maxillaires droites, de la canine à la première molaire maxillaire, ne répondaient plus aux tests de vitalité et semblaient être victime de paresthésie, et ce en continuité avec la zone d'hyposensibilité. Il semblerait que le traumatisme subi par ce patient lorsqu'il était jeune ait entraîné une neuropraxie ischémique en exposant anatomiquement le nerf sous-orbitaire (collatérale du deuxième branche du trijumeau V2) et la pression exercée sur ce nerf lors des plongées serait à l'origine de la symptomatologie décrite (Murrison et coll., 1991).

Ce même phénomène peut également être observé lors d'une surpression dans le sinus maxillaire. Ce phénomène peut léser les branches alvéolaires du nerf maxillaire (V2) entraînant une neuropraxie, stoppant la connexion neuronale. Les complexes alvéolaires supérieurs et les gencives des incisives, canines et prémolaires maxillaires ainsi que la lèvre supérieure ne répondent alors plus aux différentes stimulations (Murrison et coll., 1991).

Ainsi, tout changement de pression externe peut provoquer une compression temporaire sur les fibres sensibles du nerf alvéolaire, provoquant un collapsus capillaire, privant les nerfs d'oxygène et bloquant leur conduction. Plus la durée et la pression exercée sur ces nerfs est importante, et plus la latence va être importante avant récupération (Yuce et coll., 2016).

### 3.4. Effets sur le sinus maxillaire

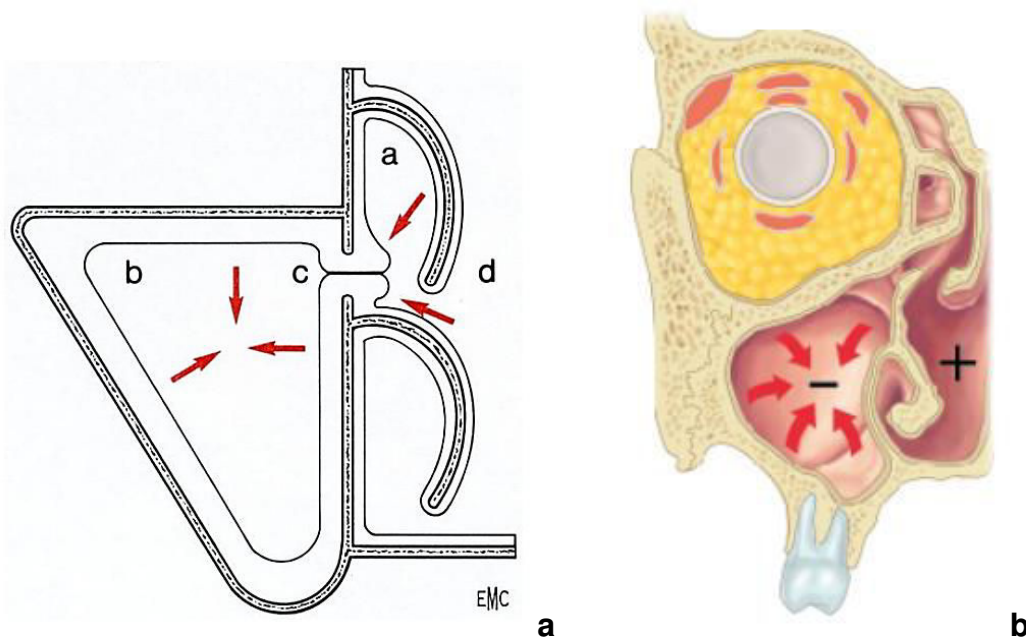
Les sinus maxillaires sont des cavités aériques dont la santé est dépendante de celle des muqueuses tapissant les parois, et de la perméabilité de l'ostium. Le **barotraumatisme sinusien**, ou **barosinusite** est une inflammation d'un ou plusieurs des sinus paranasaux, produite par une différence de pression (généralement négative) entre l'air de la cavité sinusale et celle de l'atmosphère environnante. Normalement il n'existe pas de différentiel de pression entre le sinus maxillaire et la cavité nasale, mais dès lors qu'il y a obstruction d'un ostium maxillaire, l'équilibre pressionnel ne peut plus se faire et cause une barosinusite. Un œdème de la muqueuse est la principale cause de cette obstruction, mais l'origine peut également en être un polype (Venutolo et coll., 2007 ; Zadik, 2009a).

#### 3.4.1. Mécanisme lésionnel

Selon les fréquences d'apparition, les barosinusites peuvent être accidentelles ou récidivantes. Les barotraumatismes sinusiens accidentels, fréquents, sont généralement présents chez un plongeur ou une personne navigant dans une cabine non pressurisée à haute altitude. Ils font généralement suite à une infection des voies aériennes supérieures ou d'une rhinite aiguë. Les barotraumatismes récidivants, doivent faire l'objet d'un bilan naso-sinusien afin d'établir un diagnostic précis et prescrire un traitement adapté. Ils peuvent contre-indiquer la pratique de l'aéronef ou de la plongée sous-marine (Verdalle et Morvan, 2013).

Le barotraumatisme sinusien existe sous deux formes, implosive et explosive (Verdalle et Morvan, 2013).

- La **forme implosive** survient lors de la descente en plongée en présence d'une dépression relative : lorsque la pression de l'environnement externe augmente (dans la cavité nasale), la dépression endosinusienne accroît l'obstruction de l'ostium, renforçant ainsi la coaptation des lèvres de la muqueuse du méat oedématié et transformant le sinus en une cavité close avec dépression relative (figure 5a, 5b) (Cudennec et Trannoy, 1994).



- a. Méat moyen
- b. Cavité sinusienne (maxillaire)
- c. Ostium
- d. Fosse nasale

Figure 5 : Représentations schématiques de la forme implosive d'un barotraumatisme sinusien représentant le lien entre la cavité nasale et le sinus maxillaire. Ces deux cavités sont séparées par l'ostium, qui va s'opposer à l'équilibration des pressions du fait de son état pathologique (Sources : a : Cudennec et Trannoy, 1994 ; b : Verdalle et Morvan, 2013).

On décrit 3 stades de gravité à cette forme implosive (Cudennec et Trannoy, 1994 ; Verdalle et Morvan, 2013) :

- État normal : on a une pression équilibrée entre la fosse nasale et le sinus (figure 6a).
- Barotraumatisme sinusien de 1<sup>er</sup> degré : il apparaît dès que le gradient de pression atteint 100 à 150 mmHg (0,13 à 0,2 atm). Les signes visibles sont un œdème et une hyperhémie exsudative de la muqueuse (figure 6b).
- Barotraumatisme sinusien de 2<sup>e</sup> degré : il apparaît un gradient de pression compris entre 150 et 300 mmHg (0,2 à 0,4 atm). L'œdème

devient plus important avec décollement intramuqueux et épanchement séromuqueux ou sérohématisque (figure 6c).

- Barotraumatisme sinusien de 3<sup>e</sup> degré : Il apparait un gradient de pression supérieur à 300 mmHg (> 0,4 atm). On observe la formation d'un hématome sous-muqueux, puis la rupture de la muqueuse et une hémorragie intrasinusienne (Figure 6d).

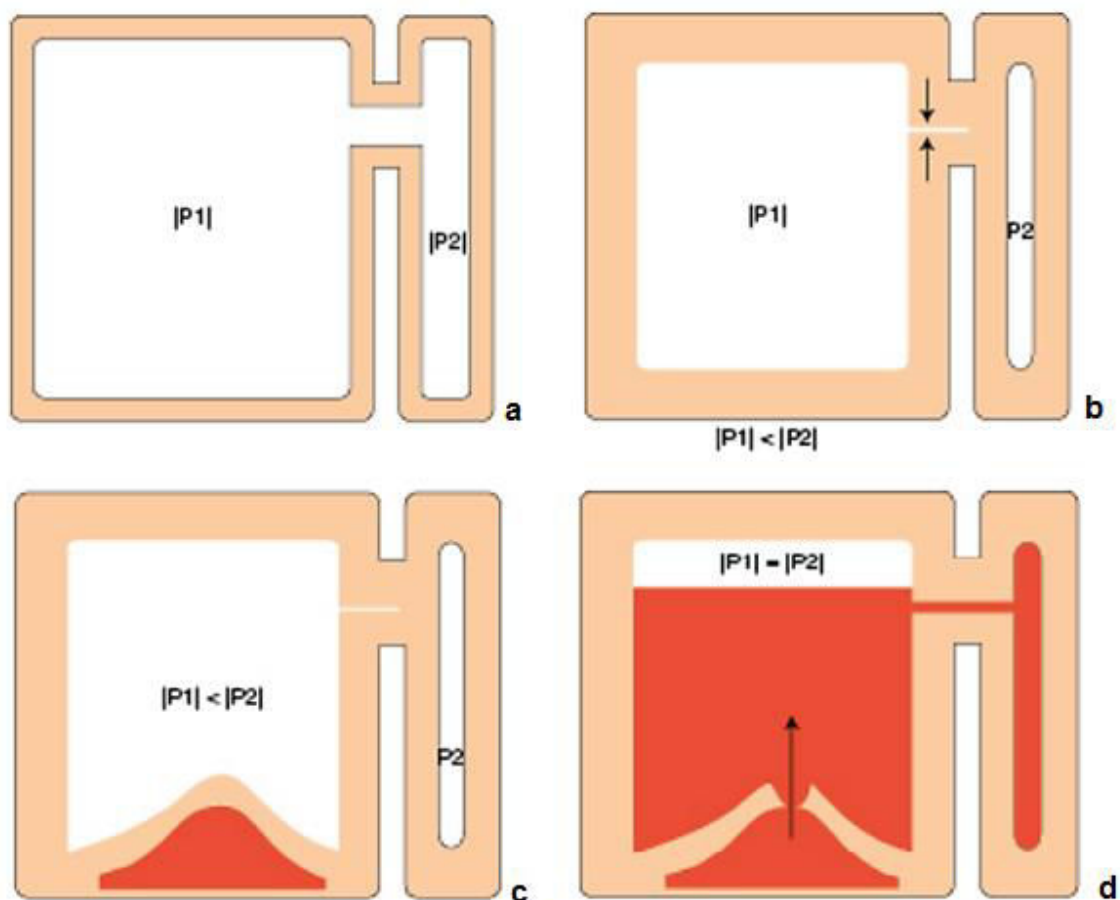


Figure 6 : Représentation schématique du sinus maxillaire et de la fosse nasale reliés par l'ostium, avec P1 la pression intrasinusienne et P2 la pression dans la fosse nasale (source : Verdalle et Morvan, 2013).

**a** : représentation d'un sinus sain avec  $P1 = P2$ .

**b** : représentation d'un sinus ayant subi un barotraumatisme de premier degré avec  $P1 < P2$ .

**c** : représentation schématique d'un sinus ayant subi un barotraumatisme de deuxième degré avec  $P1 < P2$ .

**d** : représentation schématique d'un sinus ayant subi un barotraumatisme de troisième degré avec  $P1 = P2$ .

Lors de la remontée, l'air présent dans le sinus va tendre à reprendre son volume initial. Cependant, ce volume se retrouve diminué du fait de l'œdème de la muqueuse sinusienne. À proximité de la surface, le plongeur va ressentir une forte douleur décrite comme insoutenable. Le plongeur devra forcer le passage pour regagner la surface avec un risque de graves séquelles comme une fracture osseuse. Les barotraumatismes sinusiens sont présents dans 70 % des cas lors de la descente et 30% des cas lors de la remontée (Cudennec et Trannoy, 1994 ; Verdalle et Morvan, 2013).

- La **forme explosive** survient lorsque la pression environnante diminue, soit au cours d'une montée en plongée ou au cours d'une montée en altitude, dans une situation où l'ostium est obstrué. Les sinus sont alors en surpression relative en l'absence d'équipression. Cette surpression s'accroît d'autant plus qu'un obstacle intrasinusien (polype par exemple) empêche l'évacuation d'air. Lorsque le plongeur remonte en surface, la douleur sera de plus en plus intense et insoutenable car la différence de pression augmente entre le sinus et la cavité nasale. Cette douleur insupportable peut devenir syncopale mettant en danger la vie du plongeur. Parallèlement, un pilote d'avion peut interrompre sa montée en altitude pour éviter l'aggravation de ces signes sinusiens (Verdalle et Morvan, 2013).

Cependant, Cudennec et Trannoy (1994) rapportent que cette forme de barotraumatisme sinusien est moins fréquent et donc moins grave que le précédent car l'ostium laisse plus facilement l'air passer dans ce sens même en cas de méat œdématié (figure 7) (Cudennec et Trannoy, 1994).

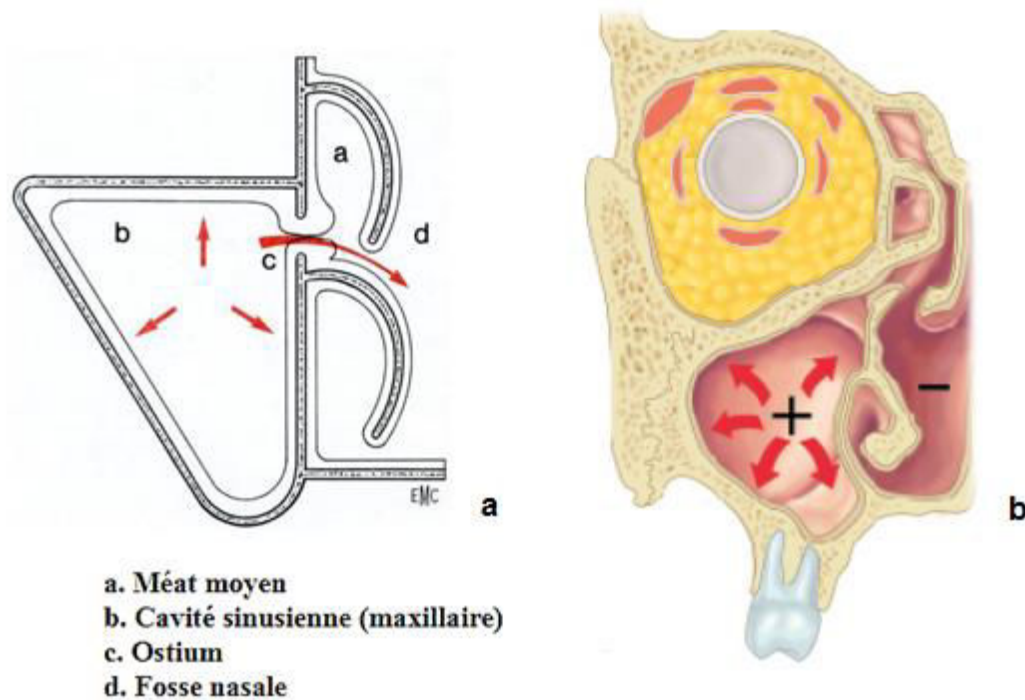


Figure 7 : Représentations schématiques de la forme explosive d'un barotraumatisme sinusien représentant le lien entre la cavité nasale et le sinus maxillaire. Ces deux cavités sont séparées par l'ostium, qui va s'opposer à l'équilibration des pressions du fait de son état pathologique (Sources : a : Cudennec et Trannoy, 1994 ; b : Verdalle et Morvan, 2013).

### 3.4.2. Signes cliniques

La douleur sera proportionnelle à la profondeur de plongée (Venutolo et coll., 2007).

La différence de pression de part et d'autre de l'ostium bouché va s'accroître tout au long de la remontée. À l'approche de la surface, le plongeur va avoir des signes cliniques exacerbés, notamment des douleurs, une épistaxis et parfois une fracture osseuse de zones fragiles et pouvant causer un emphysème sous-cutané (Cudennec et Trannoy, 1994 ; Venutolo et coll., 2007).

### 3.4.3. Examen radiologique

Un scanner des sinus centré sur les ostiums maxillaires sera réalisé, sur lequel il pourra être possible d'évaluer le degré du barotraumatisme. L'œdème du 1<sup>er</sup> degré sera visible par une hyperplasie muqueuse, l'hématome du 2<sup>e</sup> degré par une opacité



pariétale arrondie, le 3<sup>e</sup> degré par une opacité diffuse ou un niveau liquidien (Cudennec et Trannoy, 1994 ; Venutolo et coll., 2007).

#### 3.4.4. Traitement

L'objectif du traitement sera de rétablir la perméabilité de l'ostium (Venutolo et coll., 2007).

Le traitement de première intention sera la prescription d'antalgiques de palier 1 voire de palier 2. L'utilisation de décongestionnants locaux ou régionaux associé ou non à des aérosols avec un anti-inflammatoire stéroïdien vont permettre une reperméabilisation de l'ostium et traiter l'inflammation naso-sinusienne. La corticothérapie *per os* prescrite va permettre de réduire l'œdème.

En cas de rhinorrhée purulente associée, une antibiothérapie type amoxicilline-acide clavulanique ou céphalosporine de 2<sup>e</sup> génération sera instaurée. Pour les barotraumatismes de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> degrés, l'antibiothérapie sera systématique. On retrouvera une surinfection secondaire dans 28 à 60% des plongées sous-marines (Verdalle et Morvan, 2013).

### 3.5. Effets sur la santé dentaire des personnes soumises régulièrement à des variations de pression

Les barodontalgies ne sont pas rares puisqu'elles affectent 12% des plongeurs et 11,0% de l'équipage militaire aérien. La denture maxillaire est autant affectée par des troubles barodontologiques que la denture mandibulaire pendant un vol, alors que pour la plongée, la denture maxillaire est plus souvent victime de barodontalgie (Zadik, 2010 ; Kini et coll., 2015 ; Kumar et coll., 2015).

La santé buccodentaire des plongeurs a été étudiée par des études longitudinales :

**La première**, a évalué les barotraumatismes sur un échantillon de patients soumis à des variations de pression à 3, 6 et 9 ans après un examen initial. Les patients ont été divisés en 2 catégories en fonction de la pression atmosphérique à laquelle ils sont soumis : 1 291 sous-marinières travaillaient sous une pression atmosphérique normale et 1 289 plongeurs et hommes-grenouilles (les plongeurs passent moins de temps sous l'eau que les hommes-grenouilles mais à des pressions atmosphériques

plus importantes) sous une pression atmosphérique modifiée. À 9 ans, hommes grenouilles et plongeurs présentaient un taux significativement plus élevé de dents absentes ou couronnées par rapport à la situation initiale (Robichaud et McNally, 2005).

**La deuxième** étude longitudinale intéressait des plongeurs et des sous-mariniers sur une période de 10 ans suivant leur entrée dans la marine. Les résultats ont montré un état buccodentaire dégradé avec une augmentation de 300% des dents manquantes et de 900% de dents couronnées observées chez les plongeurs, et de 186% et 375% observées respectivement chez les sous-mariniers (Robichaud et McNally, 2005).

**Ces deux études montrent une forte corrélation entre une exposition régulière à des stress barométriques et la dégradation de la santé bucco-dentaire. Cette corrélation est d'autant plus importante que le stress barométrique est important** (Robichaud et McNally, 2005).

Nous n'avons trouvé aucune étude longitudinale semblable dans le domaine aérien. Cependant, les auteurs ont observé que les pathologies à l'origine de douleurs dentaires les plus répandues en vol sont dues à (Zadik, 2010 ; Kumar et coll., 2015 ; Kini et coll., 2015) :

- une restauration dentaire défectueuse ou une carie dentaire sans proximité pulpaire (29%) ;
- une pulpe nécrotique ou une inflammation périapicale (28%) ;
- une pathologie pulpaire vitale (14%) ;
- un traitement dentaire : on parle alors de "barodontalgie postopératoire" (11%) ;
- une barosinusite (10%).

### 3.5.1. Définitions

Il nous a semblé important de donner une définition exacte des termes couramment employés dans le domaine.

Le barotraumatisme : « Ensemble de troubles graves provoqués par une variation trop forte et / ou trop rapide de pression » (Bruy, 2005).

La barodontalgie : « est une sensation de douleur aiguë dans la dent, causée par la différence de pression atmosphérique lors de la montée ou de la descente, cette douleur pouvant causer des étourdissements ou même une incapacité. Elle peut engendrer un arrêt précoce d'un vol aérien ou d'une plongée » (Nogueira et coll., 2016).

### 3.5.2. La dent saine

Lorsque l'organe dentaire est totalement sain et qu'il ne présente aucune restauration dentaire, il ne présente qu'un très faible risque de souffrir des variations de pression survenant lors d'une plongée ou d'un vol. Cependant, il a été constaté, dans de très rares cas, des odontalgies vasculaires chez les plongeurs profonds, caractérisées par une hyperhémie et des micro hémorragies pulpaire pouvant évoluer vers une nécrose pulpaire aseptique discrète (Bruy, 2005).

Les effets de la pression sur l'organe dentaire procurent une symptomatologie douloureuse déclenchée par la stimulation des fibres nerveuses nociceptives pulpaire dès 3000 mètres d'altitude ou 10 mètres de profondeur (Al Thomali et Durgesh, 2016).

Dans les avions de chasse, de fortes accélérations entraînent une compression de la pulpe dentaire sur la paroi de la chambre pulpaire dentaire, causant une augmentation de pression intrapulpaire qui a pour effet de stimuler les fibres nerveuses nociceptives (les fibres myéliniques Adelta et amyéliniques C), et les mécano-nocicepteurs (Bruy, 2005).

En général, une lésion carieuse arrêtée présente peu de risque de progression vers le tissu pulpaire. Mais elle peut présenter un danger dès lors qu'elles sont soumises à une variation de pression. **Il est conseillé de traiter ce type de lésion et d'éliminer la carie même si elle est inactive** (Sikri et coll., 2017).

Concernant les dents incluses, elles sont recouvertes d'un sac péricoronaire. Celui-ci est sensible aux variations de pression lors du décollage d'un aéronef et peut être à l'origine de douleur (Nogueira et coll., 2016).

### 3.5.3. Pathologies pulpaire et périapicales en situation hypobare

Une douleur dentaire due à une modification de pression est un symptôme et non une condition pathologique, car elle correspond à la réactivation d'une pathologie orale déjà présente.

Il existe une classification des barodontalgies les séparant en deux groupes (Zadik, 2010 ; Kumar et coll., 2015) :

- **Indirecte** : de forme mineure, elle implique uniquement les dents maxillaires, elle est sourde et mal définie ; elle représente un dixième des barodontalgies totales ; elle est induite par le système nerveux, la douleur dentaire étant secondaire à la stimulation du nerf alvéolaire supérieur provoquée par une barosinusite présente lors d'une variation de pression atmosphérique.
- **Directe** : elle est induite par les soins et / ou pathologies dentaires. Elle se développe pendant une modification de pression atmosphérique et est bien localisée.

Le diagnostic différentiel de ces douleurs dentaires dues à une variation pression se fait grâce à l'anamnèse, la symptomatologie, les signes cliniques et radiologiques. Le tableau de Zadik (2009) résume les différents paramètres de ces douleurs, qu'elles soient directes ou indirectes en fonction des examens cliniques et radiologiques (tableau 2) (Zadik, 2009a, 2009b; Kumar et coll, 2015).

De manière générale, en aéronautique, une pathologie sur une pulpe vitale (pulpite) est à l'origine d'une douleur dentaire lors de l'ascension alors qu'une nécrose pulpaire provoque une douleur dentaire lors de la descente. En revanche une douleur d'origine dentaire ayant pour cause une pathologie périapicale survient indifféremment pendant la descente ou l'ascension. La douleur cesse dès le retour au sol, mais peut perdurer si la cause est une pathologie périapicale ou un barotraumatisme facial, et ce jusqu'à trois jours après l'atterrissage (Mandke et Garg, 2015 ; Pathak, 2015).

Tableau 2 : Comparatif des barodontalgies directes et indirectes (source : Zadik, 2009b)

Caractéristiques	Barodontalgie induite par une pathologie pulpaire (directe)	Barodontalgie induite par une pathologie périapicale (directe)	Barodontalgie induite par un barotraumatisme facial (indirecte)
<b>Cause</b>	Pathologie pulpaire	Pathologie périapicale	Barosinusite, barotraumatisme de méat
<b>Anamnèse</b>	Pendant l'ascension La douleur cesse généralement pendant la descente.	Parodontite périapicale : généralement à haute altitude (38 000 pieds ou 11500m) pendant une phase d'ascension ou de descente.	Pendant la descente La douleur continue habituellement au sol.
<b>Symptômes</b>	Pulpite irréversible : douleur pénétrante soudaine. Pulpite réversible ou pulpe nécrotique : douleur qui « tape ».	Douleur continue et intense ou exacerbation de la douleur battante.	Douleur dentaire maxillaire dans la région molaire ou prémolaire.
<b>Historique dentaire</b>	Soin dentaire récent. Sensibilité thermique dentaire récente (par exemple lors d'une consommation d'eau chaude ou froide).	Douleur à la percussion dentaire ou au contact dento-dentaire (par exemple pendant le repas).	Présence d'une infection des voies respiratoires supérieures présente. Antécédent de pathologie sinusienne.
<b>Signes cliniques</b>	Lésion carieuse étendue ou restauration défectueuse. Test au froid : douleur aiguë.	Lésion carieuse étendue, restauration défectueuse ou dent couronnée. Test de percussion : douleur aiguë.	Douleur à la palpation des sinus. Douleur aiguë lors d'un changement de la position de la tête.
<b>Signes radiologiques</b>	Lésion carieuse avec proximité pulpaire. Restauration à proximité de la chambre pulpaire.	Lésion carieuse avec proximité pulpaire. Restauration à proximité de la chambre pulpaire. Radioclarté périapicale. Obturation endodontique inadéquate.	Opacité (fluide) sur l'image du sinus maxillaire.

La Fédération Dentaire Internationale (FDI) subdivise la classe des barodontalgies **directes** en quatre groupes, en fonction de la pathologie pulpaire/péri-apicale et des symptômes (tableau 3) (Agrawal et Singh, 2012 ; Kumar et coll., 2015) :

- La classe I correspond à une douleur momentanée lors de l'ascension, dont le diagnostic est une pulpite aiguë.
- La classe II est une douleur lancinante lors de l'ascension et correspond à une pulpite chronique.
- La classe III correspond également à une douleur lancinante mais lorsqu'elle est présente lors de la descente en avion, elle signe une nécrose pulpaire.

- La classe IV représente une douleur persistante et sévère, présente après l'ascension et pendant la descente. Elle a pour origine un abcès ou un kyste péri-apical.

Tableau 3 : Détails des signes cliniques et diagnostics des quatre types de barodontalgies directes en aéronautique (source : Kini et coll., 2015)

	Anamnèse	Signe clinique	Diagnostic	Traitement
<b>Classe I</b>	Douleur aiguë momentanée pendant l'ascension (décompression) Asymptomatique en descente (compression) et après	Caries ou restauration inadéquate La dent est vitale Pas de pathologie périapicale	Pulpite aiguë	Mise en place d'une restauration temporaire à base d'oxyde de zinc / eugénol suivi d'une restauration permanente passé 2 semaines Traitement endodontique si l'inflammation est irréversible
<b>Classe II</b>	Douleur lancinante sourde pendant l'ascension (décompression) Asymptomatique en descente (compression) et après	Caries ou restauration Profondes. La dent est vitale ou non Pas de pathologie périapicale	Pulpite chronique	Traitement endodontique Avulsion de la dent si elle n'est pas restaurable
<b>Classe III</b>	Douleur lancinante sourde pendant la descente (compression) Asymptomatique à l'ascension (décompression) et après	Caries ou restauration La dent est non vitale Présence d'une pathologie périapicale	Nécrose pulpaire	Traitement endodontique Avulsion de la dent si elle n'est pas restaurable
<b>Classe IV</b>	Douleur persistante sévère après ascension (décompression) ou descente (ascension)	Caries ou restauration La dent est non vitale Une pathologie périapicale définie est présente	Abcès ou kyste périapical	Thérapie canalair et / ou chirurgie Avulsion de la dent si elle n'est pas restaurable

Des hypothèses ont été proposées pour expliquer les phénomènes physiopathologiques pouvant être à l'origine de barodontalgies pulpaire (Robichaud et McNally, 2005 ; Zadik, 2009a ; Agrawal et Singh, 2012) ; elles résulteraient de :

- Une ischémie directe résultant de l'inflammation elle-même.
- Une ischémie indirecte résultant de l'augmentation de pression intrapulpaire à la suite de la vasodilatation et de la diffusion des fluides vers le tissu.
- Le résultat de l'expansion d'un gaz intrapulpaire. Ce gaz peut être formé par des acides, des bases et des enzymes dans un tissu

enflammé qui vont entretenir cette sensation nociceptive en stimulant les fibres nerveuses. Ce gaz confiné dans un espace incompressible va être sujet à des variations de volume, et va provoquer des contraintes sur les parois de cet espace, les conséquences peuvent être multiples.

- Une hyperémie pulpaire.
- Le résultat de la fuite de gaz à travers les vaisseaux en raison de la réduction de la solubilité des gaz. Cette hypothèse a été formulée par la présence de bulles d'air sur des coupes histologiques de dents après barodontalgie.

La dernière hypothèse n'est pas acceptée par tous les auteurs, certains la rejettent car très peu de dents saines avec des bulles d'air présentes à l'intérieur ont été observées. D'autres auteurs pensent que les bulles de gaz visibles étaient probablement des artéfacts en raison d'une fixation erronée des préparations histologiques (Robichaud et McNally, 2005; Zadik, 2009a ; Agrawal et Singh, 2012).

Par ailleurs, dans un environnement présentant des fluctuations de pression, des canaux radiculaires ouverts sont susceptibles de provoquer une fuite du contenu intracanalair infecté vers les tissus périapicaux par un rejet septique pouvant s'abcéder ou causer un ostéophlégon, mais aussi un emphysème facial sous cutané (Bruy, 2005 ; Zadik, 2009, 2010 ; Mandke et Garg, 2015).

#### 3.5.4. Pathologies pulpaires et périapicales en situation hyperbare

En plongée sous-marine, le mélange gazeux utilisé dans les bouteilles a des propriétés physiques différentes par rapport à l'air se trouvant au niveau de la mer. Dans ce mélange, l'azote est remplacé par l'hélium, qui a pour avantage de donner un gaz de viscosité inférieure. Moins visqueux ce gaz pénètre plus facilement dans les tissus, notamment dans les dents, et peut se retrouver piégé dans des espaces fermés comme les tubuli dentinaires, la chambre pulpaire ou les canaux radiculaires. Ainsi, lors de la remontée des plongeurs, et selon la loi de Bowle, les bulles gazeuses piégées vont se dilater créant ainsi un symptôme douloureux ou même une explosion dentaire (Robichaud et McNally, 2005 ; Kumar et coll., 2015).

En plongée sous-marine, **lors de la descente**, la pression va augmenter, et un gaz piégé (provenant d'une lésion carieuse ou d'une restauration défectueuse) ne pourra pas ajuster sa pression interne à la pression environnante. Cet air va donc être forcé de pénétrer dans les tubuli dentinaires en direction de la pulpe provoquant alors un symptôme douloureux. Ce phénomène cesse au retour à la surface. Une pulpe dans un état inflammatoire suite à un fraisage forme des gaz, qui sont comprimés et augmentent la pression intra-cavitaire de la pulpe produisant une symptomatologie douloureuse (Kini et coll., 2015).

Un barotraumatisme peut également être observé **lors de la remontée**. L'air comprimé, se retrouvant dans un espace clos lorsque le plongeur est en profondeur, va se dilater et ne peut s'échapper assez rapidement. Ce phénomène est visible sur des traitements canalaires incomplets ou des restaurations défectueuses.

Plus le plongeur descend en profondeur, plus il y a une accumulation d'air dans ces espaces. Il peut ainsi se produire des douleurs, des fractures dentaires, des odontocrexes, voire même un emphysème si cette dent présente une lésion périapicale (Kini et coll., 2015).

#### 3.5.5. Lésions carieuses et restaurations plastiques

Une étude menée par des chercheurs a expertisé la qualité du collage sous des variations de pression. Pour ce faire, des disques de dentine de 10mm de diamètre sur 3 mm d'épaisseur ont été préparés et polis. Après une étape de mordantage, 20 disques de résine composite ont été collés sur les disques dentinaires en suivant le protocole recommandé par le fabricant, dont 10 avec une bille de polyester interposé entre les deux disques afin d'augmenter la porosité (espace rempli d'air). Les deux groupes de 10 dents ont été eux-mêmes divisés en 2 sous-groupes, l'un faisant office de témoin, et l'autre subissant six cycles de 30 minutes chacun à une pression comprise entre 5,5 et 6 bars (équivalent à une profondeur de 45 à 50 mètres sous l'eau). Ces échantillons ont alors été immergés dans une solution colorante à base de nitrate d'argent, puis dans une solution photo-développante. La percolation présente dans l'échantillon avec porosité et ayant subi les cycles de pression est largement plus présente que dans les autres échantillons.



Ceci prouve qu'**une condition hyperbare conduit à une perte d'étanchéité de l'interface de collage lorsqu'il y a présence d'une cavité aérique en interposition** (Cabrera et coll., 2017).

Dans une autre étude, 86 dents ont subi une augmentation de pression de 1035 kPa par rapport à la pression atmosphérique durant 2 minutes. Cinq de ces dents étaient endommagées après cette expérience. Le point commun de ces 5 dents est qu'elles présentaient toutes des restaurations avec des amalgames de très faible qualité, sans étanchéité avec des espaces libres entre la dent et la restauration. Les 81 autres dents étaient des dents non restaurées, mais présentant des lésions carieuses. Les auteurs concluent que **le facteur prédisposant à l'apparition de fracture dentaire dans un tel milieu est la restauration poreuse, non étanche** (Chakraborty et coll., 2015).

Une dent présentant une restauration fuyante, une bulle d'air dans un soin ou une lésion carieuse sous une restauration peut subir une fracture si elle est soumise à des variations de pression. En effet, cet espace confiné va vouloir gagner en volume dans une situation où la pression environnante va tendre à diminuer. Ce phénomène « d'explosion » dentaire est nommé « **barometric tooth explosion** » dans la littérature anglo-saxonne, ou **barodontocrexis** ou **odontocrexis**. Ce phénomène peut causer une forte douleur, et constitue un risque d'ingestion ou d'inhalation d'un fragment dentaire. Dans une pareille condition, un tel phénomène peut provoquer une situation dangereuse et même présenter un risque vital (Mandke et Garg, 2015 ; Boudi et coll., 2017 ; Sikri et coll., 2017).

En plongée sous-marine, ce phénomène est plus fréquemment visible à la remontée, mais peut aussi survenir à la descente.

Lors de la remontée, une dent avec une cavité en communication avec la cavité buccale (carie secondaire à proximité d'une obturation par exemple) peut exploser si l'équilibration des pressions n'est pas assez rapide entre la cavité dentaire et la cavité buccale, car l'air piégé va se dilater. La pression présente dans la cavité est donc plus importante que celle qui environne la dent et ainsi il y a un risque pour qu'elle « **explose** ».

Pendant la descente, une cavité aérique dans une dent (cavité sous une obturation, boulette de coton sous une obturation temporaire, canaux non obturés) et sans communication avec la cavité buccale voit un gradient de pression se créer. Ainsi les tissus dentaires et obturations entourant cette cavité vont l'écraser, et la dent peut « **implorer** » sous cet effet pour deux raisons (Gunepin et coll., 2015, 2016 ; Boudi et coll., 2017). :

- l'augmentation de pression exercée sur la restauration dentaire ;
- la contraction de l'air contenu dans la cavité.

Pour étudier le phénomène d'odontocrexis, des chercheurs ont réalisé une expérience sur 60 dents sur lesquelles une préparation canalaire et une médication temporaire intra-canalaire (hydroxyde de calcium) ont été effectuées. Les 60 dents ont été divisées en 3 groupes :

1. dans le premier groupe une boulette de coton a été placée dans la chambre pulpaire.
2. Dans le deuxième, le coton a été placé dans l'entrée canalaire.
3. Le troisième, n'avait pas de coton dans la chambre pulpaire.

Ces 3 groupes de 20 dents ont chacun été divisés en 2 sous-groupes en fonction de leur restauration coronaire provisoire obturées, soit avec une préparation d'oxyde de zinc-sulfate de calcium de type Cavit®, soit avec un eugénate (oxyde de zinc eugénol). Toutes les dents ont subi des cycles de pression simulant des plongées sous-marine en caisson hyperbare à température constante. Douze cycles de pression ont été exercés successivement sur les dents. Chaque cycle simulait une plongée de 10 mètres (soit 2 atmosphères). A chacun des cycles (durée 3 min), les dents restaient 1 min sous une pression de 2 atmosphères avec des temps d'1 min pour arriver à cette pression et pour revenir à une pression normale. Un temps d'1 min était respecté entre chaque cycle. Lors de l'expérience, aucune fracture, ni dentaire ni de l'obturation temporaire n'a été observée avec ou sans boulette de coton placée dans les entrées canalaires. En revanche, après l'expérience, le groupe des dents ayant une boulette de coton placée dans la chambre pulpaire présentait 20 % de fêlures dentaires, 20 % de fractures de l'obturation temporaire (figure 8a), et 30 % de fractures dentaires (figure 8b) et ce quel que soit le type de matériaux de

restauration temporaire utilisé pour l'obturation. **Il n'est donc pas recommandé de mettre une boulette de coton dans la chambre pulpaire comme soin temporaire pour une patientèle qui va être exposée à des variations de pression** (Gunepin et coll., 2016).

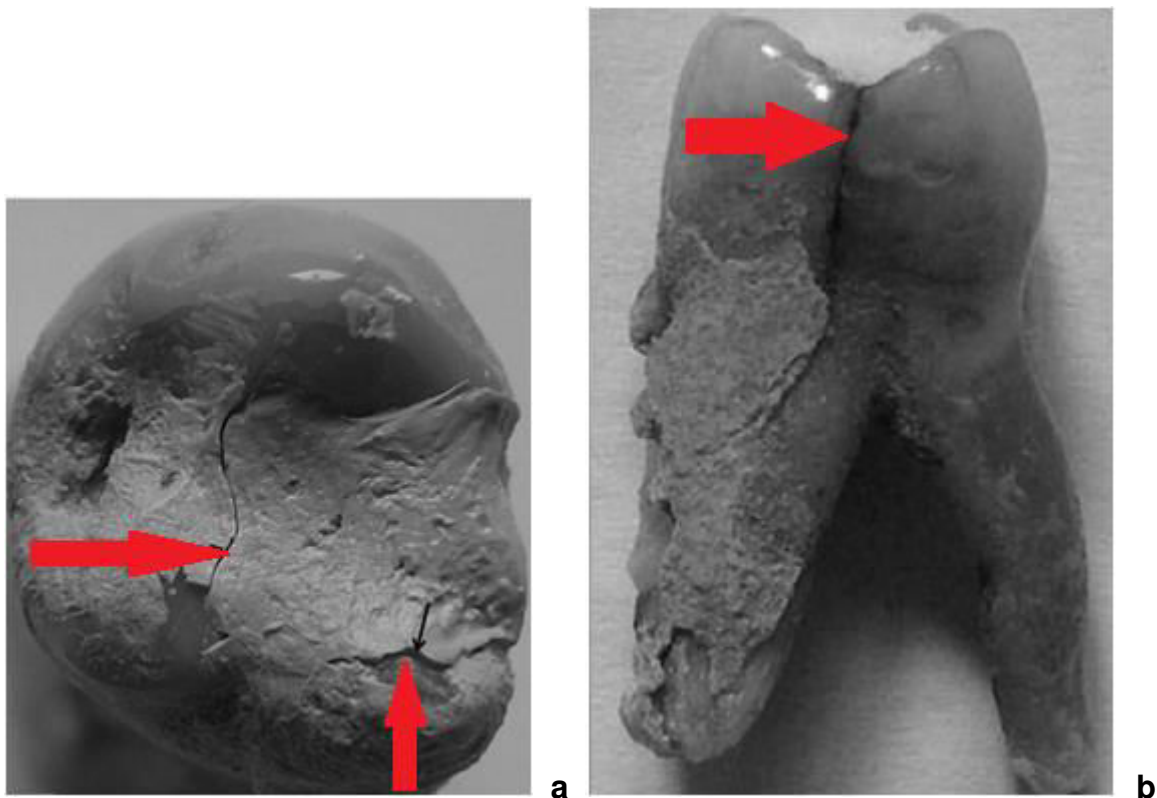


Figure 8 : Images illustrant les résultats obtenus pour des molaires contenant une boulette de coton et ayant subi des cycles de pression. **a** : image illustrant la fracture d'une obturation temporaire. **b** : image illustrant une fracture de la face proximale d'une molaire de l'expérience (source : Gunepin et coll., 2016)

Dans cette expérience, les changements de pression intra-canaux étaient mesurés grâce à des transducteurs intra-canaux. Les auteurs pensent un jour pouvoir utiliser ces mêmes dispositifs pour des mesures *in vivo*, voire même les utiliser comme outils diagnostique (Gunepin et coll., 2016).

Dès lors qu'il y a une restauration mal adaptée, il y a un risque de fracture ou de délogement. L'élément libéré dans la cavité orale présente alors un risque majeur d'inhalation ou d'ingestion. Une telle situation est très compliquée à gérer, en

particulier en plongée, car le patient aura tendance à effectuer une remontée rapide et en apnée qui peut engendrer de graves répercussions, notamment pulmonaires. Dans le secteur militaire, un barotraumatisme peut induire un échec d'une mission (Gunepin et coll., 2015 ; Cabrera et coll., 2017)

Une telle situation a pu être observée sur un patient âgé de 40 ans qui présentait des restaurations défectueuses sur trois dents (14, 15, et 46). Après la plongée, le chirurgien-dentiste a constaté la perte de deux restaurations et une fracture de la troisième (Figure 9a-c).

**Il est donc important pour les plongeurs de consulter régulièrement leur dentiste traitant pour traiter le plus précocement toute pathologie carieuse et les restaurations défectueuses. Par ailleurs, le chirurgien-dentiste a une part de responsabilité dans les soins restaurateurs qu'il réalise, il devra choisir le matériau de choix adapté à la situation afin d'éviter toute reprise carieuse** (Chakraborty et coll., 2015). Nous discuterons du choix des matériaux d'obturation dans le chapitre suivant traitant des bonnes pratiques thérapeutiques plus spécifiques à cette population soumise à des variations de pression.

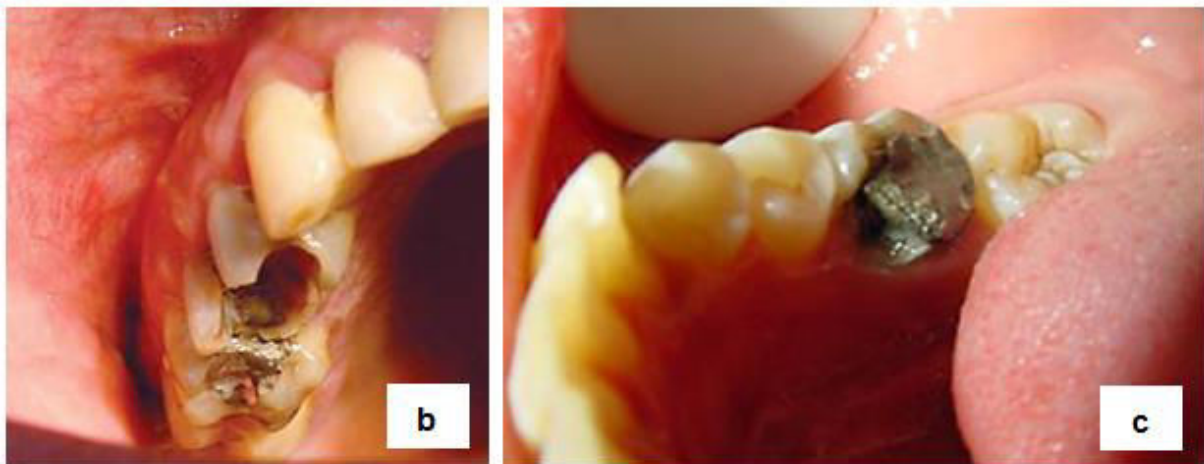
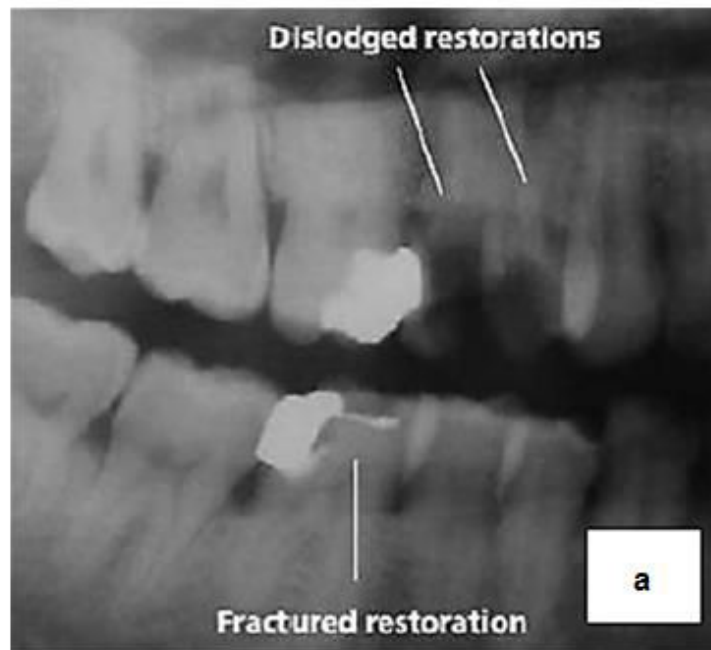


Figure 9 : **a** : Radiographie panoramique post barotrauma montrant de délogement de restaurations sur 14 et 15, et une fracture de la restauration sur 46. Avec « dislodged restorations » pour restaurations délogées et « fractured restoration » pour restauration fracturée. **b** : photographie illustrant les restaurations sur 14 et 15 qui se sont délogées. **c** : photographie montrant une première molaire mandibulaire avec une restauration à l'amalgame fracturée (source : Chakraborty et coll., 2015)

Dans les populations exposées à un milieu où l'air inhalé présente une haute teneur en oxygène (en très haute altitude ou lors de la plongée sous-marine grâce à la respiration à la bouteille), une oxydation peut être visible et il est parfois possible d'observer une corrosion électrochimique des amalgames dentaires, la pression entraînant une augmentation des courants galvaniques et de la corrosion. Toutefois,

une étude expérimentale sur des dents extraites obturées à l'amalgame et soumises à des changements de pression et d'exposition à l'oxygène *in vitro* n'a montré aucune altération des obturations au retour à une situation de pression normale (Bruy, 2005 ; Zadik, 2009c ; Mandke et Garg, 2015).

### 3.5.6. Odontologie prothétique

Un stress barométrique peut également toucher des éléments de prothèse fixée.

Une étude a permis de comparer le comportement des éléments prothétiques soumis à des augmentations barométriques en fonction de différents ciments de scellement, 1) ciment phosphate de zinc, 2) ciment verre-ionomère, et 3) ciment à base de résine (Robichaud et McNally, 2005).

Soixante prémolaires monoradiculées ont été réparties en 3 groupes de 20 dents pour chacun des ciments, et chacun de ces groupes a été subdivisé en 2 sous-groupes, témoin et expérimental. L'expérience consistait à soumettre, sur chaque dent expérimentale, quinze cycles de compression, de 0 à 3 atmosphères dans une chambre de pression. Un cycle effectuait une phase d'augmentation de pression de 3 minutes, puis le maintien de la pression de 3 atmosphères durant 3 minutes, puis une phase de décompression de 3 minutes (Robichaud et McNally, 2005).

Des microfuites ont été observées dans toutes les dents expérimentales scellées avec un ciment à base de phosphate de zinc (100%) et dans sept dents pour celles scellées avec un ciment à base de verre ionomère (70%). Aucune microfuite n'est apparue pendant le cycle de pression pour le groupe de ciment à base de résine (0%) (Robichaud et McNally, 2005 ; Khanna, 2010).

Plusieurs explications ont été données quant à la présence des microfuites suite à cette expérience, notamment la contraction volumétrique, la contrainte interne du matériau, ou encore la préparation des matériaux avant scellement, notamment pour le ciment phosphate de zinc et le ciment verre ionomère, au niveau desquels des porosités peuvent être incorporées lors de leur manipulation. Ces microporosités vont se dilater et se contracter lors du changement de pression, créant des microfuites fragilisant le ciment (Robichaud et McNally, 2005 ; Khanna, 2010).

Selon les auteurs, le ciment à base de résine n'est pas soumis à ce phénomène car les tubuli dentinaires sont obturés par des particules de résine, mais aussi parce que le matériau est plus flexible, évitant sa fracture (Robichaud et McNally, 2005 ; Khanna, 2010).

Après la mise en condition de ces dents, elles ont été évaluées pour leur résistance à la traction. Les résultats ont montré que la force nécessaire pour déloger les couronnes du groupe phosphate de zinc est 10 fois plus faible que celle du groupe témoin, et que celle du groupe des ciments à base de verre ionomère est 4 fois plus faible que celle de leurs témoins (figure 10). Pour le groupe des ciments résineux, la force nécessaire au retrait de la couronne reste la même pour le groupe de dents ayant subi des cycles de pression et le groupe témoin.

**Ainsi, pour les patients exposés fréquemment à des variations pression atmosphérique, il est préférable d'utiliser une colle à base de résine pour le collage des éléments de prothèse fixée.** (Robichaud et McNally, 2005; Khanna, 2010).



Figure 10 : Exemple d'une couronne délogée après barotraumatisme dentaire, indépendante de l'expérience (source : Chakraborty et coll., 2015)

Une diminution de pression atmosphérique peut influencer sur la rétention des prothèses amovibles complètes, en particulier sur les prothèses maxillaires. Une diminution de 70% de la pression environnementale réduit de 50% la rétention de la prothèse.

Cette perte de rétention s'observe surtout en situation de vol (Chakraborty et coll., 2015 ; Mandke et Garg, 2015).

De même, une prothèse amovible partielle voit sa rétention diminuer lors d'une augmentation de pression. Ce type de prothèse étant bien plus petit qu'une prothèse complète, le risque d'inhalation est bien plus élevé. Un cas de décès suite à l'inhalation d'une prothèse amovible partielle a été recensé. **Ainsi par précaution, ces dispositifs médicaux devraient être retirés avant de plonger** (Zadik et Drucker, 2011).

### 3.5.7. Orthodontie

L'adhésion de dispositifs orthodontiques a été étudiée en comparant deux types de matériaux, un ciment-verre ionomère (CVI) conventionnel, et un ciment au verre ionomère modifié par adjonction de résine (CVIMAR). Ces deux groupes ont été comparés entre eux et avec des groupes témoins respectifs (avec 20 échantillons pour chacun des deux groupes divisés en deux pour leurs groupes témoins), après 15 simulations de plongée consécutives de 304 KPa pendant 15 minutes. Suite à cette expérience la force nécessaire pour retirer les systèmes orthodontiques a été analysée. Il en résulte que la force nécessaire pour le retrait des dispositifs orthodontiques reste inchangée en utilisant des CVIMAR. En revanche, pour les CVI, la force de rétention dans le groupe exposé aux cycles de pression est significativement inférieure à celle du groupe témoin. **Ainsi les patients soumis à des pressions élevées et ayant des traitements orthodontiques doivent avoir leurs appareillages orthodontiques scellés par un ciment verre ionomère modifié par adjonction de résine** (Gulve et coll., 2012).

### 3.6. Effets sur le parodonte et sur la muqueuse buccale

Des lésions buccales sont parfois visibles suite à une explosion. Ces lésions sont causées par l'impact d'une onde de choc à très haute pression sur des structures pleines et remplies d'air (notamment aux interfaces air/liquide). En milieu aérien, cette onde de choc va se dissiper rapidement, proportionnellement au cube de la distance du centre de l'explosion. Dans l'eau cette onde de choc va être transmise de manière plus forte et plus rapide, et sur une plus grande distance. L'importance



des blessures buccales est liée à la durée et à l'amplitude de la pression maximale, mais aussi à la proximité de la personne avec le lieu de l'explosion. Lors d'une rapide et puissante évolution de pression, une explosion peut être à l'origine d'un barotraumatisme (Chakraborty et coll., 2015).

Cas clinique : un homme de 42 ans a été victime de l'onde de choc de l'explosion du pneu d'un camion qu'il a crevé avec un couteau. Son visage se trouvait à 4-5 cm du foyer de l'onde. Pendant l'examen clinique endo-buccal, des lacérations bilatérales de la base de la muqueuse du vestibule buccal ont pu être observées sur une longueur d'environ 5 cm. Ces lacérations des muqueuses étaient accompagnées de lacérations des muscles sous-jacents (figure 11). L'explosion de ce pneu a donc créé une onde de choc qui s'est dirigée en direction de la cavité orale de ce patient provoquant une augmentation de la pression intra-buccale causant ces dommages (Chakraborty et coll., 2015).



Figure 11 : Photographie de la cavité buccale du patient ayant subi une onde de choc par l'explosion d'un pneu. Des lacérations des muqueuses buccales sont largement visibles dans les fonds des vestibules mandibulaires droit et gauche (source : Chakraborty et coll., 2015)

Les plongeurs, tout comme le personnel aérien travaillant dans un milieu non pressurisé, présente un risque élevé de développer des maladies parodontales. Le mélange gazeux utilisé par les plongeurs et des gaz comprimés secs respirés dans l'avion sont responsables de xérostomie (Pathak, 2015 ; Sikri et coll., 2017).

Lors d'une forte pression partielle d'oxygène, il est possible d'observer dans certains cas une exacerbation des lésions muqueuses préexistantes (Bruy, 2005).

## **4. SPÉCIFICITÉS DES SOINS BUCCO-DENTAIRES**

### **4.1. Soins préventifs**

Durant la seconde guerre mondiale il était recommandé de retirer toutes les dents non pulpées des personnes, mais aussi toutes les racines résiduelles ou fracturées (Sikri et coll., 2017).

Actuellement, la fédération dentaire internationale recommande aux patients soumis à des fluctuations de pression de consulter annuellement leurs chirurgiens-dentistes traitants. Une consultation méticuleuse sera réalisée afin de rechercher tout signe pathologique, pour éviter tout risque de barotraumatisme. Le clinicien doit détecter les éventuelles restaurations défectueuses ou à faible rétention, les zones d'exposition dentinaire, d'éventuelles cuspides fracturées, les lésions carieuses secondaires, et les pathologies périapicales. Les dents présentant des restaurations extensives doivent être examinées avec soin à l'aide de tests de vitalité, associés ou non, à des examens radiologiques pour s'assurer de la vitalité pulpaire ou au contraire faire le diagnostic d'une nécrose pulpaire. Il est également conseillé de faire un examen radiologique global à l'aide d'un cliché panoramique tous les 3 à 5 ans (Robichaud et McNally, 2005 ; Zadik, 2009a, 2010 ; Kini et coll., 2015 ; Sikri et coll., 2017).

Parallèlement à cette consultation annuelle, il est nécessaire d'appliquer un programme de prévention adapté à cette population. L'utilisation de fluorures est vivement recommandée afin d'éviter l'apparition de lésions carieuses (Al Thomali et Durgesh, 2016).

#### **4.1.1. Bonnes pratiques lors des soins restaurateurs**

Il est recommandé de travailler sous spray abondant lors d'un fraisage des tissus dentaires afin d'éviter une pulpite réversible voire même irréversible post opératoire, car un état inflammatoire provoque la création de gaz au sein des tissus (Kini et coll., 2015).

Toutes les lésions carieuses doivent être soignées, même si celles-ci sont inactives, et toutes les restaurations doivent être obturées définitivement avant tout retour à une situation de variation de pression. Le clinicien devra enlever toute la carie sans laisser de dentine ramollie, et vérifier rigoureusement l'absence d'effraction pulpaire. Les techniques actuelles consistant en une éviction sélective du tissu carieux dans les bords de la restauration et laissant au fond de la cavité de la dentine affectée ou infectée ne peuvent de ce fait pas convenir aux plongeurs. Ce tissu affecté, présente une structure déminéralisée, déprotéinée et poreuse, contribuant à diminuer fortement les capacités mécaniques et d'adhérence du tissu par rapport à une dentine saine. La durabilité et la résistance des liaisons entre le matériau d'obturation et un tel tissu ne permettent pas d'assurer une longue pérennité dans un milieu hyperbare (Robichaud et McNally 2005 ; Zadik 2009, 2010 ; Kini et coll., 2015 ; Cabrera et coll., 2017 ; Sikri et coll., 2017).

Lorsque la pulpe dentaire est enflammée réversiblement suite à une barodontalgie, il est possible de placer dans la cavité dentaire une restauration provisoire à base d'oxyde de zinc-eugénol, aux vertus antalgiques pour soulager le patient (Sikri et coll., 2017).

La réalisation de coiffages pulpaire indirects réalisés avec des matériaux à base de silicate de calcium (Biodentine, Pro Root MTA, ...) peut se montrer très utile tout en permettant la mise en place d'une restauration étanche de bonne qualité. Lors de leur prise initiale de cristallisation, ces matériaux sont poreux. Les patients doivent attendre la fin de la prise totale du matériau avant de se retrouver dans une situation de variation de pression environnante. L'hydroxyde de calcium n'est pas un matériau de choix pour la réalisation d'un coiffage indirect chez ces patients. Sa mauvaise adhérence et sa faible étanchéité restent des défauts majeurs incompatibles avec un environnement soumis à des variations de pression atmosphérique. Il est donc préférable d'utiliser un CVI ou un matériau à base de silicate de calcium. Toutefois, ces matériaux ne sont pas indiqués lorsqu'il y a effraction pulpaire car le coiffage direct est contre-indiqué pour ces patients (Cabrera et coll., 2017).

De nombreux auteurs préconisent une utilisation systématique d'un ciment à base de verre ionomère en fond de cavité sous la restauration définitive en technique

sandwich. Ces ciments ont une bonne isolation thermique et électrique, et ont une bonne adaptation marginale car ils adhèrent spontanément au tissu dentaire par une réaction de chélation. Ils compensent la contraction de prise des résines composites et assurent une bonne adhérence aux tissus calcifiés. **C'est donc un matériau candidat idéal pour la restauration de tissus dentaires soumis à des fluctuations de pression environnante** (Cabrera et coll., 2017).

Pour limiter la présence de bulles d'air dans les restaurations il est possible d'utiliser un composite à faible viscosité. Il est également possible de s'équiper d'une instrumentation vibratoire ou de pratiquer un préchauffage des résines composites afin d'aider au fouflage et diminuer ainsi tout risque de création de cavités aériques entre la dent et la restauration. Un délai de 24 à 72 heures devra être respecté entre la mise en place d'une restauration plastique restauratrice et l'exposition à une situation hypo ou hyperbare (Yuce et coll., 2016 ; Cabrera et coll., 2017).

L'amalgame dentaire n'est pas un matériau de choix pour cette patientèle. Il est donc préférable d'utiliser des résines composites. Il est parfois même recommandé dans la littérature de remplacer tous les amalgames dentaires par des restaurations à base de résine composite (Sikri et coll., 2017).

#### 4.1.2. Bonnes pratiques lors des soins endodontiques

S'il y a effraction pulpaire lors d'une éviction carieuse, il est recommandé de réaliser directement un traitement endodontique et l'obturation tridimensionnel étanche (Pathak, 2015). Ce traitement endodontique devra être réalisé à la gutta-percha associé à une technique de condensation afin d'éviter la présence de gaz qui ne pourrait s'échapper occasionnant une fracture. L'obturation à la gutta-percha réalisée via une technique d'obturation chaude est préférable à une technique par condensation latérale froide. Le patient devra respecter un délai de 24h avant toute nouvelle exposition à des variations de pression (Kumar et coll., 2015 ; Yuce et coll., 2016). Radiologiquement, un « apical puff », permettant d'obturer parfaitement le foramen apical, réalisé grâce à un ciment d'obturation à base d'oxyde de zinc est considéré comme critère de qualité (Bruy, 2005).

Un patient traité en urgence pour une pulpe nécrosée ou en état de pulpite irréversible, lors d'une pulpotomie ou pulpectomie, où lorsque le traitement canalaire est réalisé en plusieurs séances, ne pourra pas être soumis à des conditions de variations de pression. Il devra attendre la fin du traitement c'est-à-dire l'obturation radiculaire définitive (Robichaud et McNally, 2005).

Après la réalisation d'un traitement endodontique, la restauration dentaire provisoire devra être foulée minutieusement afin d'éviter la présence de bulles d'air. Le patient doit être éduqué à vérifier l'intégrité de celui-ci avant de s'exposer à des variations de pression (Zadik, 2009a ; Mandke et Garg, 2015).

#### 4.1.3. Bonnes pratiques lors des soins prothétiques

Nous avons vu que la rétention des prothèses dentaires amovibles est diminuée dans de tels environnements. Il est conseillé d'associer à ce type d'appareil la mise en place d'implants dentaires ostéointégrés permettant un meilleur confort pour le patient (Zadik, 2009a). Les prothèses amovibles partielles de petite envergure présentent un fort risque d'inhalation et d'ingestion. Il est préférable de les retirer avant un vol ou une plongée. La littérature rapporte le cas d'un patient décédé par asphyxie après inhalation de sa prothèse amovible de faible étendue au cours d'une plongée (Zadik et Drucker, 2011).

Toute personne soumise à des variations de pression, et bénéficiant de soins de prothèse fixée doit voir ses prothèses scellées avec un ciment à base de résine plutôt qu'un ciment au verre-ionomère ou un ciment à base de phosphate de zinc car ces matériaux présentent une rétention réduite après qu'ils aient été placés en milieu hyperbare. Ainsi les patients devraient être avisés à ne pas être en situation hyperbare lorsqu'ils sont en cours de traitement et qu'ils ont des couronnes provisoires (Robichaud et McNally, 2005 ; Zadik, 2009a ; Gulve et Gulve, 2013).

Afin d'éviter tout risque d'inhalation, les patients et les praticiens doivent savoir qu'il est déconseillé de se présenter dans une situation où il y a un risque de

barotraumatisme lorsqu'ils présentent des restaurations coronaires provisoires ou un ciment temporaire en bouche (Zadik et Drucker, 2011 ; Mandke et Garg, 2015).

Enfin, les cuspides dentaires doivent être restaurées par des soins prothétiques plutôt que par des soins restaurateurs conventionnels (Mandke et Garg, 2015).

#### 4.1.4. Bonnes pratiques lors des soins orthodontiques

Concernant la mise en place des dispositifs orthodontiques, pour le scellement des bagues et des brackets, il est conseillé d'utiliser un ciment à base de verre-ionomère modifié par adjonction de résine (Gulve et coll., 2012).

Il existe une relation entre une malocclusion et le dysfonctionnement de la trompe d'Eustache. Un traitement dentaire orthodontique peut être proposé comme mesure préventive et / ou thérapeutique contre le barotraumatisme otique. Toutefois, ce type de barotraumatisme n'est pas en soi une indication pour un tel traitement (Zadik, 2009a).

#### 4.1.5. Bonnes pratiques lors des soins chirurgicaux

Après extraction dentaire ou toute autre intervention de chirurgie buccale ou parodontale, le patient ne devra pas être soumis à une modification de pression. Il y a un risque d'emphysème, mais aussi de perte du caillot sanguin, car celui-ci peut se dissoudre sous l'effet de la pression, causant des saignements intra-oraux (Zadik, 2009a ; Yuce et coll., 2016 ; Sikri et coll., 2017).

Il est conseillé de respecter un délai où le patient ne devra ni plonger, ni voyager dans une cabine non pressurisée pendant les 24 heures qui suivent un acte dentaire avec anesthésie, et pendant 7 jours après une avulsion dentaire ou tout autre acte chirurgical. Il faut attendre que les processus inflammatoires post-opératoires se résorbent. Ceux-ci sont responsables de la création de mélanges gazeux (Robichaud et McNally, 2005 ; Agrawal et Singh, 2012 ; Kini et coll., 2015 ; Yuce et coll., 2016). Il est également conseillé de laisser un délai de 10 jours après la mise en place d'un

implant dentaire, et 7 à 14 jours après la mise en place d'une membrane (Yuce et coll, 2016).

Lors de la réalisation d'une avulsion d'une prémolaire ou molaire supérieure, le chirurgien-dentiste devra éviter d'être traumatique pour éviter au maximum l'apparition d'une communication bucco-sinusienne, et devra toujours contrôler son absence. Si une communication bucco-sinusienne apparaît après une extraction, il est nécessaire d'intervenir chirurgicalement afin de fermer cette communication et de valider la parfaite cicatrisation (Zadik, 2009a ; Mandke et Garg, 2015).

#### 4.1.6. Outil de diagnostic

Le diagnostic d'un signe barodontalgique n'est pas toujours évident. Pour déterminer la dent causale de manière précise il est possible de reproduire les symptômes de barodontalgie déjà ressentis précédemment par le patient en le plaçant dans un caisson hypobare ou hyperbare. Pour un diagnostic plus aisé, une anesthésie sélective d'une dent suspecte avant le passage dans le caisson, permettra d'écarter ou au contraire de désigner la dent causale. Cette expérience est tout à fait réalisable, mais difficile à mettre en place compte-tenu du matériel nécessaire pour réaliser ce diagnostic. (Boudi et coll., 2017).

La barodontalgie est une science très peu connue des soignants dans le domaine civil, à l'inverse du pôle médical militaire, où les patients à risque de barodontalgie sont informés dès le début des risques encourus par leur pratique. En effet, une étude a révélé que les plongeurs militaires sont pleinement informés par les médecins militaires de l'importance de maintenir une bonne santé bucco-dentaire, notamment en les conseillant d'aller consulter régulièrement leur dentiste et de les informer qu'ils sont plongeurs. Ces plongeurs militaires sont également informés qu'une mauvaise santé bucco-dentaire peut avoir des conséquences néfastes pendant la plongée (Gunepin et coll., 2015).



## 4.2. Recommandations

Nous avons réuni toutes ces recommandations sous la forme d'un petit guide thérapeutique (tableau 4). Celui-ci a été réalisé à partir des données de la littérature qui nous ont permis de rédiger cet ouvrage. Ces recommandations ont été classées en fonction des différentes disciplines de l'Odontologie. Elles regroupent les soins préventifs et curatifs à connaître et à appliquer chez des patients exposés à des variations de pression atmosphérique.

Tableau 4 : Recueil des recommandations importantes à respecter dans les différents domaines de la pratique odontologique pour les personnes soumises à des fluctuations de pression (source : document personnel)

<b>Prévention</b>	<p>Contrôle clinique régulier, annuel ou bi annuel (fréquence définie par le risque) en vérifiant l'état des restaurations présentes, l'absence de lésions carieuses et la vitalité pulpaire.</p> <p>Examen radiologique régulier pour vérifier l'absence de lésion périapicale.</p> <p>Réalisation d'un cliché panoramique tous les 3 à 5 ans.</p> <p>Utilisation de fluorures.</p>
<b>Odontologie conservatrice et traitement endodontique</b>	<p>Soin de toutes les lésions carieuses même si elles sont inactives.</p> <p>Retrait de tous les tissus cariés, sans laisser de dentine ramollie en fond de cavité.</p> <p>Fraisage des tissus sous spray abondant.</p> <p>Utilisation systématique d'un ciment verre ionomère en fond de cavité.</p> <p>Utilisation préférentiel d'un composite <i>flow</i> générant moins de cavités aériques ou utilisation d'une instrumentation préchauffante ou vibratoire lors de la mise en place de résine composite.</p> <p>Respect d'un délai de 24 à 72h après la mise en place d'une restauration définitive ou d'un traitement endodontique.</p> <p>Réalisation d'un coiffage indirect avec un matériau à base de silicate de calcium ; <i>le patient attendra la fin de la prise totale de ce matériau avant une nouvelle exposition à une situation hypo ou hyperbare.</i></p> <p>Contre-indication du coiffage direct, un traitement endodontique doit être réalisé.</p> <p><i>Le patient ne devra pas être exposé à des variations de pression si son traitement endodontique n'est pas terminé (pulpotomie, pulpectomie, phase d'hydroxyde de calcium).</i></p>

	<p>Utilisation d'une technique de condensation à chaud pour le traitement endodontique.</p> <p>L' « <i>apical puff</i> » est un critère de qualité.</p>
<b>Chirurgie orale</b>	<p>Traiter toute source d'inflammation. Un processus inflammatoire est générateur de gaz.</p> <p>Respecter un délai après divers actes avant une nouvelle exposition dans un milieu où la pression est changeante :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 24h après une anesthésie ;</li> <li>- 7 jours après une avulsion dentaire ;</li> <li>- 10 jours après la mise en place d'un implant dentaire ;</li> <li>- 7 à 14 jours après la mise en place d'une membrane.</li> </ul> <p>Après avulsion d'une prémolaire ou molaire maxillaire, vérifier l'absence d'une communication bucco-sinusienne ; si celle-ci est présente, programmer une chirurgie interventionnelle afin de la fermer.</p>
<b>Odontologie prothétique</b>	<p>Mise en place d'implants dentaire afin de stabiliser et d'augmenter la rétention de prothèses amovibles.</p> <p>Retrait de ses prothèses avant une plongée ou un vol si celles-ci présentent un risque d'ingestion ou d'inhalation.</p> <p>Scellement des couronnes à l'aide d'un ciment à base de résine.</p> <p><i>Le patient évitera toute exposition à des variations de pression si il a des couronnes provisoires en bouche.</i></p> <p>Restaurations des cuspidés dentaires par des soins prothétiques plutôt que restaurateurs.</p>
<b>Orthodontie</b>	<p>Scellement des brackets et bagues avec un ciment à base de verre-ionomère modifié par adjonction de résine.</p>

Ces recommandations doivent être connues par les Chirurgiens-dentistes pour permettre à cette patientèle de recevoir des soins compatibles avec leur pratique. Nous avons conçu une petite brochure à leur usage. Elle se présente sous la forme d'un dépliant recto-verso en format A4 dans lequel les praticiens trouveront ces notions en fonction de l'acte odontologique pratiqué sur le patient (chirurgie, endodontie, ...) et les recommandations à respecter (figure 12 et 13).

Nous avons également conçu une petite plaquette d'informations à l'usage des patients à risque ; elle est présentée en format A5 et regroupe des conseils et recommandations à appliquer pour conserver une santé orale optimale et limiter les risques inhérents aux modifications de pression atmosphérique (figure 14 et 15).

Cette plaquette pourra servir de support pédagogique aux praticiens lors de leur enseignement thérapeutique.

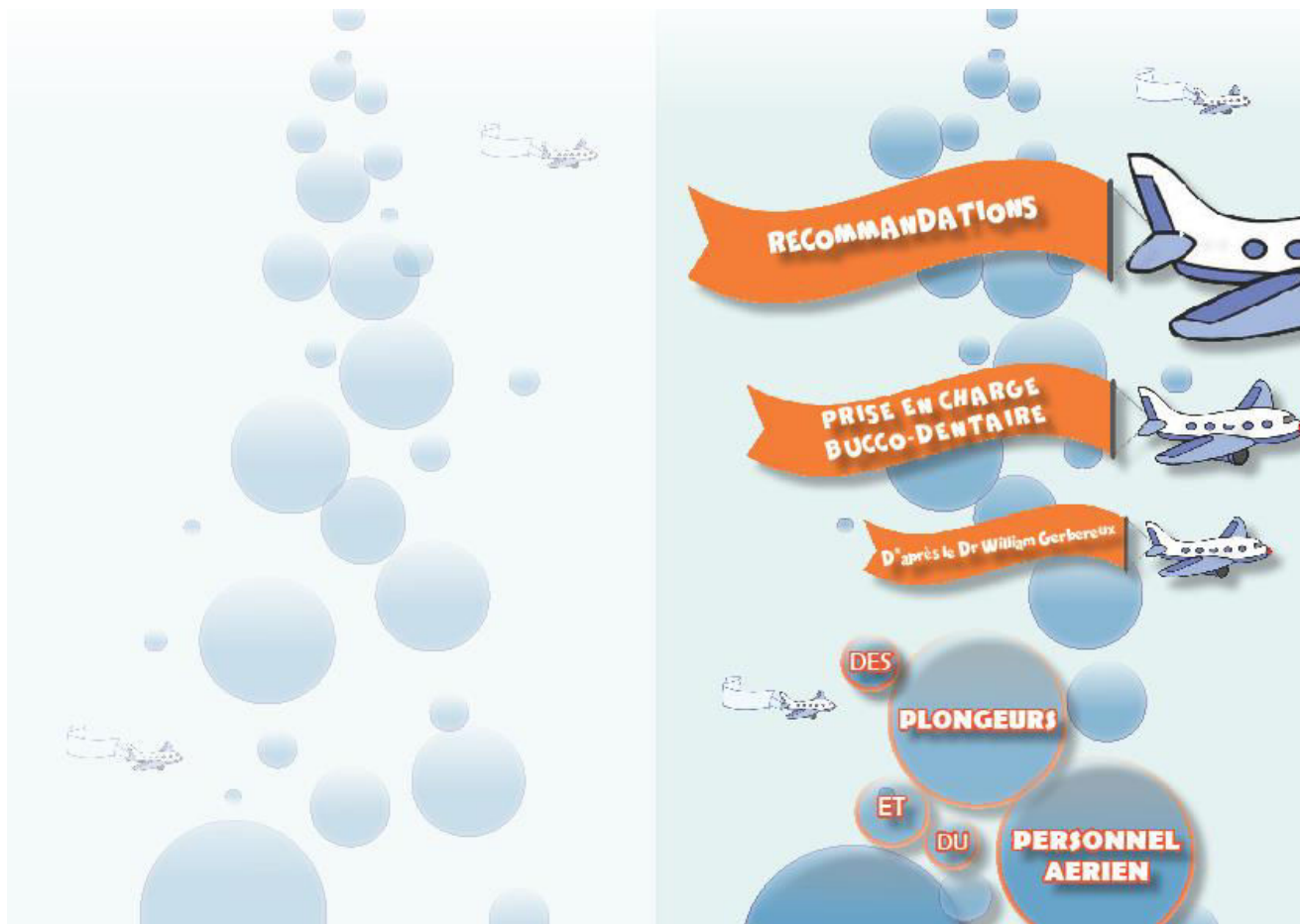


Figure 12 : Face recto du support visuel à destination des Chirurgiens-dentistes  
(source : document personnel)

**PRÉVENTION**

- Effectuer un examen clinique endobuccal 2 fois par an afin de vérifier :
  - L'état des couronnes et des restaurations présentes
  - L'absence ou non de lésions carieuses
  - La vitalité pulpaire
- Procéder à des examens radiologiques réguliers
  - Un cliché panoramique tous les 3 - 5 ans
  - Des clichés radiographiques rétro-alvéolaires en cas de suspicion de lésions périapicales
- Appliquer régulièrement un vernis fluoré

**CHIRURGIE ORALE**

- Traiter toute source d'inflammation, car génératrice de gaz
- Respecter un délai pour certains actes :
  - 24 h après une anesthésie
  - 7 jours après une avulsion dentaire
  - 10 jours après la mise en place d'un implant dentaire
  - 7 à 14 jours après la mise en place d'une membrane
- Vérifier l'absence d'une communication bucco-sinusienne après avulsion d'une prémolaire ou molaire maxillaire, programmation d'une chirurgie en cas de présence

**ODONTOLOGIE CONSERVATRICE**

- Soigner les lésions carieuses
  - Eviction de toute la dentine ramollie
  - Traitement de toutes les caries, actives et inactives
- Respecter certaines pratiques lors des soins
  - Utilisation d'un spray abondant lors des soins
  - Utilisation systématique d'un ciment au verre ionomère (CVI) en fond de cavité
  - Utilisation d'un composite flow générant moins de cavités aériques ou s'équiper d'instrumentation générant du préchauffage/ou vibration lors de la mise en place de résine composite
  - Réalisation des collages indirects avec des matériaux à base de silicate de calcium
- Réaliser les traitements endodontiques
  - Contre-indication du collage direct
  - Obturation canalair à l'aide d'une technique de condensation à chaud
  - Obtention d'un « apical puff »
  - Contre-indication de toute nouvelle mise en condition de variation de pression atmosphérique après le traitement d'une urgence dentaire ou d'un traitement endodontique. Respect d'un délai de 24 à 72 h après un traitement radiculaire

**ODONTOLOGIE PROTHÉTIQUE**

- Préférer les soins prothétiques pour la restauration des cuspidés dentaires
- Sceller les éléments prothétiques à l'aide de ciment à base de résine
- Implants dentaires pour une meilleure stabilité et rétention des prothèses amovibles
- Conseils à donner aux patients :
  - Retrait des prothèses amovibles de petites envergures
  - Pas de plongée ni vol en présence de couronne provisoire

**ORTHODONTIE**

- Sceller les brackets et bagues avec un ciment à base de verre-ionomère modifié par adjonction de résine (CVIMAR)

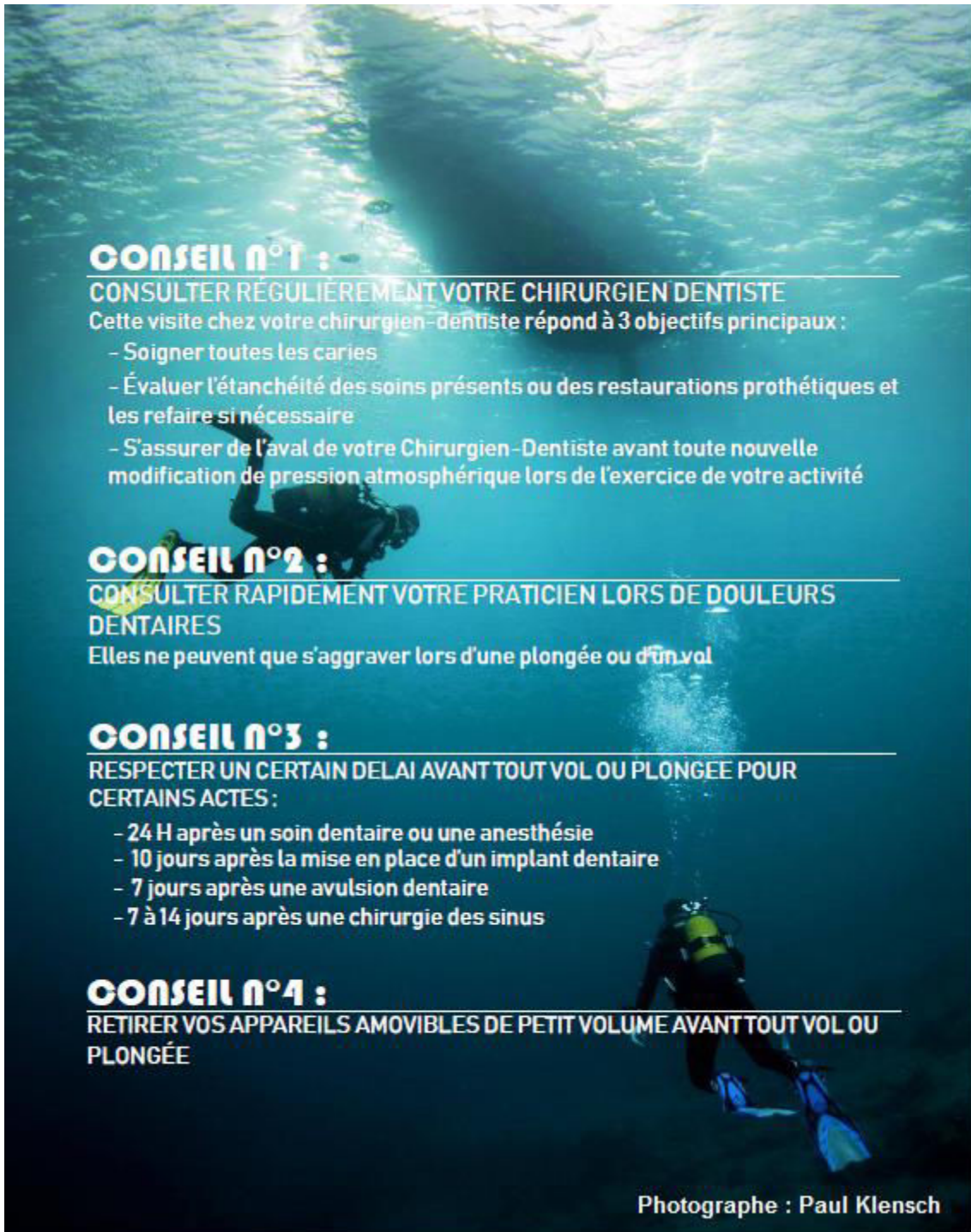
Photographe : Aurélien Beck

Figure 13 : Face verso du support visuel à destination des Chirurgiens-dentistes, cette face présentant les différentes recommandations à respecter en fonction de l'acte odontologique pratiqué sur le patient (source : document personnel)



Figure 14 : Face recto du support visuel à destination des patients (source : document personnel)





**CONSEIL n°1 :**  
**CONSULTER RÉGULIÈREMENT VOTRE CHIRURGIEN DENTISTE**  
Cette visite chez votre chirurgien-dentiste répond à 3 objectifs principaux :

- Soigner toutes les caries
- Évaluer l'étanchéité des soins présents ou des restaurations prothétiques et les refaire si nécessaire
- S'assurer de l'aval de votre Chirurgien-Dentiste avant toute nouvelle modification de pression atmosphérique lors de l'exercice de votre activité

**CONSEIL n°2 :**  
**CONSULTER RAPIDEMENT VOTRE PRATICIEN LORS DE DOULEURS DENTAIRE**  
Elles ne peuvent que s'aggraver lors d'une plongée ou d'un vol

**CONSEIL n°3 :**  
**RESPECTER UN CERTAIN DELAI AVANT TOUT VOL OU PLONGEE POUR CERTAINS ACTES :**

- 24 H après un soin dentaire ou une anesthésie
- 10 jours après la mise en place d'un implant dentaire
- 7 jours après une avulsion dentaire
- 7 à 14 jours après une chirurgie des sinus

**CONSEIL n°4 :**  
**RETIRER VOS APPAREILS AMOVIBLES DE PETIT VOLUME AVANT TOUT VOL OU PLONGÉE**

Photographe : Paul Klensch

Figure 15 : Face verso du support visuel à destination des patients, cette face illustrant les recommandations que le patient doit respecter pour conserver une santé orale optimale en cohérence avec sa pratique (source : document personnel)

### 4.3. Analyse d'un questionnaire

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé deux brochures, l'une d'informations et de conseils pour les patients, l'autre à l'usage des praticiens d'autant plus que notre propre formation initiale dans le domaine nous semblait faible.

Nous avons réalisé un questionnaire dans le but de connaître le niveau de formation des chirurgiens-dentistes sur le sujet ainsi que leurs pratiques et les thérapeutiques qu'ils appliquent à leurs patients exposés régulièrement à des variations de pression. Ce questionnaire a été diffusé dans toute la France grâce au réseau social « Facebook » sur des pages nommées « Dentiste de France » et « *French kiss* », mais également par le biais des conseils de l'ordre des chirurgiens-dentistes départementaux.

Ce questionnaire avait 2 critères de sélection, les personnes y répondant devaient être docteur en Chirurgie dentaire, et leurs diplômes obtenus dans une Université française.

Les deux premières questions servaient à identifier le chirurgien-dentiste par sa formation initiale et toutes les questions étaient à réponse fermée.

Les différentes questions posées étaient les suivantes :

- En quelle année avez-vous été diplômé ?
- Dans quelle faculté avez-vous été formé ?
- Dans votre formation, avez-vous eu des cours en Odontologie du Sport ?
- Les variations de pression atmosphérique sur la santé bucco-dentaire et sa prise en charge, ont-elles été abordées dans votre formation initiale ?
- Avez-vous eu un cours sur la santé bucco-dentaire des plongeurs ?
- Avez-vous eu un cours sur la santé bucco-dentaire des pilotes d'avion ?
- Comment évalueriez-vous vos connaissances dans le domaine (4 possibilités : aucune connaissance, connaissances approximatives, bonnes connaissances, spécialisé dans le domaine) ?
- Avez-vous des plongeurs ou pilotes d'avion dans votre patientèle ?
- Des patients vous ont-ils déjà demandé s'il y avait des répercussions entre leurs pratiques (que ce soit pour leur loisir ou leur travail) et des problèmes dentaires ?

- Avez-vous déjà reçu en consultation un patient qui s'est plaint de douleur ou d'autres symptomatologies possibles (fracture dentaire, retrait d'un soin, descellement d'une couronne...) après une exposition dans un environnement où la pression est fluctuante ? (plongeur, aviateur, ...)
- Pour ces patients : (mettre une croix en regard de l'action que vous réalisez - choix multiples)
  - vous réalisez vos soins comme sur d'autres patients sans précaution particulière
  - vous adaptez vos soins chirurgicaux pour ces patients
  - vous adaptez votre technique d'obturation pour les soins restaurateurs
  - vous adaptez le choix du biomatériau pour vos soins restaurateurs
  - vous adaptez votre technique d'obturation en endodontie
  - Vous adaptez le choix du biomatériau en prothèse conjointe
  - Vous pratiquez un enseignement thérapeutique à ces patients (conseils et risques)
- Pratiquez-vous vous-même un sport induisant des variations de pression atmosphérique ?
- Pensez-vous qu'il serait utile d'avoir plus de connaissances sur ce sujet pour votre pratique quotidienne ?

- Caractérisation de l'échantillon des chirurgiens-dentistes interrogés

420 questionnaires ont été renseignés. Ils ont eu l'avantage de couvrir tout le territoire français puisque les chirurgiens-dentistes qui ont répondu venaient des 16 facultés d'Odontologie françaises (tableau 5), dont 18% des résultats venant de dentistes diplômés de la faculté de Nancy et 40% du Grand-Est. L'échantillon des chirurgiens-dentistes était large en terme d'âge puisque l'année du diplôme variait entre 1970 et 2018 (tableau 6), mais près d'un tiers (29%) des réponses obtenues venait de dentistes diplômés entre 2015 et 2018.



Tableau 5 : Pourcentage de réponses obtenues en fonction de l'Université de formation initiale des Chirurgiens-dentistes ayant répondu au questionnaire (Source : document personnel).

Université	Pourcentage
Nancy	17,9 %
Strasbourg	16,4 %
Lyon	9,5 %
Toulouse	7,6 %
Paris V	7,4 %
Reims	6,7 %
Bordeaux	6 %
Nantes	5,7 %
Lille	5 %
Clermont-Ferrand	3,8 %
Rennes	3,1 %
Aix-Marseille	2,9 %
Montpellier	2,9 %
Paris VII	2,6%
Nice	1,9 %
Brest	0,7%

Tableau 6 : Pourcentage des Chirurgiens-dentistes ayant répondu au questionnaire en fonction de l'expérience professionnelle (source : document personnel).

Expérience professionnelle	Pourcentage
Jeunes diplômés (entre 2015 et 2018)	30 %
10 ans (entre 2005 et 2014)	30 %
20 ans (entre 1995 et 2004)	15 %
Séniors (avant 1994)	25 %

- Formation initiale

24 % des chirurgiens-dentistes de l'échantillon rapportent avoir eu des cours en Odontologie du sport pendant leur formation initiale, mais seulement :

- 23 % d'entre eux ont étudié les risques des variations de pression atmosphérique ;
- 15 % ont étudié la santé bucco-dentaire du plongeur ;
- 4 % seulement ont étudié la santé bucco-dentaire des pilotes d'avion.

- Connaissances

Les chirurgiens-dentistes de l'échantillon ont auto-évalué leurs connaissances dans ce domaine :

- Moins de 1 % sont des spécialistes dans ce domaine ;
- 8 % ont de bonnes connaissances ;
- 54 % ont des connaissances approximatives ;
- 37 % n'ont aucune connaissance sur ce sujet.

Les chirurgiens-dentistes de l'échantillon auraient eu de nouvelles connaissances sur le sujet après leur formation initiale puisque 76 % n'ont jamais eu de connaissance dans ce domaine lors de leur formation initiale (question précédente), mais seulement 37 % de l'échantillon rapportent ne pas avoir de connaissance sur le sujet. Ainsi au cours de leur carrière, les chirurgiens-dentistes ont acquis des compétences spécifiques, certainement par le biais de conférences ou lectures d'articles sur le sujet. Il est dommage que nous n'ayons pas eu d'avantage d'informations sur la formation suivie par les praticiens se reconnaissant spécialistes dans le domaine. Celle-ci pourrait s'acquérir par le biais de certains diplômes universitaires en Odontologie du sport ou encore par le biais de l'armée, leurs chirurgiens-dentistes étant confrontés aux problèmes dentaires des différents personnels largement exposés aux variations de pression.

- Spécificité de la patientèle

Il est normal de se demander s'il y a un réel intérêt d'avoir un enseignement sur les changements de pression atmosphérique au cours de la formation initiale des études

d'Odontologie. C'est pourquoi nous avons interrogé les chirurgiens-dentistes dont les questions portaient sur l'importance et sur la fréquence des cas rencontrés au cours de leur vie professionnelle. Ces questions ont révélé que :

- 69 % des chirurgiens-dentistes déclarent avoir dans leur patientèle des pilotes ou des plongeurs ;
- 78 % rapportent avoir déjà reçu en consultation des patients qui s'intéressaient aux effets des variations de pression atmosphérique sur leur santé bucco-dentaire ;
- 41 % des chirurgiens-dentistes indiquent avoir déjà reçu en urgence un patient dont la cause était due à un changement de pression atmosphérique.

Ces résultats montrent qu'il y a une forte probabilité qu'un praticien soit confronté à une situation dont les connaissances théoriques et pratiques sur le sujet sont indispensables pour une bonne pratique des soins. De plus, les patients concernés par le sujet sont susceptibles de poser des questions aux chirurgiens-dentistes et réclament des conseils lors de leur consultation.

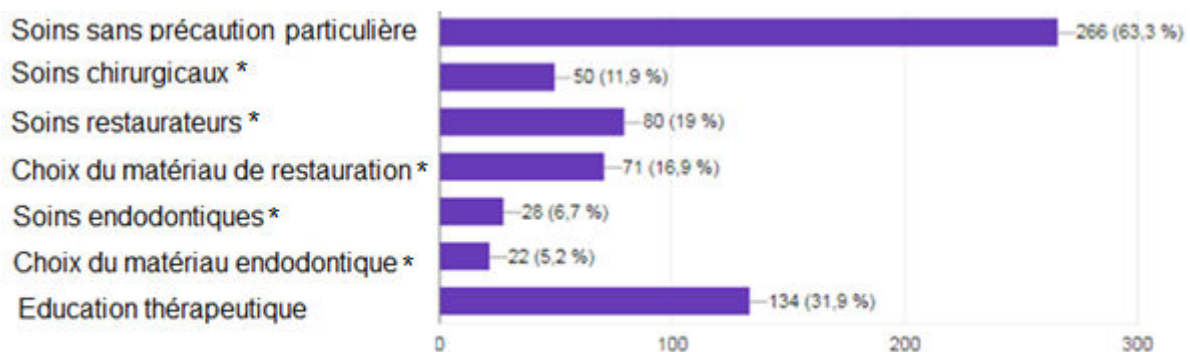
- Spécificité de la pratique Odontologique

Sur les 420 praticiens (figure 16) :

- 266 (soit 63 %) ont déclaré soigner leurs patients soumis à des phénomènes de pression comme tout autre patient ;
- 50 (soit 12 %) adaptent leurs soins chirurgicaux ;
- 80 (soit 19 %) adaptent leurs techniques d'obturation pour les soins restaurateur ;
- 71 (soit 17 %) adaptent le choix du biomatériau pour les soins restaurateurs ;
- 28 (soit 7 %) adaptent leurs techniques d'obturation en endodontie ;
- 22 (soit 5 %) adaptent le choix du biomatériau en prothèse conjointe ;
- 134 (soit 32 %) donnent des conseils particuliers et précis pour ces patients et leurs pratiques.

Sachant que certaines précautions sont à prendre lorsqu'on entreprend des soins chez des patients soumis à des phénomènes de fluctuation de pression, on s'aperçoit dans les résultats que 63 % des praticiens soigneraient cette population de patients à besoin spécifique, sans prendre garde au choix des biomatériaux ou à la

technique utilisée. Ces résultats confirment les lacunes de la formation initiale des chirurgiens-dentistes en France. En effet, trop peu de praticiens semblent être suffisamment formés puisque trop peu prêtent une attention particulière dans leurs pratiques et leurs thérapeutiques. Il semble, toutefois, que pour un tiers d'entre eux, leur niveau de connaissances leur permet d'informer et éduquer les patients aux bonnes pratiques en matière de prévention.



\* Pourcentage de praticiens prenant des précautions pour cet acte pratique

Figure 16 : Diagramme représentant la thérapeutique appliquée par l'échantillon sur une patientèle soumise à des variations de pression (source : document personnel)

- Questions générales sur l'implication du Chirurgien-dentiste

Il est intéressant de noter que 22 % des praticiens ayant répondu au questionnaire, pratiquent un sport induisant des variations de pression atmosphérique. Ainsi, presque un quart de l'échantillon présente un lien privilégié avec le sujet et pourtant, les connaissances dans le domaine des soins curatifs se rapportent à un nombre moins important de chirurgiens-dentistes variant entre 5 et 19% selon le type d'acte réalisé.

Enfin, 89 % de l'échantillon pense qu'il serait utile d'avoir plus de connaissances sur ce sujet pour sa pratique quotidienne. Ce pourcentage montre que les chirurgiens-dentistes de l'échantillon estiment que leur formation initiale est insuffisante, et qu'ils sont conscients de leur manque de compétences spécifiques dans le domaine.

En résumé, ce questionnaire diffusé dans l'ensemble du territoire français montre que :

1. il existe des lacunes théoriques et pratiques dans la formation initiale des chirurgiens-dentistes français quant aux soins prodigués à une patientèle soumise à des modifications de pression,
2. il y a une demande des praticiens pour une meilleure formation sur le sujet afin d'obtenir les principales clés thérapeutiques pour soigner la patientèle dont il est question.

Les traitements prodigués à cette patientèle sont spécifiques. Il est donc important que les soignants connaissent les grandes lignes thérapeutiques à appliquer lorsqu'ils prennent en charge un patient soumis à un environnement de variation de pression.

- Étude spécifique de la ville de Nancy

Ayant été formé à la faculté de chirurgie dentaire de Nancy, nous voulions tester la qualité de notre formation par rapport à la formation française globale par le biais des résultats obtenus par les chirurgiens-dentistes formés dans cette même Université (tableau 8). Ils correspondent à 18 % (75 personnes) de l'échantillon.

Ainsi nous avons pu constater que ces chirurgiens-dentistes :

- Semblent avoir eu plus de cours en Odontologie du sport (31 % par rapport à 24 %), mais moins sur l'implication de la pression atmosphérique sur la santé orale (13 % par rapport à 23 %) et sur la santé des plongeurs (7 % par rapport à 15 %). Leur formation initiale est donc moindre.
- Rapportent avoir moins de connaissances que la moyenne de l'échantillon, puisqu'il y a un plus grand pourcentage de praticiens qui attestent n'avoir aucune connaissance dans le domaine (44 % par rapport à 37 %), et un plus faible pourcentage pour ceux qui estiment avoir des connaissances approximatives (48 % par rapport à 54 %). Ce résultat corrobore le précédent dans le sens où la formation est inférieure à celle des chirurgiens-dentistes français.

- Semblent être moins exposés à une situation où des connaissances sur le sujet peuvent s'avérer utiles car ils sont moins confrontés à ce type de de patientèle (54 % par rapport à 69 %), ont moins été interrogés par leurs patients sur le sujet (67 % par rapport à 78 %), et ont moins été confrontés à une urgence dont la cause est une variation de pression atmosphérique (32 % par rapport à 41%). Ces résultats ne sont pas étonnants dans la mesure où Nancy est dans une région non-côtière.
- Concernant la pratique, les différences entre les résultats nancéens et ceux de l'échantillon total sont similaires avec des variations de pourcentage qui n'excèdent pas 6%.
- Sont eux même plus souvent dans une situation où il y a une modification de la pression atmosphérique car ils sont plus nombreux à pratiquer un sport induisant une modification de la pression atmosphérique comparativement à la moyenne (33 % par rapport à 22%). Ce résultat est étonnant car on s'attendrait alors à des compétences ou connaissances plus importantes que le niveau global de l'échantillon total alors que les résultats vont plutôt dans le sens inverse.
- Présentent également un plus faible désir d'acquérir de nouvelles connaissances sur le sujet (81 % par rapport à 89%).

En somme, il y a bien des différences entre les praticiens formés dans la Faculté de Chirurgie dentaire de Nancy et le reste de l'échantillon. Mais, une nouvelle fois les différences, sont faibles. Il faut savoir qu'un optionnel proposé pour les étudiants, sur la « Santé des Armées » apporte quelques connaissances spécifiques sur le sujet, plus particulièrement sur l'importance d'obtenir une restauration compacte et étanche et d'éviter la formation de bulles. Cependant, cet optionnel étant facultatif, il n'est suivi que par un faible nombre d'étudiants.

Tableau 7 : Comparaison des réponses du questionnaire entre l'Université de Nancy et les réponses totales obtenues (source : document personnel)

Questions	Pourcentage Nancéen	Pourcentage de l'échantillon total
Expérience :		
• Jeunes diplômés (entre 2015 et 2018)	59 %	30 %
• 10 ans d'expérience (entre 2005 et 2014)	13 %	30 %
• 20 ans d'expérience (entre 1995 et 2004)	11 %	15 %
• Séniors (avant 1994)	17 %	25 %
Praticiens ayant eu des cours en Odontologie du sport lors leur formation initiale	31 %	24 %
Praticiens ayant eu des cours sur l'implication de la pression atmosphérique sur la santé orale	13 %	23 %
Praticiens ayant eu des cours sur la santé des plongeurs lors de leur formation initiale	7 %	15 %
Praticiens ayant eu des cours sur la santé des pilotes d'avion lors de leur formation initiale	4 %	4 %
Connaissances des praticiens sur le sujet :		
• Aucune	44 %	37 %
• Connaissances approximatives	48 %	54 %
• Bonnes	7 %	8 %
• Spécialiste	1 %	1 %
Praticiens ayant des plongeurs ou pilotes dans sa patientèle	54 %	69 %
Praticiens ayant déjà reçu en consultation un patient lui posant des questions sur le sujet	67 %	78 %
Praticiens ayant déjà reçu en urgence un patient dont la cause est une variation de pression	32 %	41 %
Pourcentage des praticiens qui * :		
• Réalise ses soins sans précautions particulières	68 %	63 %
• Adapte ses soins chirurgicaux	16 %	12 %
• Adapte le choix sa technique d'obturation pour les soins restaurateurs	13 %	19 %
• Adapte le choix du biomatériau pour les soins restaurateurs	13 %	17 %
• Adapte sa technique d'obturation en endodontie	3 %	7 %
• Adapte le choix du biomatériau en prothèse conjointe	4 %	5 %
• Pratique un enseignement thérapeutique (conseils et risque)	29 %	32 %
Praticiens qui pratiquent un sport induisant une variation de pression atmosphérique	33 %	22 %
Praticiens qui souhaitent avoir plus de connaissances sur le sujet	81 %	89 %

\* La question posée étant une question à choix multiple, il est normal que le total soit supérieur à 100 %.

En résumé, les 420 praticiens de l'échantillon représentent environ 1% de la population de Chirurgiens-dentistes français. L'échantillon est, par conséquent, faible mais il a l'avantage de représenter l'ensemble des régions françaises.

Le constat n'est pas bon. Les chirurgiens-dentistes formés sur notre territoire :

- ont des connaissances initiales insuffisantes sur le sujet
- semblent avoir besoin d'acquérir des compétences dans ce domaine pour leur pratique quotidienne
- ne savent pas, pour la plupart, prendre en charge et adapter leur pratique lorsqu'il soigne un patient soumis à des variations de pression atmosphérique
- ont conscience de leurs lacunes et sont demandeurs d'informations et connaissances dans ce domaine



## **5. LES VARIATIONS DE GRAVITÉ : RÉPERCUSSIONS SUR LE CORPS HUMAIN ET L'APPAREIL MANDUCATEUR**

Un vol spatial place les astronautes dans des conditions d'hypergravité de courte durée puis de microgravité pendant une période qui peut durer plusieurs mois.

Une revue de littérature a permis de faire un recueil des données acquises par la science portant sur les effets qu'exerce la gravité sur le corps humain. Il n'y a que très peu d'études réalisées en hypogravité réelle, la plus grande partie des études effectuées s'appuient sur des simulations de microgravité en laboratoire ou en clinique. La littérature scientifique sélectionnée porte sur des articles faisant une distinction précise entre les effets de la microgravité sur le corps humain et les autres effets possiblement rencontrés lors d'un voyage spatial (apports nutritionnels différents, exercices physiques moindres, effets du rayonnement solaire sur le corps humain, ...). Cette distinction a permis de relever les véritables effets de la gravité sur le corps humain.

Dans l'espace extra-atmosphérique, le corps humain est soumis à un état d'apesanteur ou de microgravité, soit environ un million de fois moins importante que l'attraction gravitationnelle terrestre. Le poids n'agit plus sur le fonctionnement du corps humain dans cet état. Globalement, il en résulte un déplacement des fluides du corps humain vers sa partie supérieure, une perte du contrôle du système musculo-squelettique, et des changements dans les fonctions des systèmes vestibulaires et sensibles.

Le personnel spatial souffre de symptômes divers et variés. Après une mission de longue durée, ces symptômes sont exacerbés et certaines modifications physiologiques ou physiopathologiques nécessitent une période de réadaptation. La symptomatologie dont il est question entraîne des problèmes liés au système locomoteur : outre l'atrophie musculaire, les astronautes souffrent d'ostéoporose, ont des modifications de l'élasticité articulaire, une modification du contrôle neuronal, mais également des troubles moteurs, posturaux et dans la réalisation des mouvements dynamiques, plus particulièrement dans la motricité fine. Ces fragilités, articulaire, musculaire et osseuse, peuvent être handicapantes lors d'un vol de longue durée et en cas de traumatisme, ils peuvent mettre fin à une mission spatiale (Bloomberg et coll., 2016 ; Lacquaniti et coll., 2017).

Des modifications physiologiques et biochimiques s'opèrent dans de pareilles conditions : les plus importantes étant un déséquilibre calcique entraînant une perte osseuse, une atrophie de certains groupes musculaires, une diminution du volume plasmatique et un déconditionnement cardiovasculaire conduisant à l'intolérance orthostatique (Haigneré et coll., 2006).

## **5.1. Effets sur l'appareil locomoteur**

### 5.1.1. Modification des structures osseuses

Les altérations squelettiques survenant lors d'un vol spatial sont bien mieux étudiées aujourd'hui avec la densitométrie à rayon X à double énergie, la tomодensitométrie quantitative à haute résolution et l'étude de modèles murins. Ces technologies permettent de comprendre les changements cellulaires et osseux qui s'effectuent lors d'un voyage spatial où les sujets ne sont pas soumis à la gravité (Vico et Hargens, 2018).

Un vol spatial provoque une grande fragilité osseuse dans certains sites squelettiques et augmente la résorption osseuse. La densité minérale osseuse a été modifiée de manière dramatique au cours de voyages à bord de la station spatiale MIR pour des vols d'une durée de 4,5 et 7 mois (figure 17). Après la mission, on a observé que la densité minérale osseuse de la voûte crânienne (qui correspond aux os frontal, temporaux, pariétaux, et occipital) augmente légèrement, reste inchangée pour les os du thorax, et diminue pour les os de la colonne vertébrale, le col du fémur, et sa partie proximale après la mission. Les détériorations osseuses qui ont été constatées sont 4 fois plus importantes que celles observées dans une étude longitudinale sur 2 ans étudiant des femmes ménopausées atteintes d'ostéopénie (Vico et Hargens, 2018).

La perte de l'intégrité musculo-squelettique est un réel danger pour les astronautes. Lorsqu'ils retrouvent la gravité terrestre, ils sont sujets à des évanouissements, à des chutes, à des blessures après un accident, à des fractures de fragilité rendant la reprise de leurs activités quotidiennes difficile (Vico et Hargens, 2018).

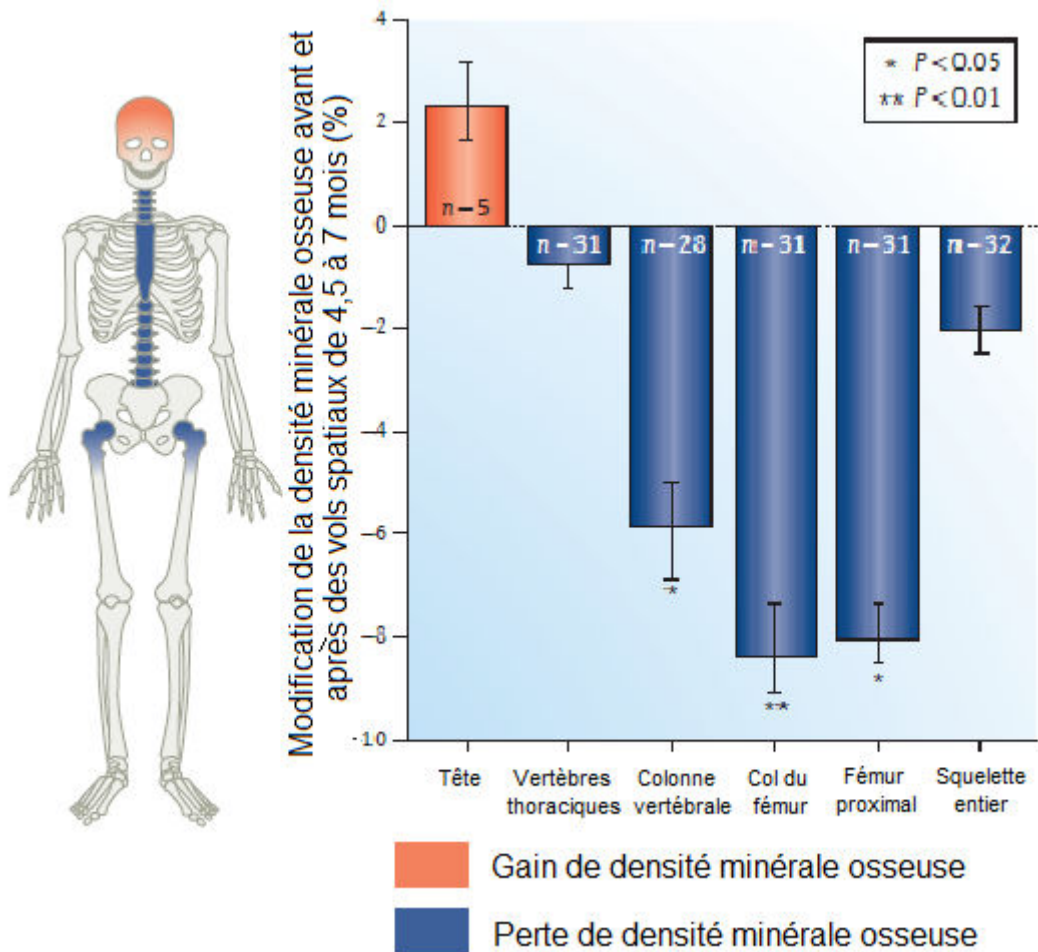


Figure 17 : Schéma représentant l'importance des différentes zones du squelette humain modifiées par une absence de gravité après un vol spatial (source : Vico et Hargens, 2018)

Des biomarqueurs osseux excrétés et circulants ont été dosés sur des échantillons d'urine et de sang des astronautes et cosmonautes. Ces analyses ont permis de constater : 1) que la formation osseuse n'a qu'une tendance à la diminution lorsque les valeurs pré-vol et post-vol sont comparés ; 2) qu'il y a une augmentation de la résorption osseuse pendant un vol, malgré une bonne alimentation et une activité physique active. Le seul cas d'absence de résorption osseuse après un vol spatial, est celui d'un astronaute placé sous traitement bisphosphonate alendronate (traitement anti-résorptif osseux) en plus de son parfait mode de vie. De plus, la perte de densité osseuse peut se poursuivre après l'atterrissage, sans doute dû à la mort des ostéocytes (Vico et Hargens, 2018).

Le calcium et le phosphate diminuent respectivement de 0,2% et 0,7% par rapport aux quantités corporelles totales estimées. Des systèmes physiologiques critiques sont alors activés pour protéger le corps face à l'excès de calcium libre dans le sang conduisant à une hypercalciurie également observée lors des missions spatiales à court terme. Cette hypercalciurie augmente le risque de développer des calculs rénaux au cours du vol spatial (Vico et Hargens, 2018).

Des activités physiques et d'autres interventions (autrement appelés contre-mesure) permettant de réduire la perte osseuse. Elles correspondent à des exercices physiques de résistance et d'anaérobie conçus spécifiquement pour le personnel, mais elles sont insuffisantes pour lutter totalement contre la résorption osseuse en situation de microgravité (Vico et Hargens, 2018).

Deux équipes de cosmonautes russes ont passé respectivement 1 et 6 mois dans la station spatiale MIR. On a observé une suppression de la formation osseuse après les deux missions, avec une plus grande perte d'os trabéculaire et cortical visible dans le tibia. Passé six mois, cette constatation était la même pour l'os trabéculaire mais pas pour l'os cortical. Aucun changement n'était visible dans le radius distal. Les auteurs ont conclu que **les os porteurs inférieurs sont plus sensibles que les os non porteurs en terme de perte osseuse induite par le vol spatial**. Pour citer Wolff Julius, « ***c'est le stress mécanique qui détermine la forme et la fonction osseuse*** » (Haignéré et coll., 2006).

Par ailleurs, on a observé une augmentation du taux de cortisol, hormone connue pour son rôle dans la formation osseuse. En effet dans les vols où une ostéopénie a été mesurée, les membres d'équipage ayant subi d'importantes pertes de calcium présentaient également une augmentation de cortisol urinaire durant toute la période de vol. Des études ont prouvé que de telles quantités de glucocorticoïdes inhibaient la croissance de cellules ostéoblastiques, et les ostéoblastes quiescents étaient plus lents à entrer dans le cycle cellulaire en microgravité. Ainsi, cette étude renforce le concept selon lequel une force de gravité diminuée peut être une cause significative de perte osseuse dans l'espace (Haignéré et coll., 2006). De plus, cette hormone favorise la dégradation des graisses dans les tissus musculaires et adipeux,

permettant ainsi de procurer au foie, le glycérol nécessaire à la néoglucogenèse. Des études réalisées sur des souris ayant subi un vol spatial ont démontré que les niveaux de glycérol du foie, de la peau et des glandes surrénales étaient largement supérieurs à un groupe de souris témoin. Cette étude affirme le rôle joué par les glucocorticoïdes dans le métabolisme osseux (Pecaut et coll., 2017).

L'absence d'un état de gravité peut directement agir sur la différenciation cellulaire des cellules souches mésenchymateuses (CSM). Ces cellules ont normalement la capacité de pouvoir se différencier en une lignée de cellules ostéogéniques. Pendant les vols spatiaux, la différenciation ostéogénique des CSM est inhibée, et s'oriente vers une différenciation adipogénique, et ce, même dans des conditions d'induction ostéogénique. Ainsi l'expression des gènes des cellules souches mésenchymateuses va induire une adipogenèse plutôt qu'une ostéogenèse. En revanche, la différenciation du cartilage reste inchangée (Zhang et coll., 2018).

Très peu d'études rapportent des résultats sur le massif osseux craniofacial (Vico et Hargens, 2018), mais il semblerait qu'il ne soit pas épargné. Une étude sur des poissons médaka, après un séjour de 56 jours dans la station spatiale internationale, a montré que la densité minérale osseuse de la région pharyngée et des dents de ces poissons avait diminué. Les ostéoclastes étaient activés, alors que les ostéoblastes semblaient avoir une activité et un nombre moindre. La gravité est considérée comme un facteur-clé dans la construction tissulaire et le remodelage osseux. Les ostéoclastes deviennent matures par fusion cellulaire, et il a été prouvé que la multi-nucléation est augmentée en microgravité. De plus, dans ces ostéoclastes hyper-actifs, une biogenèse mitochondriale accrue est visible. L'ATP présent dans les mitochondries des ostéoclastes régule la survie de ces cellules et la résorption osseuse (Chatani et coll., 2015).

L'activité ostéoclastique est donc augmentée dans un état de microgravité, mais les niveaux d'expression de RANK-L et de NFATc1 restent inchangés. Il semblerait donc que l'augmentation d'activité ostéoclastique ne se faisait pas par le biais du support des ostéoblastes mais plutôt par une réaction mitochondriale. La différenciation ostéoclastique reste également inchangée. Ainsi, la densité minérale osseuse des

astronautes diminue dans des sites de remodelage locaux régulés par les ostéoclastes, et par des mécanismes différents de ceux habituellement retrouvés dans l'atmosphère (Chatani et coll., 2015).

La perte accélérée de densité osseuse observée lors de vols spatiaux prolongés (de 6 à 4 mois), a pris le nom « d'**ostéoporose spatiale** ». Cette pathologie résulte d'une diminution de l'absorption du calcium qui se traduit par une augmentation d'excrétion urinaire du calcium. Il est conseillé d'adopter une alimentation riche en calcium associée à la prise d'un supplément de vitamine D (Haigneré et coll., 2006).

Un cas d'implants dentaires a été rapporté dans la littérature (Haigneré et coll., 2006) : il concernait un Français en parfaite santé générale et bucco-dentaire. Ce patient a participé à une mission spatiale pendant 189 jours. Les modifications péri-implantaires de ce dispositif médical ont été étudiées après le vol, et après une période de récupération, c'est-à-dire 6 mois après la fin du vol

Cet implant dentaire a été mis en place pour remplacer la dent numéro 46, 15 mois avant le début du vol spatial. La hauteur osseuse a été enregistrée grâce à des clichés radiographiques obtenus à l'aide d'un porte-film spécifique au patient fabriqué dans un bloc de morsure de résine acrylique permettant de normaliser les clichés ; la distance entre un point de référence R sur l'implant (la jonction pilier-implant) et le niveau osseux marginal a été mesurée au moyen d'un photomicroscope à un grossissement de 13,5 et d'une échelle de calibration. La hauteur osseuse péri-implantaire en 46 a été comparée à la hauteur péri-dentaire de la dent numéro 36 sur ce même patient (dent couronnée et dévitalisée). Ces mesures ont été effectuées trois fois, un mois avant le vol, un mois après, et huit mois après (Haigneré et coll., 2006).

L'étude a montré un gain osseux en mésial de l'implant de 0.43mm et une perte osseuse de 0.31mm en distal. Les changements observés dans la hauteur de l'os péri-implantaire étaient dans les limites normales comparativement aux mesures obtenues sur la dent 36. Ainsi, les taux osseux péri-implantaires sont restés stables après 6 mois en microgravité, et l'implant n'a présenté aucune altération fonctionnelle ni structurale, sans complications.

**Ainsi les auteurs ont pu conclure qu'aucune différence significative de niveau osseux n'a été mise en évidence entre la dent implantée (46) et son homologue controlatérale dévitalisée (36) (Haignéré et coll., 2006).**

Il est reconnu que la principale cause du remodelage osseux est la charge mécanique. La condition d'hypergravité présente, par conséquent, de nombreux avantages sur la structure osseuse car elle joue sur la fabrication et le maintien de la matrice extracellulaire osseuse (MEC). On a observé une augmentation de la biosynthèse totale du collagène dans les cellules ostéoblastiques. En effet, on a observé dans ces cellules une augmentation de la réticulation du collagène I, grâce à l'activation de la transcription de l'enzyme traitant le collagène (la lysyl-hydroxylase 2). La transcription de la lysyl-oxydase est également augmentée, ce qui permet d'améliorer la stabilité du collagène (Genchi et coll., 2016).

Une ostéo-différenciation a également pu être observée dans les cellules souches mises en situation d'hypergravité, ainsi qu'une amélioration de la minéralisation de la MEC par augmentation de la superficie des dépôts de calcium (Genchi et coll., 2016).

Ces données démontrent des effets largement positifs sur le tissu osseux, tant sur la constitution que sur le renouvellement cellulaire. D'autres études sont en cours, car les effets bénéfiques de l'hypergravité pourraient révolutionner les traitements des maladies osseuses. Elle pourrait être utilisée pour stimuler la construction tissulaire osseuse, dans les cas de fracture ou d'ostéoporose par exemple (Genchi et coll., 2016).

#### 5.1.2. Modification des structures musculaires

**En situation d'hypogravité** pendant un vol spatial, une atrophie musculaire rapide peut être observée, accompagnée de modifications de la fonction musculaire. Ces changements touchent particulièrement les muscles posturaux antigravitaires (Vico et Hargens, 2018). De façon générale, avec ou sans contre-mesure, la diminution des performances musculaires est plus importante dans le bas du corps plutôt que dans sa partie haute (Gambara et coll., 2017 ; Mulavara et coll., 2018).

Par ailleurs, les muscles de l'épaule, le deltoïde, le supra-épineux et l'infra-épineux, ont été étudiés lors de vols spatiaux à court et long terme. Cette étude a permis de mettre en évidence le fait que le deltoïde (muscle qui génère le mouvement de l'épaule), est plus sensible à la microgravité que les muscles supra-épineux et infra-épineux (muscles stabilisateurs des articulations). Plus le vol spatial est long, et plus la diminution des performances musculaire est marquée. Ces résultats permettent de conclure que les effets de la microgravité sur le muscle squelettique sont dépendants de sa fonction (Shen et coll., 2017).

Deux muscles, masseter et tibial antérieur, ont été étudiés chez des souris soumises à la gravité, un des groupes considéré comme témoin restant au sol, et l'autre groupe effectuant un vol spatial de 13 jours dans la navette spatiale « Space Transportation System-135 » (Philippou et coll., 2015).

La masse musculaire et la distribution de la taille des fibres du muscle masséter n'ont pas été affectées par la microgravité contrairement à celles du muscle tibial antérieur. Les voies de signalisation liées à la charge ont également été étudiées en examinant le niveau de phosphorylation de protéines spécifiques comme FAK (*focal adhesion kinase*) et Akt associées aux voies de détection de la charge et de croissance musculaire. La phosphorylation de FAK affecte son association avec d'autres protéines de signalisation, conduisant à l'activation de la voie Ras-Raf-MEK-ERK, et de la voie phosphatidylinositol 3-kinase-Akt. FAK intervient alors pour favoriser la survie des cellules musculaires et la maintenance de la masse musculaire. Les souris ayant navigué dans la navette spatiale ont montré que le muscle masséter avait un fort taux de protéines de signalisation actives par rapport à celui du muscle tibial antérieur, mais aucune différence intergroupe n'était significative (Philippou et coll., 2015).

En ce qui concerne la force et la vitesse maximale de contraction des fibres musculaires, permettant d'analyser la puissance musculaire, il a été démontré que la puissance avait diminué de 40 à 80% pour le groupe des souris ayant subi le vol spatial (Philippou et coll., 2015).

Les gènes atrogin1 exprimés pour lutter contre l'atrophie musculaire et Murf1 permettant le métabolisme énergétique musculaire et la synthèse des protéines ainsi



que les facteurs pro- et anti-croissance Igf1 et Mstn, mesurés dans le muscle masséter, n'ont montré aucune différence d'expression entre le groupe contrôle et le groupe des souris soumises à l'hypogravité lors du vol spatial (Philippou et coll., 2015).

On peut conclure que le seul paramètre véritablement modifié pour le masséter après avoir subi une absence de gravité de 13 jours est sa puissance de contraction alors que le muscle tibial antérieur, muscle antigravitaire, a vu tous ses autres paramètres modifiés. Les muscles les plus affectés lors d'un vol spatial sont donc ceux qui luttent normalement contre l'attraction terrestre (Philippou et coll., 2015).

**En situation d'hypergravité**, une augmentation de la prolifération cellulaire est observée (jusqu'à 3,5 fois supérieure à la normale), mais également un épaissement des filaments d'actine et de myosine. L'ensemble des résultats obtenus sur l'incidence de l'hypergravité sur le tissu musculaire semble provoquer des modifications sur les muscles squelettiques en produisant préférentiellement des fibres lentes. Ces données sont intéressantes pour un avenir thérapeutique proche pour les pathologies musculaires ayant pour origine un déficit en protéines contractiles, dans la sarcopénie liée au vieillissement ou encore dans les traumatismes médullaires (Genchi et coll., 2016).

L'influence d'une exposition précoce (du onzième jour de gestation au septième jour après la naissance) à l'hypergravité (1,8 g) sur l'expression des chaînes lourdes de myosine dans les muscles cervicaux, les muscles masticateurs et le diaphragme de modèles murins a été étudiée. Les résultats ont indiqué que l'hypergravité modifie les caractéristiques biochimiques des muscles anti-gravitaires, mais aussi des muscles respiratoires et masticateurs. En effet, les chaînes lourdes de myosine présentaient une augmentation de leur vitesse de raccourcissement. Les auteurs en concluent que **les muscles présentent des capacités d'adaptation dans un milieu où les forces gravitationnelles sont accrues** (Martrette et coll., 1998).

### 5.1.3. Modifications des structures articulaires

Les tissus cartilagineux, en particulier les disques intervertébraux, perdent leur structure et leur fonction dans l'espace. Un déconditionnement des disques intervertébraux et des muscles spinaux est visible pendant un vol spatial. En effet, l'état de microgravité réduit ou supprime la compression spinale et le cycle de chargement diurne de la colonne vertébrale. En effet, en situation de microgravité, la compression spinale est réduite car la colonne vertébrale se retrouve plus droite et plus raide, et les cycles de chargement de la colonne sont supprimés engendrant un arrêt des transports par convection des nutriments entre les capillaires, les plateaux vertébraux adjacents et les cellules du noyau, ces perturbations induisant une réorganisation du cytosquelette et une diminution de la production et de la minéralisation de la matrice extracellulaire. Elles présentent un risque important de blessure, plus particulièrement d'hernie discale, au retour sur terre avec une exposition à la force gravitationnelle. Il a été prouvé qu'une exposition prolongée à la microgravité entraîne une perte de protéoglycanes du cartilage. Des contre-mesures efficaces ayant pour but d'activer les muscles stabilisateurs ont une importance capitale pour faciliter la réadaptation à la gravité à l'atterrissage (Fitzgerald, 2017 ; Vico et Hargens, 2018).

## 5.2. Effets sur le métabolisme et sur le système immunitaire

En état de microgravité, on décèle un dysfonctionnement tissulaire, des dommages oxydatifs et une perturbation de la fonction immunitaire (Tahimic et Globus, 2017). Toutefois, il reste très difficile d'analyser les changements métaboliques qui s'opèrent dans l'espace qui ont pour unique cause la gravité. En effet, le stress psychologique de l'équipage, les changements d'apports énergétiques, ... sont autant de facteurs qui peuvent également influencer le métabolisme cellulaire. Il est donc difficile de pouvoir dissocier tous ces facteurs et connaître leur part de responsabilité dans la modification d'une réponse biologique et d'identifier avec précision quelles sont les répercussions uniquement imputables à l'état microgravitaire (Pecaut et coll., 2017).

L'hypergravité a des effets sur le système immunitaire chez le modèle murin, elle déclenche les voies métaboliques impliquées dans l'activation cellulaire, dans la sécrétion de cytokines, et augmente l'expression des récepteurs de facteur de croissance et des molécules immunorégulatrices. Chez l'homme, cette hypergravité inhibe la migration des neutrophiles humains (Genchi et coll., 2016).

Les conséquences de l'hypergravité sur le système immunitaire restent controversées, cependant, elle peut présenter une potentielle future approche thérapeutique dans la lutte des infections (Genchi et coll., 2016).

### **5.3. Effets sur le système vasculaire**

Durant le vol spatial, on constate de nombreuses perturbations vasculaires et immunitaires. La perfusion tissulaire est le processus physiologique permettant d'alimenter un organe en oxygène et en nutriments. Dans une situation de microgravité, les gradients hydrostatiques sont perturbés. La modification de diffusion des fluides peut provoquer un œdème facial, un engorgement des veines cervicales externes, une congestion nasale et peut causer un traumatisme facial. Ce désordre de circulation des fluides peut avoir des conséquences sur l'appareil musculo-squelettique, car la perfusion tissulaire est complètement perturbée (Vico et Hargens, 2018).

Après le retour sur terre, la diminution du volume plasmatique est compensée par une augmentation de la fréquence cardiaque permettant de maintenir une tension artérielle correcte. Ceci arrive aussi bien au cours d'un vol court que d'un vol long. Cette modification du volume plasmatique correspond à une diminution d'environ 7 à 20% du volume plasmatique normal. Elle peut aussi entraîner une réduction des capacités anaérobiques provoquant des modifications de l'absorption d'oxygène ; ainsi, les performances diminuent. Le retour à un volume plasmatique normal n'apparaît qu'après 3 jours de reconditionnement dans une situation gravitationnelle terrestre (Mulavara et coll., 2018).

L'intolérance orthostatique qui correspond à une augmentation anormale de la fréquence cardiaque après le passage d'une position allongée à une position verticale peut présenter différents symptômes allant d'une fréquence cardiaque accrue à un état pré-syncopal en position verticale. Cette intolérance serait causée par une atrophie cardiaque possiblement imputable aux modifications de perfusion tissulaire causées par l'état microgravitaire (Mulavara et coll., 2018).

La pression intracrânienne et le contenu intracrânien ne sont pas affectés par la microgravité. Cependant, elle agit sur l'ensemble du système veineux. L'absence de gravité provoque une perte de la pression hydrostatique dans le corps humain induisant une accumulation veineuse dans la tête et le cou, entraînant une augmentation de pression veineuse thoracique et abdominale. Il y a donc une augmentation du débit sanguin cérébral qui est largement supérieur à ses capacités de retour veineux. Ceci peut entraîner des changements dans les disques optiques et dans la vision périphérique (Hinkelbein et coll., 2018 ; Swinney et Allison, 2018).

#### **5.4. Effets sur le système nerveux**

Après un vol spatial, ou après des études en microgravité simulée, des altérations fonctionnelles et morphologiques du système nerveux sont constatées. Celles-ci induisent une perturbation de l'orientation spatiale, de l'équilibre statique et dynamique, des changements vestibulaires, et une diminution des capacités de motricité fine. Ces troubles sont la conséquence d'un « **syndrome d'adaptation spatiale** ». Certaines régions du cervelet, des régions sensori-motrices corticales et somato-sensorielles ainsi que les voies vestibulaires sont concernées dans l'adaptation à la microgravité (Mulavara et coll., 2018 ; Vico et Hargens, 2018).

De plus, lorsque le corps humain est exposé à la microgravité durant une longue durée, la substance blanche périventriculaire est augmentée. Pour rappel, la substance blanche est une zone permettant le transfert des informations dans le système nerveux. Cette augmentation est liée à un accroissement de la quantité du liquide céphalorachidien ventriculaire, et ne modifiant en rien les capacités intellectuelles de l'individu. En revanche il n'y a aucune augmentation ni changement au niveau de la substance blanche profonde (Alperin et coll., 2017).

Des études ont permis d'analyser les effets de l'hypergravité sur le système nerveux. Il a été observé que l'hypergravité active le système vestibulaire, et influence la plasticité synaptique de l'hippocampe en induisant sa potentialisation à long terme en affectant la mémoire chez le modèle murin. Sur des études in-vitro, l'hypergravité accélère la différenciation de cellules précurseurs en neurones et augmente l'extension des neurites. Chez l'homme, l'hypergravité provoque une augmentation de l'activité électroencéphalographique (EEG) à des fréquences plus élevées, entraînant une perte de conscience (Genchi et coll., 2016).

## **5.5. Effets sur les structures de la cavité buccale**

### **5.5.1. Effets les tissus parodontaux**

En 1977, des chercheurs ont étudié les taux de protéines spécifiques et d'électrolytes salivaires avant et après chaque mission spatiale sur 18 astronautes. Les résultats ont montré des modifications relativement minimes, mais sans changement dans les concentrations de calcium, potassium, phosphate, chlore, albumine ou immunoglobulines G (IgG). En revanche, les concentrations de sodium, lysozymes salivaires, magnésium et immunoglobulines A (IgA) avaient augmenté, tout particulièrement celle des IgA. Le débit salivaire était également augmenté.

Il est compliqué d'affirmer avec certitude que c'est l'état de gravité qui était à l'origine de ces phénomènes. Un stress émotionnel, la toxicité des médicaments, l'irradiation, les apports alimentaires différents sont autant de facteurs pouvant engendrer ces modifications, et par conséquent, ils doivent aussi être pris en compte. Le taux augmenté d'IgA pourrait également s'expliquer par une infection, où les agents infectieux auraient pu se transmettre entre les différents membres de l'équipage (Brown et coll., 1977).

L'état de microgravité est également associé à une augmentation des dommages peroxydatifs, et les effets de la microgravité sur le corps peuvent perdurer plusieurs semaines après l'atterrissage. L'état parodontal, salivaire, oxydant et antioxydant ont été étudiés sur vingt volontaires dans une situation de microgravité simulée pendant 60 jours. Une diminution significative des taux sériques et salivaires en vitamine C et E, ainsi qu'une augmentation des taux de MDA (malondialdéhyde) et 8-OHdG (8-oxo-7,8 dihydro-2 deoxyguanosine) qui sont des marqueurs oxydatifs étaient

observés. En revanche, la profondeur des poches et la perte d'attache étaient augmentées mais pas de façon significative. Il est possible de conclure que le stress oxydatif augmente dans un environnement de microgravité mais il n'a pas d'incidence significative sur les paramètres parodontaux passé 2 mois. Ces résultats ne peuvent pas être considérés comme ayant une grande pertinence clinique car les patients étaient physiquement inactifs pendant toute la durée de l'étude. Un échantillon plus grand et un suivi plus long seraient nécessaires pour vérifier la relation entre l'état pro-oxydant de la microgravité spatiale et la santé parodontale (Rai et coll., 2011).

En microgravité, il a été démontré qu'il n'y avait pas de modification des acini séreux ou muqueux dans les glandes sublinguales : la sécrétion des mucines (protéines sécrétées par les glandes sub-linguales) semblent être moindre, mais pas de manière significative. Pour rappel les mucines permettent un maintien de la santé bucco-dentaire en protégeant les tissus buccaux, par la lubrification, et par son action antibactérienne. À l'inverse, une apoptose et une autophagie des cellules acineuses et séreuses de la parotide ont été mise en évidence. Cette glande présente une moins grande activité d'excrétion des protéines salivaires en situation de microgravité (Dagdeviren et coll., 2018).

Les tissus parodontaux sont amplement sensibles dans une situation de microgravité. En effet l'os alvéolaire présente une résorption accrue par l'activation des ostéoclastes, entraînant une augmentation de la concentration de calcium dans la salive. Les sels de calcium (à savoir l'oxalate de calcium et le phosphate de calcium) vont se précipiter, pouvant être responsable de calculs salivaires (Goyal et coll., 2015).

#### 5.5.2. Effets sur les tissus dentaires

Une étude s'est intéressée à la minéralisation et au développement des dents : deux groupes de souris ont été comparés, un groupe témoin restant sur terre et un groupe placé en situation de microgravité lors d'un séjour spatial durant 13 jours. Les chercheurs ont constaté que la longueur des incisives des souris soumises à la microgravité était plus grande comparativement à celles des souris du groupe

témoin, avec une plus forte minéralisation de l'émail et de la dentine. Les chercheurs ont conclu que **la microgravité a des effets mesurables sur la physiologie, le développement et la minéralisation des incisives** (Dagdeviren et coll., 2018).

Cependant, il s'agit de dents à croissance continue et il n'est pas prouvé que ce phénomène tissulaire de minéralisation existe sur les dents humaines.

Les astronautes ont une plus importante incidence du risque de carie dentaire, et ce pour plusieurs raisons (Goyal et coll., 2015) :

- La quantité de salive : **En microgravité, il y a une diminution du débit salivaire.** Cette information a été significativement prouvée par une expérience en microgravité simulée.
- La dynamique salivaire : **La salive présente en bouche est en quantité plus importante sur l'arcade inférieure que sur l'arcade supérieure.** Ainsi les dents mandibulaires bénéficieraient d'une meilleure protection que les dents maxillaires.
- La virulence bactérienne : des chercheurs ont cultivé des groupes bactériens, notamment les *Streptocoques mutans* (*S. mutans*), en situation de microgravité et les ont comparés à des cultures en situation de gravité terrestre dans les mêmes conditions. **Les *S. mutans* étaient plus résistants lors d'une microgravité.**

Une autre étude a mise en évidence une plus grande concentration bactérienne sur des sujets en situation de microgravité ; elle serait due à une prolifération bactérienne plus rapide.

Enfin, les articulations temporo-mandibulaires sont régulièrement source de douleur chez les astronautes, probablement imputable au stress causant des problèmes dentaires et des douleurs oro-faciales. Des plans de libération occlusale pourraient être une solution pour diminuer l'hyperactivité des muscles masticateurs et réduire ces douleurs myo-faciales et temporo-mandibulaires (Häuplik-Meusburger et coll., 2016).

### 5.5.3. La dentisterie aéronautique

L'évolution des technologies tend de plus en plus à s'orienter vers la multiplication des voyages spatiaux au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. En 1966, l'armée de l'air assigne le major William Frome, chirurgien-dentiste à la NASA pour assurer la santé buccodentaire des astronautes.

L'incidence de la gravité sur la cavité orale n'épargne aucun tissu, la prévention est donc d'une importance cruciale. Cependant, malgré une prévention stricte, une urgence dentaire peut survenir. D'autant plus que les vols spatiaux prévoient d'être de plus en plus long, car ils iront de plus en plus loin, certains suggèrent même d'habiter sur mars. L'urgence peut avoir pour origine une lésion carieuse, ou faire suite à un traumatisme. En effet, étant dans un milieu sans poids, les forces induites par la masse ou la vitesse des objets en mouvement peuvent causer un traumatisme facial. Contrairement aux missions en orbite terrestre basse, les missions spatiales de longue distance ne permettent pas de pouvoir évacuer un membre de l'équipage, et ce quelle que soit la raison. Les astronautes doivent savoir faire face à une telle situation d'urgence bucco-dentaire, ceci requiert un équipement spécialisé ainsi que des connaissances théoriques et pratiques. Cependant, les études analysant les conséquences de la gravité sur les tissus buccaux-dentaires restent faibles. D'autres recherches sont nécessaires pour pouvoir anticiper les effets de la gravité sur le corps humain (Rai et coll., 2011 ; Rai et Kaur, 2011 ; Goyal et coll., 2015 ; Häuplik-Meusburger et coll., 2016). Par ailleurs, les astronautes sont également soumis à des variations de pression atmosphérique et les recommandations décrites précédemment dans cet ouvrage sont à appliquer pour ces professionnels aérospatiaux.

Devant un tel constat, le terme de **dentisterie aéronautique** est inventé en 2007 par Balwant Rai. S'associant à Jasdeep Kaur, ils étudient tous deux pour la première fois en 2009, les effets de la microgravité sur la cavité orale. En 2010, ils proposent le premier cours de dentisterie aéronautique à l'Université spatiale de Kepler (Rai et Kaur, 2011).



Des urgences dentaires lors d'un voyage spatial sont rarement rapportées dans la littérature, mais quelques cas existent de douleurs, descellements de couronne ou d'obturation, et lésions carieuses. En 1978, lors de la mission soviétique Salyut 6 de 96 jours, un cosmonaute russe, Yuri Romanenko a vécu pendant 2 semaines avec des douleurs dentaires invalidantes. Il avait gardé pour lui des sensibilités déjà présentes lors du contrôle au sol. Sur place, il n'y avait aucun moyen de soulager ses maux car le programme soviétique n'avait aucun plan d'urgence dentaire. Les seuls conseils qui lui ont été donnés étaient de « *prendre du bain de bouche et de garder sa dent au chaud* », il a également pris des antalgiques en surdose (Häuplik-Meusburger et coll., 2016). Pour éviter une nouvelle situation délicate potentiellement handicapante lors d'une mission, un programme de prévention a été instauré pour ces patients. Tous les astronautes doivent se soumettre à un dépistage bucco-dentaire annuel. Un examen oral approfondi est programmé, et selon leur état bucco-dentaire, les astronautes sont classés en 3 catégories (Goyal et coll., 2015) :

- Astronautes de classe I : en bonne santé bucco-dentaire, ils ne devraient pas nécessiter de traitement dentaire ni de réévaluation dans les 12 mois ;
- Astronautes de classe II : présence de lésions ou de restaurations défectueuses. Cependant elles ne devraient pas entraîner de situation d'urgence dentaire dans les 12 mois ;
- Astronautes de classe III : présence de pathologies bucco-dentaires. En absence de traitement, elles peuvent être à l'origine d'une situation d'urgence dentaire dans les 12 mois suivant la consultation.

Les astronautes doivent conserver au minimum un statut de classe II, et avant tout départ en mission spatiale, présenter un statut de classe I. Les astronautes sélectionnés pour une mission spatiale ont une consultation de dépistage supplémentaire dans les 18 à 21 mois précédant le vol dans laquelle ils ont un examen clinique et radiographique rigoureux. Tous les traitements nécessaires doivent être réalisés 90 jours avant le lancement, permettant ainsi de minimiser les risques de survenue de problèmes durant la mission. Une nouvelle consultation dentaire est réalisée dans les 30 à 90 jours avant le lancement pour exclure toute pathologie buccodentaire non déclarée. Une dernière consultation est réalisée 10 jours avant l'embarquement (Rai et Kaur, 2011 ; Goyal et coll., 2015).

Compte-tenu du risque carieux extrinsèque lié à l'absence de gravité chez les astronautes, le risque d'être confronté à une urgence dentaire existe. Les médecins de l'équipage sont toutefois formés à faire face à une urgence dentaire (figure 18). Il est intéressant de se demander si la possibilité de pouvoir prodiguer des soins dentaires dans l'espace est actuellement possible et réalisable. Néanmoins il faut considérer plusieurs facteurs (Rai et Kaur, 2011 ; Goyal et coll., 2015) :

- Les membres de l'équipage spatial ont très peu de connaissances médicales ;
- Le peu de matériel mis à la disposition de l'équipage ;
- Le délai de communication entre la navette spatiale et la station au sol (le délai est d'environ 20-25 minutes) ;
- L'absence de lignes directrices pour permettre le diagnostic et le traitement de pathologies ;
- Le manque actuel de connaissances des effets de la gravité et de l'environnement général lors du déroulement d'une mission spatiale sur l'ensemble du corps humain.

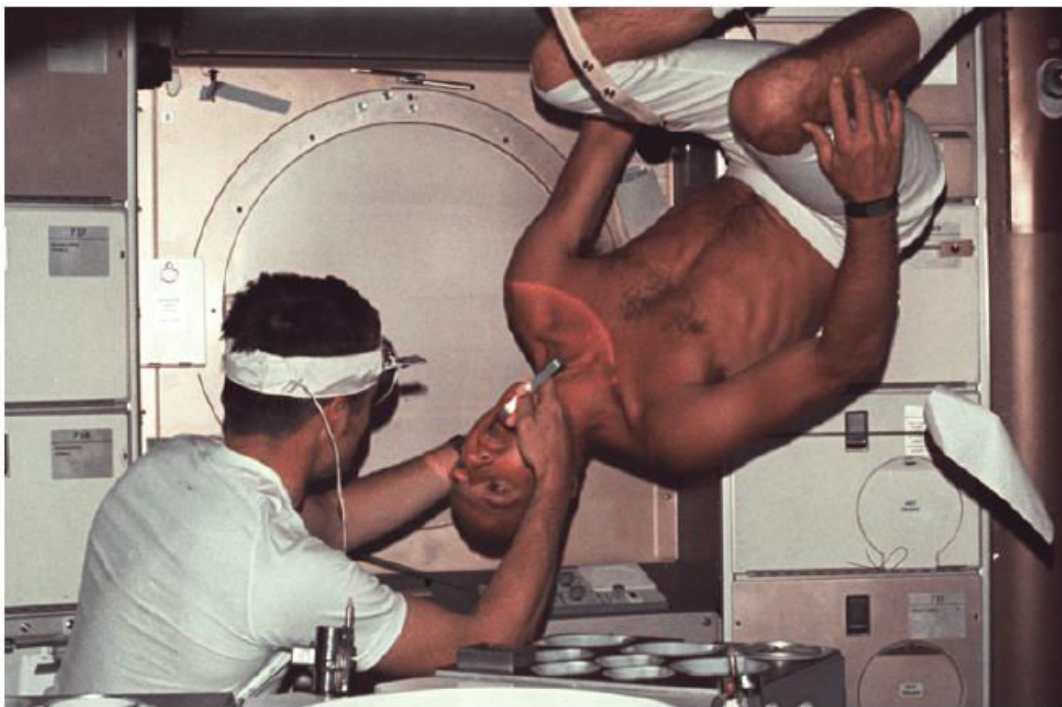


Figure 18 : Photographie montrant Charles Conrad, commandant de la mission Skylab 2, lors d'un examen bucco-dentaire réalisé par le médecin-chef Josef Kerwin (source : Häuplik-Meusburger et coll., 2016)

Les soins dentaires sont très compliqués dans une navette spatiale. L'équipement dentaire mis à disposition est limité par des restrictions de poids et d'espace de stockage. L'objectif de cet équipement est de pouvoir amener rapidement un astronaute présentant une situation d'urgence dentaire à un état de santé optimal. Une telle situation risque d'être de plus en plus fréquente puisque les missions spatiales sont de plus en plus longues (Rai et Kaur, 2011).

Lors des missions de la station spatiale internationale, deux astronautes de chaque équipe d'expédition reçoivent une formation supplémentaire en tant que « médecins de l'équipage ». Cette formation permet à l'astronaute de fournir une assistance chirurgicale et anesthésique, une capacité de diagnostic et une surveillance médicale. Au sein de cette station, des équipements et des instruments médicaux sont disponibles, ainsi que certains médicaments (antalgiques, anti-inflammatoires, antibiotiques). Le matériel disponible permet de réaliser :

- une anesthésie locale ;
- le rescelllement d'une couronne ;
- un soin et une obturation temporaires ;
- une avulsion dentaire.

Concernant le rescelllement d'une couronne, il est indiqué que s'il n'y a pas de douleur lors de l'alimentation, il est préférable de ne pas la resceller.

Outre le fait que les astronautes doivent avoir des connaissances dentaires, les chirurgiens-dentistes doivent également développer des compétences dans le domaine. Pour Rai et Kaur, ils préconisent l'ouverture d'un institut dentaire aéronautique pour collaborer avec les agences spatiales et faire avancer la recherche dans le domaine. Ils estiment qu'un cours de dentisterie aéronautique devrait être inclus dans le cursus dentaire initial et qu'un programme de formation continue en dentisterie aéronautique devrait être développé. Ils proposent, en parallèle, un diplôme doté d'un programme d'initiation et d'une bourse (Rai et Kaur, 2011) :

- Un FAD (*Fellowship of Aeronautic dentistry* ou bourse de dentisterie aéronautique), qui serait attribué aux étudiants qui terminent un cours d'initiation de 18 semaines à plein temps ;
- Un PGDAD (*Postgraduate Diploma in Aeronautoc Dentistry* ou diplôme de troisième cycle en dentisterie aéronautique), pour les étudiants qui terminent un cours avancé de 36 semaines à plein temps.

Grâce à la technologie 3D, de nouveaux protocoles sont actuellement à l'étude afin de pouvoir réaliser des soins de qualité en pleine mission spatiale. La technologie 3D pourrait servir au diagnostic et aux traitements dentaires.

Un hypothétique traitement permettant la réalisation d'une couronne dentaire est à l'étude ; il se compose en plusieurs étapes :

1. Balayage des surfaces dentaires grâce à un scanner intra-oral ;
2. Transfert des données 3D numérisées vers la Terre et interprétation des images pour établir un diagnostic par une équipe médicale en Ondontologie ;
3. Conception virtuelle de la restauration ou de la couronne (Voire d'un plan de libération occlusal pour lutter contre le bruxisme) qui est à prévoir par l'équipe médicale ;
4. Transfert du fichier numérique de conception de la restauration ou couronne virtuelle en 3D ainsi d'un guide de positionnement vers la station spatiale ;
5. Réalisation de la restauration ou couronne par usinage (technique par soustraction) ou avec une imprimante 3D (technique par addition) ;
6. Insertion et contrôle du bon positionnement, puis scellement ;
7. Elimination des excès de ciment et ajustement occlusal.

Outre les projets de développement de nouvelles technologies pour les soins dentaires lors d'une mission spatiale, il serait bénéfique pour la station, d'être équipée d'une documentation sous forme de vidéos didactiques, mais aussi du matériel et des instruments dentaires de base. Il serait également envisageable que les membres de l'équipage reçoivent une formation plus complète qui leur permettrait (Häuplik-Meusburger et coll., 2016) :

- l'administration d'antalgique et d'antibiotiques par voie orale ;
- l'utilisation d'un scanner intra-oral ;
- la réalisation d'un contrôle bucco-dentaire, d'un détartrage, ou même d'un ajustement occlusal ;
- la mise en place d'un nouveau soin restaurateur, ou au minimum d'une restauration temporaire ;
- l'anesthésie, la trépanation, ou même l'avulsion dentaire.

Tous ces projets sont actuellement à l'étude. Les futures navettes spatiales s'orientent vers de meilleurs aménagements et équipements à bord, notamment des caméras intra-orales, des imprimantes 3D, et l'appareillage nécessaire pour réaliser des clichés radiographiques (Häuplik-Meusburger et coll., 2016).

#### **5.6. La gravité, nouvelle approche thérapeutique et dentisterie du futur ?**

La régénération des tissus dentaires grâce à une thérapie utilisant les cellules souches est à l'étude, notamment grâce aux cellules souches situées dans la pulpe dentaire humaine nommée hDPSCs même si leurs cultures sont compliquées. Ces cellules ont été cultivées en microgravité simulée sur des échafaudages d'acide poly(lactique-co-glycolique) en milieu ostéogénique pendant 7 jours in vitro, puis ont été implantées en sous-cutané dans le dos de souris pendant 4 semaines. Les examens histologiques et immunohistochimiques, de collagène de type I, de sialoprotéine dentinaire et de DMP-1 ont montré que les capacités de prolifération et de différenciation odontogénique de ces cellules préparées dans le système de culture en microgravité simulée étaient plus élevées que la normale. Les résultats obtenus montrent une **amélioration de la capacité de prolifération et de différenciation odontogénique des hDPSC in vivo**. Cependant, d'autres études sont nécessaires afin de déterminer le rôle précis de la microgravité sur la différenciation des cellules souches en cellules dentaires. Les résultats de cette expérience sont très intéressants et pourraient devenir une nouvelle approche thérapeutique pour la pratique Odontologique (Li et coll., 2017).

La gravité provoque de nombreux changements dans le corps humain, qu'ils soient néfastes ou bénéfiques. Toutefois, les années à venir tendent vers un développement des voyages spatiaux avec des missions allant de plus en plus loin dans l'espace, donc de plus en plus long. La conquête spatiale pourrait potentiellement permettre d'acquérir de nouvelles connaissances sur les effets qu'a la gravité sur le corps humain. Le faible savoir actuellement disponible sur le sujet pourrait être à l'origine de nouvelles approches thérapeutiques.

## CONCLUSION

L'exposition à ces situations environnementales extrêmes concerne des métiers très précis et ne s'adresse qu'à une faible partie de la population. Pourtant, elle nécessite une prise en charge dentaire spécifique que les chirurgiens-dentistes doivent connaître et qui intéresse tous les domaines de l'Odontologie. Les données du questionnaire soumis aux chirurgiens-dentistes ont souligné leur manque de connaissances et leur besoin d'informations.

Les brochures que nous proposons résument les informations nécessaires à connaître pour mieux conseiller et soigner ces patients spécifiques. Mais, la synthèse que nous avons réalisée dans cet ouvrage nous conforte dans l'idée qu'une formation initiale courte sur le sujet devrait être incorporée dans le programme des enseignements.

L'exposition à des changements de gravité ne concerne actuellement que le domaine expérimental ; les études en microgravité restent difficiles et coûteuses et nous sommes encore loin d'« occuper » l'espace. On remarque toutefois l'importance de la gravité sur le bon fonctionnement et le développement du corps humain lorsqu'il n'y est pas soumis. D'autres études restent nécessaires pour découvrir l'ensemble des rôles de l'attraction terrestre sur le corps, et peut-être relever les effets bénéfiques d'un milieu d'hypergravité ou d'hypogravité, et les utiliser pour le développement de nouvelles thérapeutiques ? Serait-il possible de pouvoir isoler certaines parties du corps et de les soumettre à une modification de gravité pour en recueillir les effets bénéfiques ?

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abe Y, Maizza G, Bellingeri S, Ishizuka M. Diamond synthesis by high-gravity d.c. plasma cvd (hgcvd) with active control of the substrate temperature. *Acta Astronaut.* 2001; 48(2): 121–127.
2. Agrawal S, Singh D. Barodontalgia: a case report. *Guident.* 2012; 6(1): 43-4.
3. Al Thomali Y, Durgesh B. Barodontalgia – A Diagnostic Dilemma in the Dental Pain of Servicemen-A Structured Review. *IOSR J Dent Med Sci IOSR-JDMS.* 2016; 15(4): 76-9.
4. Alperin N, Bagci AM, Lee SH. Spaceflight-induced changes in white matter hyperintensity burden in astronauts. *Neurology.* 2017; 89(21): 2187-91.
5. Baker E, Schuenke M, Schilte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. Anatomie tête et cou en odontostomatologie. Cachan : Lavoisier ; 2011. 370 p.
6. Bilopavlovic N, Marinovic J, Ljubkovic M, Obad A, Zanchi J, Pollock NW. Effect of repetitive SCUBA diving on humoral markers of endothelial and central nervous system integrity. *Eur J Appl Physiol.* 2013; 113(7): 1737-43.
7. Bloomberg J, Reschke M, Clément G, Mulavara A, Taylor L. Risk of Impaired Control of Spacecraft/Associated Systems and Decreased Mobility Due to Vestibular/Sensorimotor Alterations Associated with Space flight. *NASA Rep.* Houston: NASA; 2016. 152 p.
8. Boudi R, Hammouti J, El Mohtarim B, Chhoul H. Les barotraumatismes dentaires à la plongée : du diagnostic au traitement. *J Traumatol Sport.* 2017 ; 34(1) : 70-5.
9. Boussuges A, Bergmann E, Ghigo E, Mitjavile N, Barthélémy A. Évaluation d'un protocole d'oxygénothérapie hyperbare a 2 ata en O<sub>2</sub> pur dans le traitement des accidents neurologiques de décompression. 1993 ; 3 : 49-57.
10. Brown LR, Frome WJ, Wheatcroft MG, Riggan LJ, Bussell NE, Johnston DA. The Effect of Skylab on the Chemical Composition of Saliva. *J Dent Res.* 1977; 56(10): 1137-43.
11. Brulle R. Engineering the Space Age: A Rocket Scientist Remembers. *Smithsonian: Air University Press;* 2008. 188 p.
12. Bruy J. Barotraumatismes et algies dentaires dysbariques. *Médecine et armée.* 2005 ; 33(4) : 305-10.
13. Cabrera A, Grosogeat B, Mocquot C, Bosco J, Pradelle-Plasse N, Colon P. Effect of a hyperbaric environment (diving conditions) on adhesive restorations: an in vitro study. *Br Dent J.* 2017; 223(5): 347.



14. Carmichael ML, Boyev KP. Middle ear barotrauma causing transient facial nerve paralysis after scuba diving. *Diving Hyperb Med.* 2016; 46(4): 260-1.
15. Chakraborty R, Panchbhai A, Sen S, Bhowate R, Degwekar S. Barotrauma in Orofacial region. *Int J Oral Health Med Res.* 2015; 2(2): 115-9.
16. Chatani M, Mantoku A, Takeyama K, Abduweli D, Sugamori Y, Aoki K, et coll. Microgravity promotes osteoclast activity in medaka fish reared at the international space station. *Sci Rep.* 2015; 5(1): 1-11.
17. Cudennec YF, Trannoy P. Barotraumatismes sinusiens. *EMC - Oto-rhino-laryngologie.* 1994 ; 1-0. [Article 20-466-A-10].
18. Dagdeviren D, Kalajzic Z, Adams D, Kalajzic I, Lurie A, Medniks M, et coll. Responses to spaceflight of mouse mandibular bone and teeth. *Archives of Oral Biology.* 2018; (93): 163-76.
19. Dagdeviren D, Beallias J, Khan I, Mednieks M, Hand A. Response of the mouse sublingual gland to spaceflight Dagdeviren. *Eur J Oral Sci.* 2018; 126(5): 376-381.
20. Drucker S, Zadik Y. Scuba diving: Dental diving tips. *Dent Abstr.* 2013; 58(5): 277-9.
21. Durden S L. Remote Sensing and Modeling of Cyclone Monica near Peak Intensity. *Atmosphere.* 2010; 1(1): 15-33.
22. Feng C, Malmstrom H, Yunker M, Gajendra S, Ranna V. Prevalence of dental problems in recreational SCUBA divers: a pilot survey. *Br Dent J.* 2016; 221(9): 577.
23. Fitzgerald J. Cartilage breakdown in microgravity-a problem for long-term spaceflight?. *NPJ Regen Med.* 2017; 2(1): 10.
24. Gambará G, Salanova M, Ciciliot S, Furlan S, Gutschmann M, Schiffli G et coll. Gene Expression Profiling in Slow-Type Calf Soleus Muscle of 30 Days Space-Flown Mice. *PloS One.* 2017; 12(1): 1-27.
25. Genchi G, Rocca A, Marino A, Grillone A, Mattoli V, Ciofani G. Hypergravity As a Tool for Cell Stimulation: Implications in Biomedicine. *Front Astron Space Sci.* 2016; 3(26): 8 p.
26. Goyal A, Malhotra P, Bansal P, Arora V, Arora P, Singh R. Mission mars: a dentist's perspective. *JBIS.* 2015; 68(1): 393-9.
27. Gulve MN, Gulve ND. Provisional Crown Dislodgement during Scuba Diving: A Case of Barotrauma. *Case Rep Dent.* 2013; 1(1): 1-4.
28. Gulve MN, Gulve ND, Shinde R, Kolhe SJ. The effect of environmental pressure changes on the retentive strength of cements for orthodontic bands. *Diving Hyperb Med.* 2012; 42(2): 78-81.

29. Gunepin M, Derache F, Dychter L, Blatteau J-E, Nakdimon I, Zadik Y. Dental Barotrauma in French Military Divers: Results of the POP Study. *Aerosp Med Hum Perform.* 2015; 86(7): 652-5.
30. Gunepin M, Derache F, Schmid B, Blatteau J-E, Risso J, Dychter L, et coll. Étude exploratoire in vitro de l'impact des variations de pression sur les obturations coronaires temporaires réalisées en interséance de traitement endodontique. *Rev Odont Stomat.* 2016 ; (45) : 262-74.
31. Gunepin M, Derache F, Zadik Y, Risso J-J, Blatteau J-E, Hugon M, et coll. Prise en charge buccodentaire des plongeurs sous-marins. Importance du concept de « dentisterie de la plongée ». *EMC médecine buccale.* 2013 ; 8(5) : 1-8. [Article 28-948-C-10].
32. Haigneré C, Jonas P, Khayat P, Girot G. Bone Height Measurements Around a Dental Implant After a 6-month Space Flight: A Case Report. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2006; 21(3): 450-4.
33. Heiskanen WA, Moritz H. *Physical Geodesy.* W H Freeman and Company. 1967; 90(1): 364.
34. Hinkelbein J, Komorowski M, Grau S. Effects of Spaceflight on Astronaut Brain Structure. *N Engl J Med.* 2018; 378(6): 582.
35. Illman P. *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge.* Washington: Federal Aviation Administration; 1971. 614 p.
36. Khanna A. Crown Cementing Strategy for Naval Divers. *Med J Armed Forces India.* 2010; 66(1): 46-9.
37. Kini PV, Jathanna VR, Jathanna RV, Shetty K. Barodontalgia: Etiology, Features and Prevention. *Open J Dent Oral Med.* 2015; 3(2): 35-8.
38. Kumar S, Kumar PS, John J, Patel R. Barotrauma Tooth under Pressure. *N Y State Dent J.* 2015; 81(3): 22-6.
39. Lacquaniti F, Ivanenko YP, Sylos-Labini F, La Scaleia V, La Scaleia B, Willems PA, et coll. Human Locomotion in Hypogravity: from Basic Research to Clinical Applications. *Front Physiol.* 2017; 8(1): 893.
40. Li Y, He L, Pan S, Zhang L, Zhang W, Yi H, et coll. Three-dimensional simulated microgravity culture improves the proliferation and odontogenic differentiation of dental pulp stem cell in PLGA scaffolds implanted in mice. *Mol Med Rep.* 2017; 15(2): 873-8.
41. Macaluso GM, Galli C. Flight-associated inferior alveolar nerve paresthesia: a case report. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2005; 99(2): 165-7.
42. Mandke L, Garg S. Aviation dentistry: new horizon, new challenge. *Int J Contemp Dent Med Rev.* 2015: 1-4.

43. Martrette JM, Westphal A, Hartmann N, Vonau S. Effects of pre- and perinatal exposure to hypergravity on muscular structure development in rat. *J Muscle Res Cell Motil.* 1998; (19): 689-94.
44. McDonnell JP, Needleman HL, Charchut S, Allred EN, Roberson DW, Kenna MA, et coll. The relationship between dental overbite and eustachian tube dysfunction. *Laryngoscope.* 2001; 111(2): 310-6.
45. Méliet J-L. Prise en charge en santé au travail des travailleurs intervenant en conditions hyperbares. *RST.* 2016 ; (147) : 69-78.
46. Mulavara AP, Peters BT, Miller CA, Kofman IS, Reschke MF, Taylor LC, et coll. Physiological and Functional Alterations after Spaceflight and Bed Rest. *Med Sci Sports Exerc.* 2018; 50(1): 1961-80.
47. Murrison W, Smith J, Francis R, Counter R. Maxillary Sinus Barotrauma with Fifth Cranial Nerve Involvement. *J Laryngol Otol.* 1991; 105(3): 217-9.
48. Nogueira ML, Venderoski AC, Hemkemeier C, Dal Bosco M, Rodrigues Do Nascimento V, Tomazinho LF. Barodontalgia: Literature Review. *J Surg Clin Dent.* 2016; 10(1): 5-8.
49. Pathak S. Aviation dentistry: Past to present. *J Dent Res Rev.* 2015; 2(3): 138-140.
50. Pecaut MJ, Mao XW, Bellinger DL, Jonscher KR, Stodieck LS, Ferguson VL, et coll. Is spaceflight-induced immune dysfunction linked to systemic changes in metabolism?. *PloS One.* 2017; 12(5): 1-22.
51. Philippou A, Minozzo FC, Spinazzola JM, Smith LR, Lei H, Rassier DE, et coll. Masticatory muscles of mouse do not undergo atrophy in space. *FASEB J.* 2015; 29(7): 2769-79.
52. Pourhashemi SF, Sahraei H, Meftahi GH, Hatef B, Gholipour B. The Effect of 20 Minutes Scuba Diving on Cognitive Function of Professional Scuba Divers. *Asian J Sports Med.* 2016; 7(3): 1-5.
53. Rai B, Kaur J. The history and importance of aeronautic dentistry. *J Oral Sci.* 2011; 53(2): 143-6.
54. 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.* 2011; 82(10): 1478-82.
55. Robichaud R, McNally ME. Barodontalgia as a differential diagnosis: symptoms and findings. *J Can Dent Assoc.* 2005; 71(1): 39-42.
56. 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.* 2017; 31(12): 5466-77.

57. Sikri A. Aviation Dentistry: The big challenge!!! IDA Times. 2017; 13(1): 19-20.
58. Sureda A, Batle JM, Capó X, Martorell M, Córdova A, Tur JA, et coll. Scuba diving induces nitric oxide synthesis and the expression of inflammatory and regulatory genes of the immune response in neutrophils. *Physiol Genomics*. 2014; 46(17): 647-54.
59. Swinney CC, Allison Z. Spaceflight and Neurosurgery: A Comprehensive Review of the Relevant Literature. *World Neurosurg*. 2018; 109: 444-8.
60. Tahimic CGT, Globus RK. Redox Signaling and Its Impact on Skeletal and Vascular Responses to Spaceflight. *Int J Mol Sci*. 2017; 18(10): 1-18.
61. Venutolo F, Corriol JH, Grandjean B, Lormeau B, Louge P, Méliet J-L, et coll. Accidents de plongée subaquatique. EMC. 2007 : 1-17. [Article 25-030-G-20].
62. Verdalle P, Morvan J-B. Barotraumatismes sinusiens. EMC. 2013 ; 8(1) : 1-8. [Article 20-466-A-10].
63. Vico L, Hargens A. Skeletal changes during and after spaceflight. *Nat Rev Rheumatol*. 2018; 14(4): 229-45.
64. Wesolowska K, Czarkowska-Paczek B, Przedlacki J, Przybylski J. Scuba diving does not affect bone mineral density or bone mineral content. *Jt Bone Spine Rev Rhum*. 2011; 78(6): 616-8.
65. Wilmshurst P, Ross K. Dysbaric osteonecrosis of the shoulder in a sport scuba diver. *Br J Sports Med*. 1998; 32(4): 344-5.
66. Yin X, Chen K, Zhou H, Ning X. Combustion Synthesis of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/TiC Composites from Elemental Powders under High-Gravity Conditions». *J Am Ceram Soc*. 2010; 93(8): 2182-7.
67. Yuce E, Koçer G, Çini TA. Current concepts of oral and maxillofacial rehabilitation and treatment in aviation. *Gen Dent*. 2016; 64(5): 44-8.
68. Zadik Y. Aviation dentistry: current concepts and practice. *Br Dent J*. 2009a; 206(1): 11-6.
69. Zadik Y. Barodontalgia. *J Endod*. 2009b; 35(4): 481-5.
70. Zadik Y. Dental Barotrauma. *Int J Prosthodont*. 2009c; 22(4): 354-7.
71. Zadik Y. Barodontalgia: what have we learned in the past decade?. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2010; 109(4): 65-9.
72. Zadik Y, Drucker S. Diving dentistry: a review of the dental implications of scuba diving. *Aust Dent J*. 2011; 56(3): 265-71.

73. Zhang C, Li L, Jiang Y, Wang C, Geng B, Wang Y, et coll. Space microgravity drives transdifferentiation of human bone marrow-derived mesenchymal stem cells from osteogenesis to adipogenesis. *FASEB J.* 2018; 32(8): 4444-58.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ÉLECTRONIQUES**

74. Häuplik-Meusburger S, Meusburger H, Lotzmann U. Dental Treatment during a human Mars Mission with remote support and advanced technology. *ICES.* [Internet] 2016 [consulté le 12 juillet 2018]; 11 p. Disponible sur : <https://tu-ir.tdl.org/handle/2346/67570>
75. May S. What is Microgravity?. *NASA Knows.* [Internet] 2012 [mis à jour en 2017 ; consulté le 14 septembre 2018]. Disponible sur : <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-microgravity-58.html>

# TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES .....	12
LISTE DES TABLEAUX.....	14
INTRODUCTION .....	15
1. LE CORPS HUMAIN SOUMIS AUX CHANGEMENTS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE ET DE GRAVITE .....	17
1.1. Rappels physiques et liens entre poids, masse, volume et pression.....	17
1.2. Populations et situations sous l'influence de ces phénomènes physiques. .	22
2. EFFETS DES VARIATIONS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE DU CORPS HUMAIN .....	26
3. LA SANTÉ DE L'APPAREIL MANDUCATEUR SOUMIS AUX CHANGEMENTS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE.....	28
3.1. Effets sur l'appareil stomatognathique.....	28
3.2. Effets sur l'appareil auditif.....	28
3.3. Effets sur le nerf trijumeau .....	31
3.4. Effets sur le sinus maxillaire .....	34
3.4.1. Mécanisme lésionnel .....	34
3.4.2. Signes cliniques.....	38
3.4.3. Examen radiologique.....	38
3.4.4. Traitement .....	39
3.5. Effets sur la santé dentaire des personnes soumises régulièrement à des variations de pression.....	39
3.5.1. Définitions.....	41
3.5.2. La dent saine .....	41
3.5.3. Pathologies pulpaire et périapicales en situation hypobare .....	42
3.5.4. Pathologies pulpaire et périapicales en situation hyperbare .....	45
3.5.5. Lésions carieuses et restaurations plastiques .....	46

3.5.6.	Odontologie prothétique .....	52
3.5.7.	Orthodontie .....	54
3.6.	Effets sur le parodonte et sur la muqueuse buccale .....	54
4.	SPÉCIFICITÉS DES SOINS BUCCO-DENTAIRES.....	57
4.1.	Soins préventifs .....	57
4.1.1.	Bonnes pratiques lors des soins restaurateurs.....	57
4.1.2.	Bonnes pratiques lors des soins endodontiques .....	59
4.1.3.	Bonnes pratiques lors des soins prothétiques .....	60
4.1.4.	Bonnes pratiques lors des soins orthodontiques .....	61
4.1.5.	Bonnes pratiques lors des soins chirurgicaux.....	61
4.1.6.	Outil de diagnostic .....	62
4.2.	Recommandations.....	63
4.3.	Analyse d'un questionnaire.....	69
5.	LES VARIATIONS DE GRAVITÉ : RÉPERCUSSIONS SUR LE CORPS HUMAIN ET L'APPAREIL MANDUCATEUR.....	79
5.1.	Effets sur l'appareil locomoteur .....	80
5.1.1.	Modification des structures osseuses .....	80
5.1.2.	Modification des structures musculaires .....	85
5.1.3.	Modifications des structures articulaires .....	88
5.2.	Effets sur le métabolisme et sur le système immunitaire .....	88
5.3.	Effets sur le système vasculaire .....	89
5.4.	Effets sur le système nerveux.....	90
5.5.	Effets sur les structures de la cavité buccale .....	91
5.5.1.	Effets les tissus parodontaux .....	91
5.5.2.	Effets sur les tissus dentaires .....	92
5.5.3.	La dentisterie aéronautique .....	94
5.6.	La gravité, nouvelle approche thérapeutique et dentisterie du futur ? .....	99

CONCLUSION.....	101
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	102
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ÉLECTRONIQUES .....	107
TABLE DES MATIERES.....	108



**GERBEREUX William – Incidence des changements de pression atmosphérique et de gravité sur la santé de l'appareil manducateur**

Nancy 2018 : 110 pages. 18 figures ; 8 tableaux

Th. : Chir.-Dent. : Nancy 2018

**Mots-clefs :**

- Santé orale
- Risque professionnel
- Barodontalgie
- Vol spatial
- Dentisterie

**Résumé :**

Cette thèse a pour objectif d'étudier les effets de la gravité et de la pression atmosphérique sur la santé orale afin d'en définir les bonnes pratiques adaptées à la patientèle qui y est soumise. Cet ouvrage est composé de cinq parties. Une première partie rappelle les lois physiques des phénomènes observés lors de variations de pression atmosphérique et de gravité et présente les populations à risque qui sont exposées à ces phénomènes. Les trois chapitres suivants traitent successivement des effets d'une variation de pression sur l'ensemble du corps humain et les différents constituants de l'appareil manducateur, puis des recommandations et informations acquises par la science permettant une réalisation de soins dentaires adaptés et spécifiques à cette patientèle particulière. Cette partie est accompagnée 1) des résultats d'une étude menée dans l'ensemble du territoire français portant sur les connaissances des chirurgiens-dentistes sur les barotraumatismes de la cavité orale et 2) d'une proposition de supports d'informations destinés aux praticiens et aux patients. Enfin, une dernière partie traite des répercussions d'une variation de gravité sur l'ensemble du corps humain et l'appareil manducateur. Elle suscite des réflexions quant à l'utilisation d'une condition de gravité comme usage d'une thérapeutique dans l'avenir.

**Membres du jury :**

<u>Pr C. STRAZIELLE</u>	Professeur des Universités	Président-directeur
Dr M. VINCENT	Maître de Conférences	Juge
Dr S. CLERC	Assistant Hospitalo-Universitaire	Juge
Dr F. CAMELOT	Docteur en Chirurgie Dentaire	Invité

**Adresse de l'auteur :**

William GERBEREUX  
5 rue des griots  
70170 BOUGNON



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE



FACULTÉ  
D'ODONTOLOGIE  
DE LORRAINE

Jury :   Président : C. STRAZIELLE – Professeur des Universités  
          Juges :    C. STRAZIELLE – Professeur des Universités  
                  M. VINCENT – Maître de Conférences des Universités  
                  S. CLERC – Assistante Hospitalo-Universitaire  
                  F. CAMELOT – Docteur en Chirurgie Dentaire

## Thèse pour obtenir le diplôme d'État de Docteur en Chirurgie Dentaire

Présentée par : **Monsieur GERBEREUX William**

né(e) à : **Vesoul (Haute-Saône)**

le **24 août 1992**

et ayant pour titre : « **Incidence des changements de pression atmosphérique et de gravité sur la santé de l'appareil manducateur** ».

Le président du jury

C. STRAZIELLE

Le doyen,  
de la faculté d'odontologie

FACULTÉ  
D'ODONTOLOGIE  
DE LORRAINE

J.M. MARTRETTE

Autorise à soutenir et imprimer la thèse *10535*

NANCY, le *15 NOV. 2018*

Le président de l'université de Lorraine

**P. MUTZENHARDT**