



HAL
open science

Etude des salives artificielles utilisées pour les tests de corrosion des alliages orthodontiques

Benoît Egloff

► **To cite this version:**

Benoît Egloff. Etude des salives artificielles utilisées pour les tests de corrosion des alliages orthodontiques. Sciences du Vivant [q-bio]. 2009. hal-01733540

HAL Id: hal-01733540

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01733540>

Submitted on 14 Mar 2018

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-theses-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

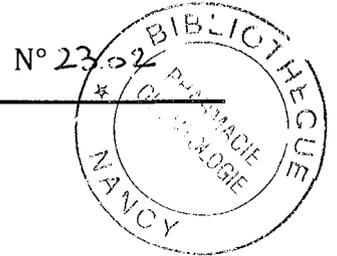
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

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

T/OD/N/2009/2302D

ACADEMIE DE NANCY-METZ
UNIVERSITE HENRI POINCARÉ - NANCY 1
FACULTE D'ODONTOLOGIE

Année 2009



THESE

Pour le

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Par

Benoît EGLOFF

Né le 21 avril 1984 à Sarreguemines (Moselle)

**ÉTUDE DES SALIVES ARTIFICIELLES UTILISEES POUR LES TESTS DE
CORROSION DES ALLIAGES ORTHODONTIQUES**

Présentée et soutenue publiquement le 10/02/2009

Examineurs de la thèse :

Pr. FILLEUL M.P.

Pr. RAPIN C.

Dr. BOLENDER Y.

Dr. GEORGE O.

Professeur des universités

Professeur des universités

Maître de conférences

Attaché

Président

Juge

Juge

Directeur

BU PHARMA-ODONTOL



D

104 079352 0

ppn 132507420
bib 201659

T/OD/N/2009/2302D

ACADEMIE DE NANCY-METZ
UNIVERSITE HENRI POINCARÉ – NANCY 1
FACULTE D'ODONTOLOGIE

Année 2009

N°

THESE

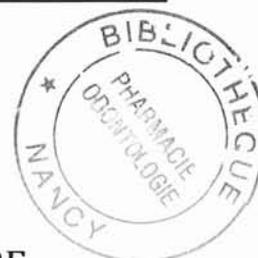
Pour le

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Par

Benoît EGLOFF

Né le 21 avril 1984 à Sarreguemines (Moselle)



**ÉTUDE DES SALIVES ARTIFICIELLES UTILISEES POUR LES TESTS DE
CORROSION DES ALLIAGES ORTHODONTIQUES**

Présentée et soutenue publiquement le 10/02/2009

Examineurs de la thèse :

Pr. FILLEUL M.P.
Pr. RAPIN C.
Dr. BOLENDER Y.
Dr. GEORGE O.

Professeur des universités
Professeur des universités
Maître de conférences
Attaché

Président
Juge
Juge
Directeur

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



Vice-Doyens : Pr. Pascal AMBROSINI - Dr. Jean-Marc MARTRETTE

Membres Honoraires : Pr. F. ABT - Dr. L. BABEL - Pr. S. DURIVAUX - Pr. G. JACQUART - Pr. D. ROZENCWEIG - Pr. M. VIVIER

Doyen Honoraire : Pr. J. VADOT

Sous-section 56-01 Odontologie pédiatrique	Mme DROZ Dominique (Desprez) M. PREVOST Jacques M. BOCQUEL Julien Mlle PHULPIN Bérengère M. SABATIER Antoine	Maître de Conférences Maître de Conférences Assistant Assistant Assistant
Sous-section 56-02 Orthopédie Dento-Faciale	Mme FILLEUL Marie Pierryle M. BOLENDER Yves Mlle PY Catherine M. REDON Nicolas	Professeur des Universités* Maître de Conférences Assistant Assistant
Sous-section 56-03 Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie légale	M. ... M. CELEBI Sahnüseyin Mme JANTZEN-OSSOLA Caroline	Maître de Conférences* Assistant Assistant
Sous-section 57-01 Parodontologie	M. AMBROSINI Pascal Mme BOUPELLIEZ Catherine (Bisson) M. MILLER Neal M. PENAUD Jacques M. ... Mme BACHERT Martine M. GALLINA Sébastien	Professeur des Universités* Maître de Conférences Maître de Conférences Maître de Conférences Maître de Conférences Assistant Assistant
Sous-section 57-02 Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique Anesthésiologie et Réanimation	M. BRAVETTI Pierre M. ARTIS Jean-Paul M. VIENNET Daniel M. WANG Christian M. BALLY Julien Mlle LE Audrey Mlle SOURDOT Alexandra	Maître de Conférences Professeur 1er grade* Maître de Conférences Maître de Conférences* Assistant (ex 58-01) Assistant Assistante
Sous-section 57-03 Sciences Biologiques (Biochimie, Immunologie, Histologie, Embryologie, Génétiq ue, Anatomie pathologique, Bactériologie, Pharmacologie)	M. WESTPHAL Alain M. MARTRETTE Jean-Marc Mlle ERBRECH Aude	Maître de Conférences* Maître de Conférences* Assistante Associée au 01/10/2007
Sous-section 58-01 Odontologie Conservatrice, Endodontie	M. ENGELS-DEUTSCH Marc M. AMORY Christophe M. MORTIER Eric M. HESS Stéphan M. ...	Maître de Conférences Maître de Conférences Maître de Conférences Assistant Assistant
Sous-section 58-02 Prothèses (Prothèse conjointe, Prothèse adjointe partielle, Prothèse complète, Prothèse maxillo-faciale)	M. SCHOVER Jacques M. LOUIS Jean-Paul M. ARCHIEN Claude M. BARONE Serge Mlle BEMER Julie M. DE MARCH Pascal M. SIMON Franck M. ...	Maître de Conférences Professeur des Universités* Maître de Conférences* Assistant Assistante Assistant Assistant Assistant
Sous-section 58-03 Sciences Anatomiques et Physiologiques Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysique, Radiologie	Mlle STRAZIELLE Catherine M. SALOMON Jean-Pierre Mme HOUSSIN Rozat (Jazi)	Professeur des Universités* Maître de Conférences Assistante Associée au 01/01/2007

souligné : responsable de la sous-section *temps plein

Mis à jour le 01.11.2008

À notre président

Madame le Professeur Marie-Pierryle Filleul

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Sciences Odontologiques

Docteur d'État en Odontologie

Professeur des universités

Habilité à diriger des Recherches

Responsable de la Sous-Section : Orthopédie Dento-Faciale

Nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous accordez en président cette thèse. Nous vous prions de trouver ici le témoignage de notre reconnaissance et de notre respectueuse estime.

À notre juge

Monsieur le Professeur Christophe RAPIN

Maitre ès Sciences

Docteur en Sciences et Génie des Matériaux

Habilité à diriger des Recherches en Physique

Professeur des Universités

Responsable du CES de Technologie des Matériaux employés en art dentaire

Responsable de Licence Matériaux pour la santé

Vous nous avez fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail. Nous vous remercions de l'attention et de l'intérêt que vous avez porté à ce travail. Trouvez ici le témoignage de notre profonde reconnaissance et de toute notre estime.

À notre juge

Monsieur le Docteur Yves BOLENDER

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université Henri Poincaré Nancy-1

Maître de Conférences des Universités

Sous-Section : Orthopédie Dento-Faciale

Vous nous avez fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail. Nous vous remercions de l'attention et de l'intérêt que vous avez porté à ce travail. Trouvez ici le témoignage de notre profonde reconnaissance et de toute notre estime.

À notre directeur

Monsieur le Docteur Olivier GEORGE

Docteur en Chirurgie Dentaire

Ancien Assistant

Attaché Universitaire

Vous nous avez fait l'honneur de bien vouloir diriger cette thèse. Votre aide et votre engagement tout au long de ce travail ont été précieux. Veuillez trouver ici le témoignage de notre reconnaissance et de notre profonde estime.

À ma famille et mes amis,

Qui m'ont toujours soutenu au long de mes études

TABLE DES MATIERES



1	INTRODUCTION	1
1.1	INTERET	1
1.2	HISTORIQUE	2
2	ORIGINE ET PROPRIETES DE LA SALIVE NATURELLE	3
2.1	ANATOMIE ET HISTOLOGIE DES GLANDES SALIVAIRES	3
2.1.1	ANATOMIE	3
2.1.1.1	Les glandes salivaires majeures.....	4
2.1.1.1.1	La glande parotide	4
2.1.1.1.2	La glande submandibulaire.....	5
2.1.1.1.3	La glande sublinguale	5
2.1.1.2	Les glandes salivaires mineures.....	6
2.1.2	HISTOLOGIE.....	7
2.1.2.1	Cellules sécrétrices.....	9
2.1.2.1.1	Cellules acineuses	9
2.1.2.1.2	Canaux intercalaires	11
2.1.2.1.3	Canaux striés.....	12
2.1.2.1.4	Canaux excréteurs	14
2.1.2.2	Cellules non sécrétrices.....	15
2.1.2.2.1	Cellules myoépithéliales	15
2.1.2.2.2	Cellules des espaces conjonctifs.....	15
2.1.2.2.3	Vaisseaux	16
2.2	COMPOSANTS DE LA SALIVE	16
2.2.1	ÉLEMENTS INORGANIQUES	18
2.2.1.1	Sodium, potassium et chlorure (Na^+ , K^+ , Cl^-).....	18
2.2.1.2	Bicarbonate (HCO_3^-)	18

2.2.1.3	Thiocyanate (SCN ⁻)	18
2.2.1.4	Calcium et phosphates (Ca ²⁺ , PO ₄ ³⁻).....	18
2.2.1.5	Fluorures (F ⁻).....	19
2.2.1.6	Magnésium (Mg ²⁺)	20
2.2.1.7	Nitrates et ammonium (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺)	20
2.2.2	ÉLÉMENTS ORGANIQUES.....	22
2.2.2.1	Les protéines salivaires	22
2.2.2.1.1	Les protéines salivaires riches en proline (PRP).....	22
2.2.2.1.2	La stathérine, les cystatines et les histatines.....	23
2.2.2.1.3	Les glycoprotéines salivaires	23
2.2.2.1.3.1	Les mucines	23
2.2.2.1.3.2	Glycoprotéines à activité groupe sanguin	24
2.2.2.1.3.3	Immunoglobulines.....	25
2.2.2.1.4	Les enzymes salivaires	26
2.2.2.1.4.1	Enzymes digestives.....	26
2.2.2.1.4.2	Enzymes impliquées dans les mécanismes de défense.....	26
2.2.2.1.4.3	Autres enzymes	28
2.2.2.2	L'urée.....	28
2.2.2.3	Les lipides salivaires	28
2.2.2.4	Les sucres salivaires	29
2.3	PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DE LA SALIVE	29
2.3.1	TEMPÉRATURE	29
2.3.2	PH.....	30
2.3.3	POUVOIR TAMPON.....	31
2.3.4	VISCOSITÉ ET POUVOIR LUBRIFIANT	32
2.4	VARIATIONS DE LA COMPOSITION DE LA SALIVE	32
2.4.1	VARIATIONS INTER INDIVIDUELLES	33
2.4.1.1	Polymorphisme génique	33
2.4.1.2	Le sexe	33
2.4.1.3	Condition physique et pathologies.....	33

2.4.1.3.1	Exercice.....	33
2.4.1.3.2	Pathologies	34
2.4.2	VARIATIONS INTRA INDIVIDUELLES	34
2.4.2.1	Variations en fonction du débit de sécrétion et de la glande	34
2.4.2.1.1	Le débit	34
2.4.2.1.1.1	Facteurs de variation du débit salivaire	35
2.4.2.1.2	La glande.....	36
2.4.2.2	Variations circadiennes et circannuelles	37
2.4.2.2.1	Variations circadiennes.....	37
2.4.2.2.2	Variations circannuelles.....	40
2.4.2.3	Variations selon l'âge	40
2.4.2.3.1	Chez l'enfant.....	40
2.4.2.3.2	Chez l'adulte	41
2.4.2.4	Autres facteurs de variations	43
2.4.2.4.1	Alimentation	43
2.4.2.4.1.1	La nature de la stimulation.....	43
2.4.2.4.1.2	Les prélèvements successifs.....	43
2.4.2.4.1.3	Le régime alimentaire	43
2.4.2.4.2	Prise de médicaments	43

3 INTERACTION ENTRE LA SALIVE ET LES ALLIAGES METALLIQUES DES APPAREILS ORTHODONTIQUES 45

3.1	LA CORROSION DANS LA CAVITE BUCCALE	45
3.1.1	DEFINITIONS.....	45
3.1.2	DIFFERENTS TYPES DE CORROSION.....	48
3.1.2.1	Corrosion généralisée	48
3.1.2.1.1	Corrosion uniforme	48
3.1.2.1.2	Corrosion galvanique.....	48
3.1.2.2	Corrosion localisée.....	49
3.1.2.2.1	Corrosion par piqûre.....	49
3.1.2.2.2	Corrosion caverneuse	50

3.1.2.2.3	Corrosion microbiologique	51
3.1.2.2.4	Autres formes de corrosion	52
3.1.2.2.4.1	Corrosion intergranulaire	52
3.1.2.2.4.2	Corrosion par frottement	52
3.1.2.2.4.3	Corrosion par érosion	53
3.1.2.2.4.4	Corrosion au niveau d'une soudure	53
3.1.2.2.4.5	Corrosion sous contrainte	53
3.1.3	FACTEURS DETERMINANTS DANS LES PHENOMENES DE CORROSION	53
3.1.3.1	Rôle de l'alliage	54
3.1.3.1.1	Composition chimique des alliages	54
3.1.3.1.2	Protection contre la corrosion des alliages	56
3.1.3.1.2.1	Passivation	56
3.1.3.1.2.2	Enrobage	58
3.1.3.1.3	Microstructure	58
3.1.3.2	Rôle du milieu buccal	59
3.1.3.2.1	Rôle de la salive	59
3.1.3.2.1.1	Composition	59
3.1.3.2.1.2	pH	62
3.1.3.2.1.3	Température	63
3.1.3.2.2	Phénomènes mécaniques	64
3.1.4	EFFETS INDESIRABLES DE LA CORROSION	65
3.1.4.1	Altération de l'état de surface et augmentation des forces de frottement	65
3.1.4.2	Nocivité des ions métalliques relargués	66
3.1.4.2.1	Cytotoxicité	66
3.1.4.2.2	Hypersensibilité au nickel	67
3.1.4.3	Colorations par les ions métalliques	68
3.2	LA CORROSION EN MILIEU SALIVAIRE ARTIFICIEL	69
3.2.1	LES SALIVES ARTIFICIELLES	69
3.2.1.1	Définition et champs d'application	69
3.2.1.2	Composition	69

3.2.2	LES TESTS DE CORROSION	72
3.2.2.1	Essai d'immersion statique	72
3.2.2.2	Essai électrochimique	72
3.2.2.2.1	Chronoampérométrie cyclique à variation linéaire de potentiel	75
3.2.2.2.2	Chronoampérométrie à potentiel constant	76
3.2.2.3	Essai d'immersion dynamique (essai de ternissement)	76

4 SELECTION D'UNE SALIVE ARTIFICIELLE DESTINEE A DES TESTS DE CORROSION D'ALLIAGES ORTHODONTIQUES 77

4.1 CAHIER DES CHARGES DE LA SALIVE ARTIFICIELLE 77

4.1.1	COMPOSITION.....	77
4.1.1.1	Composants inorganiques.....	77
4.1.1.2	Composants organiques.....	78
4.1.2	PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES	78
4.1.2.1	pH et pouvoir tampon.....	78
4.1.2.2	Température.....	79

4.2 SALIVE ARTIFICIELLE RETENUE 79

4.2.1	COMPARATIF SELON LES CRITERES RETENUS.....	79
4.2.2	RESULTATS	81

4.3 MODE D'EMPLOI 82

4.3.1	PREPARATION	82
4.3.2	MISE EN ŒUVRE	84

4.4 AUTRES CONSIDERATIONS 84

4.4.1	LACUNES DES MODELES IN VITRO FACE A LA REALITE IN VIVO	84
4.4.2	SOLUTIONS POSSIBLES	85
4.4.2.1	Banc d'essai	85
4.4.2.2	Variations des paramètres	86

5 CONCLUSION 87

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	88
TABLE DES TABLEAUX.....	90
TABLE DES EQUATIONS	91
TABLE DES ABREVIATIONS.....	92
BIBLIOGRAPHIE	93

1 INTRODUCTION

1.1 INTERET

L'étude de la composition de la salive naturelle est très complexe du fait de sa grande variabilité selon de nombreux facteurs. Les travaux sur ce sujet remontent aux années 1950 et se sont poursuivis dans les années 1970. Ce sujet fait aujourd'hui encore l'objet d'importantes recherches, car il ouvre des perspectives d'avenir dans le domaine du diagnostic médical. L'objectif à terme étant d'acquérir une connaissance approfondie des composants de la salive afin de pouvoir réaliser des analyses biologiques à partir de prélèvements salivaires, et non plus sanguins. C'est ainsi qu'en 2008 a été publiée une étude de grande ampleur sur le protéome salivaire, identifiant 1116 variétés de protéines (DENNY et al., 16).

Mais la connaissance approfondie des propriétés du milieu salivaire présente aussi un intérêt capital dans le domaine de l'étude des biomatériaux dentaires. Ainsi, la résistance à la corrosion des alliages orthodontiques est classiquement étudiée *in vitro*, en immersion dans des salives artificielles (AFNOR, 1). La pertinence des résultats obtenus dépend donc en grande partie du choix d'une salive artificielle capable de reproduire avec précision les conditions du milieu salivaire naturel. Il semble donc indispensable, pour effectuer un choix éclairé, de mener au préalable une étude détaillée de la composition, des propriétés physico-chimiques, et des variations de la salive naturelle, ainsi que des mécanismes mis en jeu dans la corrosion.



1.2 HISTORIQUE

La première utilisation de salive artificielle pour l'étude des biomatériaux dentaires rapportée dans la littérature remonte à 1931, lorsque SOUDER et SWEENEY étudièrent les risques d'empoisonnement au mercure par les restaurations à l'amalgame. La formule utilisée par les auteurs consistait en une solution d'électrolytes qui avait pour vocation de mimer les propriétés électrochimiques de la salive et son rôle dans la corrosion des éléments métalliques présents dans la cavité buccale (SOUDER et al., 85).

D'autres formules se sont succédées dans la littérature, de nombreux auteurs proposant leur propre « recette » adaptée à l'orientation de leurs travaux. Dans certains cas la salive artificielle présentait une composition plutôt lacunaire et uniquement axée sur le rôle de quelques composants précis (étude de la calcification du tartre, nucléation de l'hydroxyapatite, absorption hydrique des polymères...). D'autres au contraire étaient scrupuleusement calquées sur la composition de la salive humaine, c'est le cas par exemple de la formule proposée en 1978 par SHELLIS (83) : cette salive artificielle, très exhaustive dans sa composition, avait pour but de permettre d'étudier la flore bactérienne de la cavité buccale. On peut également signaler les travaux de LEUNG et al. (58) ainsi que ceux de GAL et al. (25) qui ont travaillé à l'élaboration de salive artificielle destinée à des essais de corrosion, et ont traité du rôle de différents composants salivaires dans les mécanismes de la corrosion.

L'utilisation de la salive artificielle, outre ses applications dans le domaine de la recherche, permet aussi le traitement de la xérostomie. Elle fut préparée à cette fin vers 1970 (MATZKER et al., 65).

LEUNG et al. (58) puis GAL et al. (25) ont revu la littérature et consigné toutes les formules utilisées entre 1931 et 1997 (cf. Tableau 6, page 71).



2 ORIGINE ET PROPRIETES DE LA SALIVE NATURELLE

2.1 ANATOMIE ET HISTOLOGIE DES GLANDES SALIVAIRES

2.1.1 ANATOMIE

La salive est produite par un ensemble de glandes.

- D'une part, les trois glandes salivaires majeures (cf. Figure 1), paires et symétriques (par ordre décroissant de volume) :

- les parotides
- les submandibulaires
- les sublinguales

Elles sont constituées de glandes ramifiées regroupées en lobules séparés par des septa. Plusieurs tubules issus des lobules rejoignent un conduit interlobulaire qui se draine dans le conduit excréteur de la glande. Les glandes salivaires majeures siègent à distance de la cavité buccale et sont reliées à elle par un conduit excréteur propre (KAMINA, 44).

- D'autre part, les glandes salivaires mineures. Ce sont de petites glandes dispersées dans la muqueuse et la sous-muqueuse de la cavité buccale. Leur structure est bien plus rudimentaire puisque ces glandes consistent généralement en quelques unités sécrétoires qui s'ouvrent directement dans la cavité buccale par de courts conduits (KAMINA, 44).

2.1.1.1 LES GLANDES SALIVAIRES MAJEURES

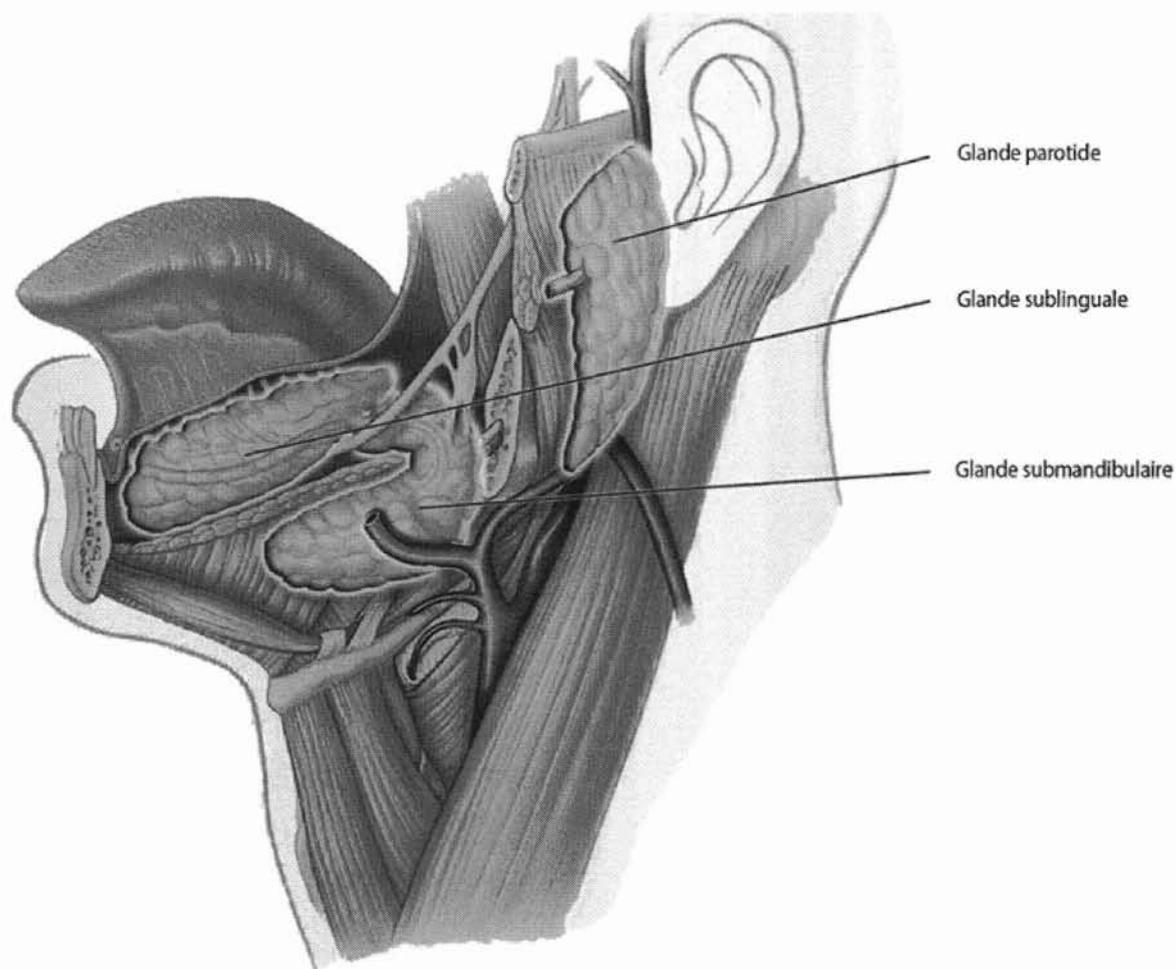


Figure 1 - Les glandes salivaires majeures, d'après CUMMINGS (9)

2.1.1.1.1 LA GLANDE PAROTIDE

La glande parotide est la plus volumineuse des glandes salivaires. Elle est située en arrière de la branche montante de la mandibule, au dessous et en avant du méat acoustique externe, en avant des processus mastoïde et styloïde et des muscles qui s'y attachent. La surface de la glande est lobulée, de couleur grise jaunâtre. Son poids (très variable) est en moyenne de 25 g. Elle se compose de deux lobes, l'un superficiel, l'autre profond (KAMINA, 44).

Le conduit parotidien (ancien canal de STENON) est le canal excréteur de la glande parotide. Sa longueur est d'environ 4 à 5 cm pour un diamètre de 1 à 2 mm. Il émerge du bord antérieur de la glande et se dirige en avant le long du muscle masséter, puis traverse en dedans le buccinateur pour

venir s'aboucher en regard de la deuxième molaire supérieure au niveau de la papille parotidienne (KAMINA, 44).

La vascularisation de la glande provient de l'artère carotide externe. Les veines se drainent dans les veines jugulaires externes et rétromandibulaire.

L'innervation se fait par l'intermédiaire du nerf auriculo-temporal (branche du nerf mandibulaire), qui véhicule les fibres parasympathiques sécrétoires postganglionnaires otiques. Les fibres préganglionnaires véhiculées par le nerf glossopharyngien (IX) gagnent le ganglion otique via le plexus tympanique et le nerf petit pétreux. Les nerfs sympathiques proviennent du plexus carotidien externe (KAMINA, 44).

2.1.1.1.2 LA GLANDE SUBMANDIBULAIRE

La glande submandibulaire occupe la dépression anguleuse comprise entre la face interne de la mandibule d'une part et les muscles sus hyoïdiens de la base de la langue et du pharynx d'autre part. De taille variable, elle est souvent comparée à une amande grossièrement triangulaire à base postérieure. Elle pèse environ 7 g (ROUVIÈRE et al., 79).

Le canal excréteur de la glande s'appelle le conduit submandibulaire (ancien canal de WHARTON). Sa longueur est d'environ 4 à 5 cm pour un diamètre de 2 à 3 mm. Il se termine au niveau de la caroncule linguale sous le frein de la langue en ayant cheminé en dedans du mylo-hyoïdien. Il croise le nerf lingual dans son tiers proximal (KAMINA, 44).

La vascularisation de la glande provient de l'artère faciale et submentonnière. Les veines se jettent dans les veines faciale et submentonnière.

L'innervation provient du nerf lingual par l'intermédiaire du ganglion submandibulaire (KAMINA, 44).

2.1.1.1.3 LA GLANDE SUBLINGUALE

La glande sublinguale est située dans le plancher buccal, au dessous de la muqueuse du sillon alvéolo-lingual. Elle est allongée dans ce sillon, aplatie transversalement et légèrement effilée à ses extrémités. Elle mesure environ 3 cm de longueur, 15 mm de hauteur et 6 à 7 mm de largeur (ROUVIÈRE et al., 79).

La glande sublinguale est une agglomération de glandules et possède autant de canaux excréteurs qu'il y a de glandes dans le groupement. Le plus important des canaux excréteurs s'appelle le conduit

sublingual, il longe le conduit submandibulaire pour s'aboucher en dehors de la caroncule linguale (ROUVIÈRE et al., 79).

La vascularisation est fournie par l'artère linguale. La veine sublinguale se jette dans la veine linguale profonde.

Les nerfs proviennent du nerf sublingual par l'intermédiaire du nœud sublingual (KAMINA, 44).

2.1.1.2 LES GLANDES SALIVAIRES MINEURES

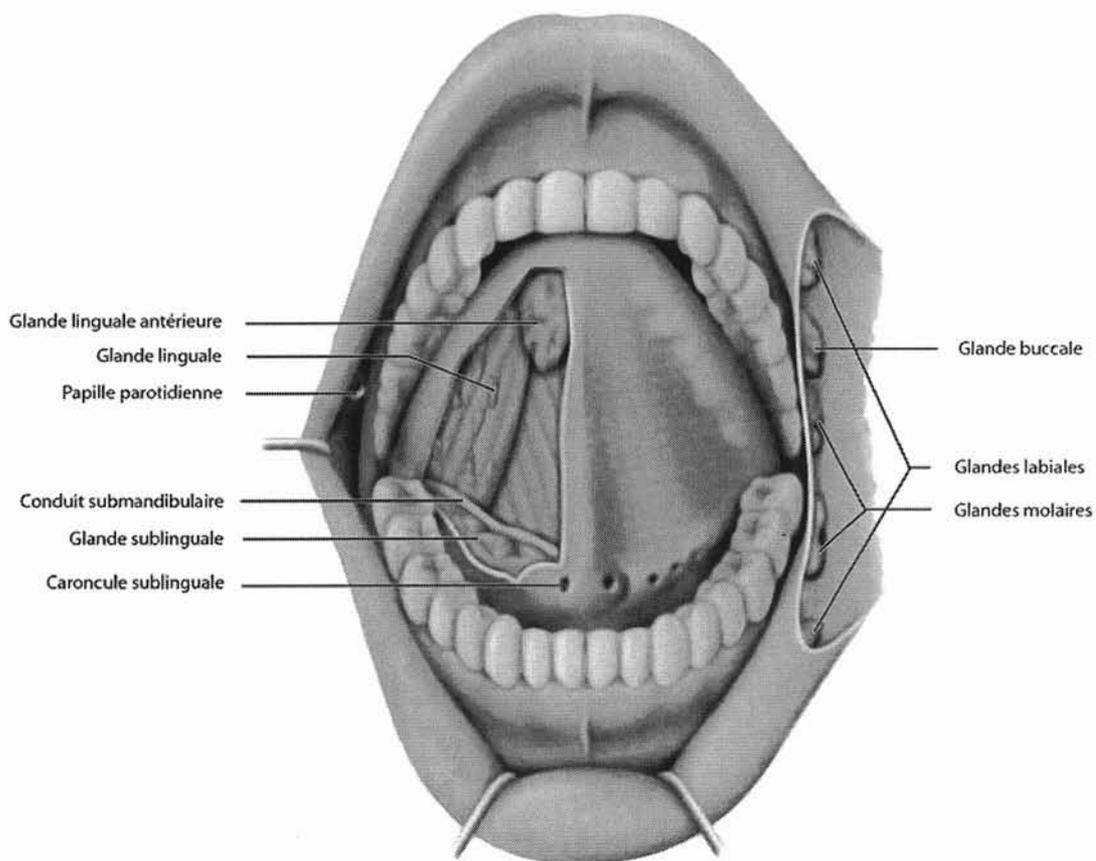


Figure 2 - Les glandes salivaires mineures, d'après KAMINA (44)

Les glandes salivaires mineures (cf. Figure 2) sont dispersées sous la muqueuse buccale (KAMINA, 44) :

- Les glandes labiales sont situées à la face interne des lèvres.

- Les glandes molaires, en regard des molaires.
- Les glandes buccales, à la face interne des joues.
- Les glandes palatines, dans la sous-muqueuse du palais.
- Les glandes linguales, nombreuses, sont situées dans la face inférieure de la langue. La glande linguale antérieure, la plus volumineuse, est près de la pointe de la langue.

2.1.2 HISTOLOGIE

Quelles que soient les glandes salivaires étudiées, elles sont toutes enveloppées par des capsules conjonctives qui les individualisent par rapport aux tissus environnants. Ces capsules peuvent contenir soit l'intégralité d'une glande mineure, soit un ou plusieurs lobes et des lobules pour les glandes salivaires majeures. Des cloisons conjonctives constituent alors des travées de refend. Chaque lobule est constitué par une succession de cellules épithéliales intralobulaires, formant une unité sécrétrice (cf. Figure 3). Ces unités convergent vers des canaux collecteurs qui drainent la salive vers la cavité buccale (GOLDBERG, 28).

Une unité sécrétrice consiste en plusieurs éléments (ORBAN et al., 72) :

- Des cellules qui peuvent être séreuses, muqueuses ou mixtes, organisées en acini.
- Des canaux intercalaires acheminent les sécrétions des cellules précédentes, ils sont continués par des canaux striés qui eux même se jettent finalement dans un canal excréteur, plus large, drainant les sécrétions de plusieurs unités.

D'autres cellules, non sécrétrices, participent à la fonction de ces glandes: les cellules myoépithéliales, les cellules vasculaires et nerveuses. On y trouve aussi l'ensemble des cellules conjonctives impliquées tant dans la synthèse du matériel collagénique des travées conjonctives que dans leur participation au système de défense immunitaire (GOLDBERG, 28).

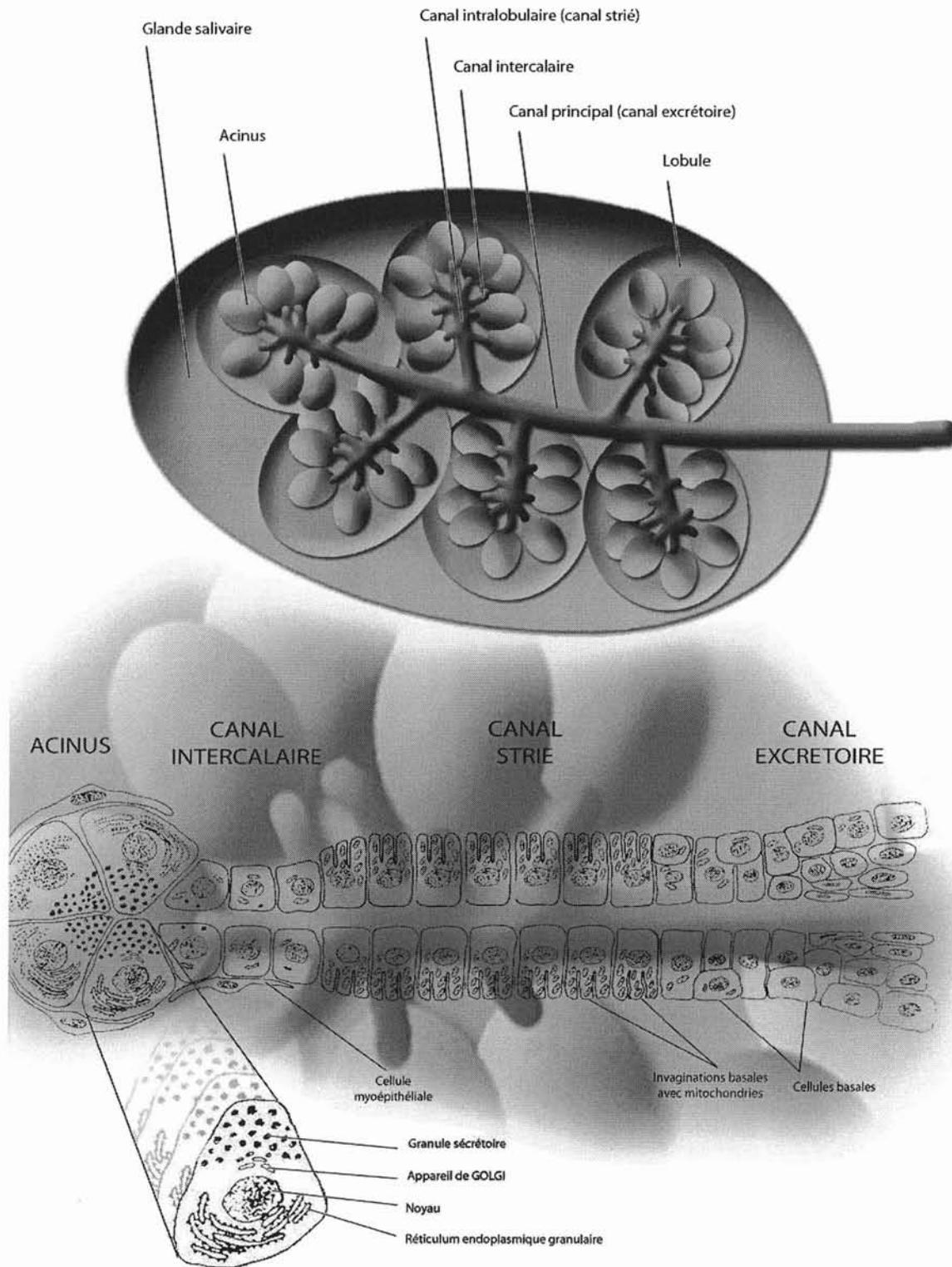


Figure 3 - Schéma de principe de l'organisation d'une glande salivaire, d'après PAPARELLA (73)

2.1.2.1 CELLULES SECRETRICES

2.1.2.1.1 CELLULES ACINEUSES

Concernant la distinction entre cellules séreuses et muqueuses, on considère actuellement que les cellules séreuses ne contiennent pas de polysaccharides et que les cellules à mucus en sont riches (la distinction est purement histologique et peut être mise en évidence au moyen du marquage PAS : acide périodique-réactif de SCHIFF) (GOLDBERG, 28).

La glande parotide est une glande exclusivement séreuse, la glande submandibulaire est mixte à prédominance séreuse et la glande sublinguale est mixte à prédominance muqueuse. Les glandes salivaires mineures sont en majorité muqueuses, c'est le cas des glandes labiales, buccales, palatines et de celles de la région antérieure de la langue ; tandis qu'en région postérieure de la langue on rencontre quelques glandes mixtes (ORBAN et al., 72).

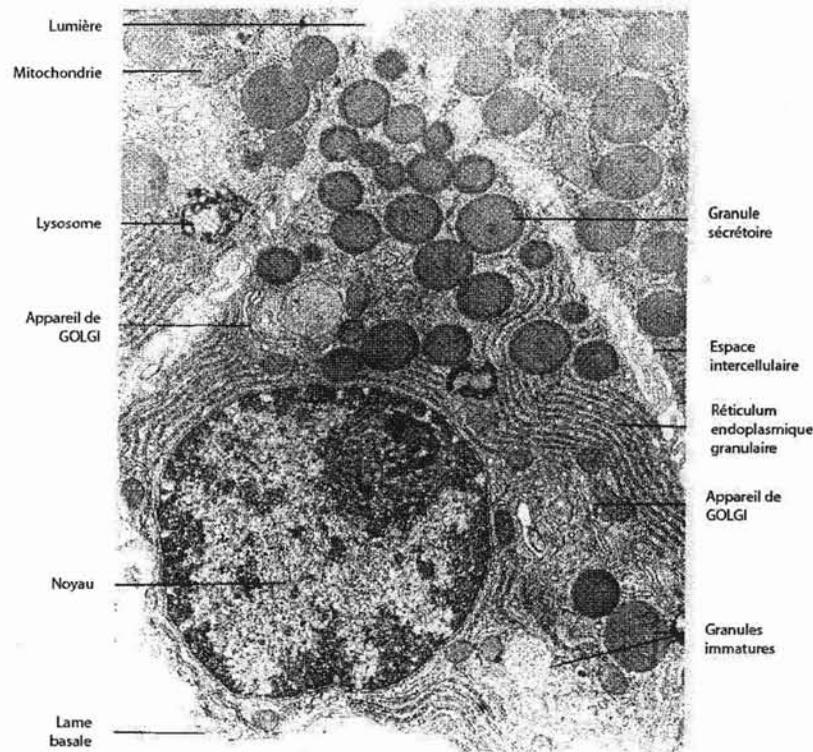


Figure 4 - Vue en MET (x 10400) d'une cellule acineuse de glande salivaire de rat, d'après ORBAN et al. (72)

➤ ORGANISATION

Séreuses, muqueuses ou mixtes, les pièces sécrétoires terminales sont composées de cellules acineuses très schématiquement pyramidales (cf. Figure 3 et Figure 4), réunies par un complexe de

jonctions autour d'une lumière en un ensemble rond ou ovalaire. Les acini de cellules muqueuses sont aussi couramment appelés tubules en raison de leur aspect allongé. Dans l'ensemble les acini n'appartiennent qu'à un seul type, à l'exception des acini des glandes sublinguales où l'on observe les croissants de GIANUZZI, caractérisés par la présence simultanée de cellules séreuses et de cellules muqueuses (GOLDBERG, 28 ; ORBAN et al., 72)

Les acini sont entourés par une membrane basale qui les sépare du milieu conjonctif interstitiel. Selon GOLDBERG, cette membrane basale joue probablement un double rôle, celui de filtre pour les précurseurs qui sont incorporés au niveau du domaine basolatéral de la membrane cytoplasmique, et celui de facteur d'adhésion au milieu conjonctif environnant. Le domaine luminal est, lui, délimité par un ensemble de jonctions de type desmosomes et des jonctions étroites, formant des bandelettes obturantes, à une très faible distance de la portion apicale de la cellule (GOLDBERG, 28).

Le noyau est toujours refoulé dans la portion basale de la cellule. Le réticulum endoplasmique granulaire (REG) est abondant et situé dans la portion basale ou baso-latérale, refoulé souvent par les granules de sécrétion. L'appareil de Golgi (cf. Figure 3 et Figure 4) comporte plusieurs dictyosomes (empilement de citernes). Ceux-ci sont constitués par 4 à 6 citernes empilées, plus ou moins parallèles, aplaties (dans les cellules séreuses) ou dilatées (dans les cellules muqueuses), des vésicules périphériques et des vacuoles de condensation se formant à partir des citernes internes des dictyosomes (GOLDBERG, 28).

Selon l'état d'activité de ces cellules on trouve une quantité variable de granules de sécrétion, immatures au voisinage de l'appareil de Golgi, matures près de la membrane luminale. A ce niveau, la membrane qui entoure les granules s'accôle à la membrane cytoplasmique. La fusion entre les deux membranes s'opère et le contenu du granule est déversé dans la lumière de l'acinus (GOLDBERG, 28).

L'activité sécrétoire des cellules acineuses est directement soumise à l'influence des systèmes nerveux autonomes périphériques. Ces cellules possèdent également des récepteurs aux hormones mais dont l'effet est discret par rapport à l'action massive du système nerveux (GOLDBERG, 28).

Les divisions cellulaires cessent précocement et la dégénérescence de certaines cellules n'est compensée que par la très probable différenciation tardive de cellules des canaux intercalaires en cellules acineuses (GOLDBERG, 28).

➤ FONCTIONS

Les cellules acineuses ont pour fonction essentielle de fabriquer une salive primaire, isotonique avec le sérum. Ce sont des cellules qui produisent de l'amylase, ainsi que l'ont démontré les immunomarquages (TANAKA et al., 87) et les travaux utilisant des techniques d'hybridation in situ (MORLEY et al., 68). On a pu montrer également la présence d'anhydrase carbonique VI et I, enzymes qui régulent le pouvoir tampon de la salive. D'autres composants ont été identifiés au niveau des cellules acineuses, en particulier une protéine salivaire acide, riche en proline (PRP) trouvée dans les granules de sécrétion. Le composant sécrétoire des immunoglobulines A (IgA) est synthétisé par les cellules séreuses acineuses (ainsi que par les cellules canalaire) (GOLDBERG, 28).

2.1.2.1.2 CANAUX INTERCALAIRES

➤ ORGANISATION

Ils sont formés par des cellules de taille inférieure à celle des cellules acineuses. Le REG ainsi que l'appareil de GOLGI sont moins développés. Chez l'homme, des cellules inhabituelles sont visibles à la jonction entre cellules acineuses et intercalaires, présentant des granules de sécrétion abondants, ce qui suggère que ces cellules participent à la formation de la salive. De façon générale, on considère que les cellules des canaux intercalaires sont des cellules peu différenciées, de type stromal (cellules de la trame d'un tissu conjonctif de soutien) et capables d'évoluer en cellules acineuses (GOLDBERG, 28).

➤ FONCTIONS

Ces cellules participent à l'élaboration de la salive au même titre que les cellules acineuses, mais dans une moindre mesure, et sont aussi capables de se différencier afin de grossir le pool de cellules acineuses (GOLDBERG, 28).

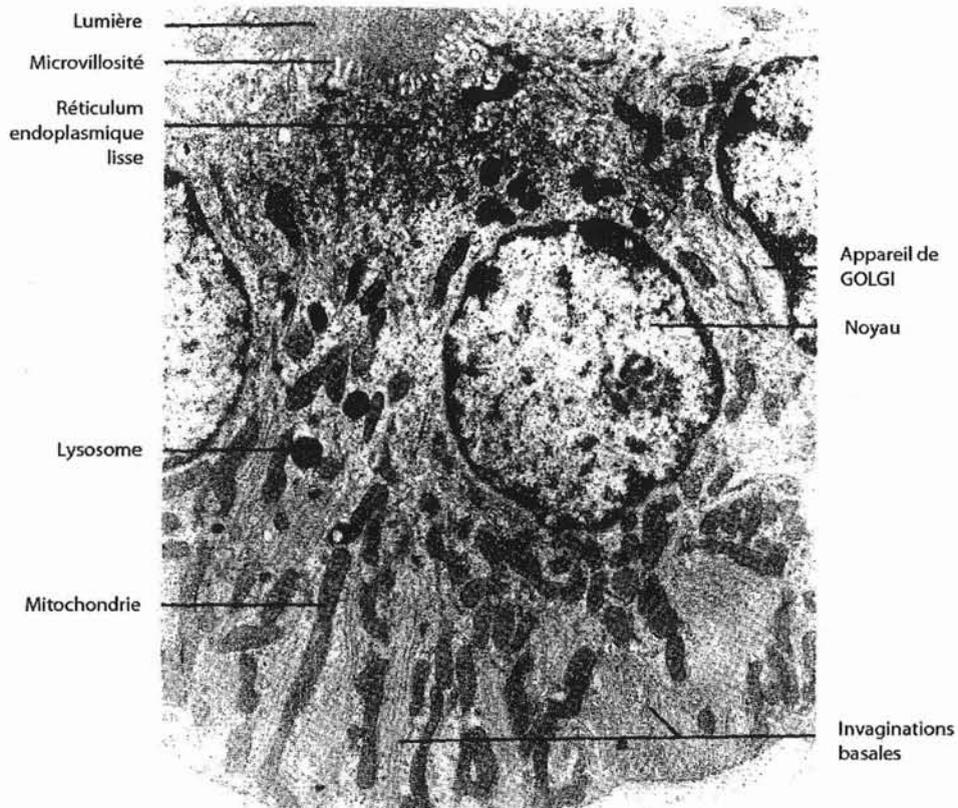


Figure 5 - Vue en MET (x 7400) d'une cellule des canaux striés de glande salivaire de rat, d'après ORBAN et al. (72)

➤ ORGANISATION

Les cellules de ces canaux sont rectangulaires en coupe longitudinale, trapézoïdales en coupe transversale. Elles sont isolées du tissu conjonctif interstitiel par une membrane basale. On trouve des bras de cellules myoépithéliales entre ces cellules, essentiellement dans la partie basale (GOLDBERG, 28).

Ces cellules se caractérisent par des replis cytoplasmiques de la membrane basale extrêmement développés. De très nombreuses mitochondries accompagnent ces replis membranaires, ils apparaissent au microscope optique sous la forme de striations basales (cf. Figure 3 et Figure 5), d'où le nom donné aux canaux. Ils permettent d'augmenter considérablement les surfaces d'échange entre les milieux intra- et extracellulaires. Les chapelets de mitochondries fournissent l'énergie aux transferts transmembranaires qui se produisent dans la zone basale de la cellule, face au réseau vasculaire. Une partie des échanges s'effectue à ce niveau. Toutefois, les réabsorptions d'eau et

d'ions s'effectuent à partir de la portion distale (apicale) de la cellule (GOLDBERG, 28). On observe au niveau apical de la membrane cellulaire l'existence de microvillosités (ORBAN et al., 72).

➤ FONCTIONS

Le passage de la salive primaire, élaborée au niveau des cellules acineuses, dans la lumière des canaux lobulaires (canaux striés) entraîne des modifications par des processus de synthèse et d'exocytose, ainsi que par des processus de réabsorption. Le rôle prédominant de ces canaux est la réabsorption d'ions, ce qui rend hypotonique la salive devenue secondaire au terme de son transit dans le système canalaire (GOLDBERG, 28).

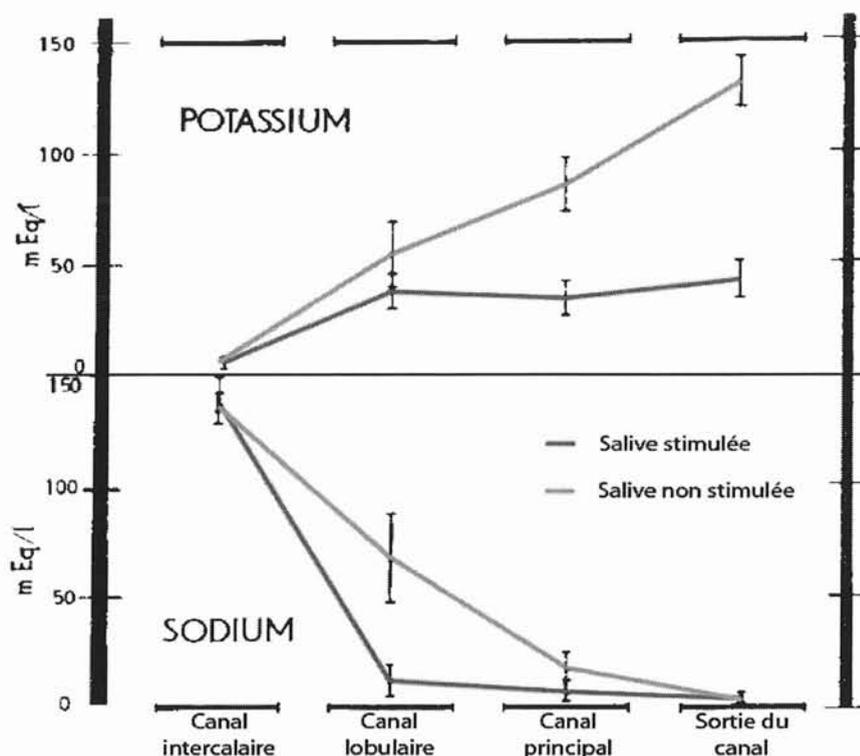


Figure 6 - Concentration salivaire en sodium et potassium en fonction de la localisation dans le système canalaire, dans la glande submandibulaire du rat, d'après PAPARELLA (73)

Des analyses par ponction dans la lumière d'un canal intercalaire ont révélé que la salive primaire est isotonique voire légèrement hypertonique par rapport au plasma. En revanche l'analyse de la salive des canaux excréteurs révèle qu'elle est hypotonique, avec des concentrations faibles en Na^+ et Cl^- et élevée en K^+ (cf. Figure 6). De plus la concentration de ces ions dans la salive varie avec le débit salivaire : quand il augmente, la concentration en Na^+ et Cl^- augmente et K^+ diminue. Ceci tient au rôle des canaux striés qui ont un rôle actif de réabsorption de Na^+ et d'excrétion de K^+ , tandis que les

ions Cl^- suivent passivement le gradient électrochimique établi par la réabsorption de Na^+ . Lorsque le débit salivaire augmente, la salive demeure moins longtemps au contact de l'épithélium canalaire qui assure alors moins efficacement son rôle d'échanges ioniques, d'où une augmentation de la concentration en Na^+ et une diminution de celle de K^+ (ORBAN et al., 72).

Pour ce qui concerne les adjonctions au produit salivaire, il est probable que le mode de sécrétion des granules suit les grandes règles habituelles de la sécrétion exocrine : accolement de la membrane des granules à la membrane luminale, ouverture et déversement du produit de sécrétion. Parmi les protéines identifiées, on note la présence d'anhydrase carbonique I et II (GOLDBERG, 28). Ces protéines enzymatiques catalysent une réaction favorisant la présence de bicarbonate dans la salive (LENANDER-LUMIKARI et al., 57).

C'est également au niveau des canaux que transitent des éléments ioniques tel le fluor, ainsi que de nombreux médicaments dont l'élimination se fait par voie salivaire. Des immunoglobulines ont aussi été identifiées à ce niveau dont la biosynthèse et la sécrétion suivent le même schéma que celui que nous avons indiqué à propos des cellules acineuses : assemblage des chaînes légères et lourdes avec la pièce sécrétoire, puis transit soit par voie transcellulaire, soit par voie intercellulaire, en direction de la lumière (GOLDBERG, 28).

2.1.2.1.4 CANAUX EXCRETEURS

➤ ORGANISATION

Le canal est constitué en bordure de lumière, par un épithélium pseudo-stratifié avec de grandes cellules centrales. A la périphérie l'épithélium est constitué de cellules basales, triangulaires et aplaties. On note la présence de cellules caliciformes, toujours peu nombreuses. La structure des canaux excréteurs ne varie pas entre leurs portions proximale, médiane et distale (GOLDBERG, 28).

Les cellules lumineuses ressemblent à celles des canaux striés, cependant elles ne présentent ni chapelets de mitochondries, ni replis typiques des membranes basales des canaux striés. Leurs invaginations, pauvres ou dépourvues de mitochondries, sont probablement impliquées dans des mécanismes de transports ioniques. Les cellules basales sont au contact d'une membrane basale, sur laquelle elles s'ancrent par des héli-desmosomes. Leur rôle exact n'est pas connu (GOLDBERG, 28).

➤ FONCTIONS

Les canaux excréteurs (conduit parotidien et submandibulaire) permettent l'acheminement de la salive, et exercent des modifications ultimes sur la composition de la salive secondaire issue des canaux striés (GOLDBERG, 28).

2.1.2.2 CELLULES NON SECRETRICES

2.1.2.2.1 CELLULES MYOEPITHELIALES

Les cellules myoépithéliales évoquent par leur apparence un panier qui engloberait l'unité sécrétoire, ce qui leur a valu le nom de « cellules en panier » (ORBAN et al., 72). Les cellules myoépithéliales ont un corps cellulaire pourvu d'un noyau mais de peu d'organites et un nombre variable de bras (entre 4 et 8) qui en émergent. Au niveau des acini, l'intégralité de la cellule myoépithéliale est présente : corps cellulaire et bras enserrant l'ensemble des cellules acineuses. Au niveau des canaux striés, on observe que des bras, les corps cellulaires siégeant au niveau des canaux intercalaires (GOLDBERG, 28).

Ce sont des cellules contractiles. Les cellules myoépithéliales exercent une action importante quand l'expulsion rapide du matériel sécrétoire est nécessaire (au cours d'un repas par exemple). Cependant, leur rôle ne semble pas essentiel à cet égard. Les cellules myoépithéliales pourraient aussi limiter la distension des cellules acineuses, surtout des acini contenant un produit de sécrétion très visqueux. Leur rôle dans les systèmes canaux est encore moins clair (GOLDBERG, 28).

Les cellules myoépithéliales ont été observées également dans d'autres tissus que les glandes salivaires (glandes mammaires, glandes lacrymales) : à l'inverse des cellules épithéliales sécrétrices, elles ne sont pas spécifiques des glandes salivaires (GOLDBERG, 28).

2.1.2.2.2 CELLULES DES ESPACES CONJONCTIFS

Les espaces conjonctifs situés entre les acini et les canaux contiennent, en plus des éléments vasculaires et nerveux, deux groupes de cellules (GOLDBERG, 28) :

- Un ensemble de cellules de type fibroblaste est impliqué dans la synthèse et la sécrétion du collagène interstitiel.

- Un autre ensemble de cellules est impliqué dans les réactions de défenses immunitaires. Il s'agit des histiocytes-macrophages et mastocytes, observés dans les glandes salivaires de façon constante, même en l'absence de toute agression locale. Les plasmocytes, présents en grand nombre, sont impliqués dans la synthèse des chaînes légères et lourdes des immunoglobulines salivaires (IgA) (GOLDBERG, 28).

2.1.2.2.3 VAISSEAUX

Les capillaires sont intimement associés aux acini. Ce sont des capillaires fenestrés. Ces amincissements de la paroi des cellules endothéliales, réduite à la simple épaisseur d'une membrane cytoplasmique, permettent la diffusion d'éléments plasmatiques vers les espaces interstitiels qui entourent les acini. L'eau et les précurseurs (ions, acides aminés, monosaccharides, acides gras) transitent par cette voie, traversent la barrière semi-perméable que constitue la membrane basale et sont incorporés dans les cellules acineuses (GOLDBERG, 28).

On observe au niveau des canaux striés un réseau dense de capillaires (ORBAN et al., 72). Des diffusions doivent se produire entre les replis membranaires basaux des canaux striés et ces capillaires. D'autre part, on sait que des substances pharmacologiques transitent depuis la voie sanguine vers la salive secondaire par le biais de ces canaux (GOLDBERG, 28).

2.2 COMPOSANTS DE LA SALIVE

La salive est un mélange complexe formé par le produit de sécrétion des glandes salivaires majeures et mineures et par le fluide sulculaire, elle contient également des bactéries, des débris alimentaires, et des cellules desquamées. Elle est composée à environ 99,5 % d'eau, le reste consistant en divers éléments inorganiques (électrolytes) et organiques (protéines, glycoprotéines, composants plasmatiques...) (PELLERIN et al., 74).

On décrit un débit salivaire non stimulé : il s'agit du débit basal chez le sujet éveillé (PAPARELLA, 73). Ainsi qu'un débit salivaire stimulé : il est quant à lui déclenché principalement par la mastication et/ou des stimuli gustatifs, mais peut également être obtenu artificiellement par des substances pharmacologiques ou des stimuli de nature électrique (DAWES, 11).

En moyenne, le débit salivaire non stimulé est de 0,3 ml/min, ce qui représente sur une durée de 16 heures (durant l'éveil) 300 ml de salive non stimulée quotidienne. Le débit salivaire au cours du sommeil est quasi-nul : le débit des glandes salivaires majeures tombe à zéro, et seules les glandes

salivaires mineures présentent une activité sécrétoire spontanée. Le débit salivaire stimulé peut atteindre un maximum de 7 ml/min, et la salive stimulée représente 80 % à 90 % de la production de salive quotidienne, ce qui amène au total à une production quotidienne de salive de 1 l à 1,5 l (BARDOW et al., 3 ; HUMPHREY et al., 36).

Le débit salivaire, stimulé ou non, montre d'importantes variations interindividuelles. La valeur du débit salivaire non stimulé varie de 0,3 à 0,65 ml/min et est considérée comme normale au dessus de 0,1 ml/min. Celle du débit stimulé varie de 1,5 à 7 ml/min et est considérée comme normale au dessus de 0,2 ml/min. Un débit non stimulé inférieur à 0,1 ml/min est considéré comme une hypo-fonction (BARDOW et al., 3 ; HUMPHREY et al., 36).

Il faut noter que la participation des différentes glandes au débit de sécrétion salivaire varie (cf. Figure 7). En l'absence de stimulation, la glande submandibulaire fournit 69 % du débit salivaire, la glande parotide 26 % et la glande sublinguale 5 %. Lors de la stimulation, ces rapports s'inversent et la glande parotide devient responsable des deux-tiers du débit salivaire (PAPARELLA, 73).

La participation des différentes glandes salivaires varie aussi en ce qui concerne les éléments qu'elles apportent. Les concentrations en électrolytes des salives de la glande parotide ou de la glande submandibulaire sont différentes : la salive parotidienne présente des concentrations plus importantes en protéines ainsi qu'en ions à l'exception du calcium dont la concentration au niveau submandibulaire est presque le double de celle de la parotide (CUMMINGS, 9).

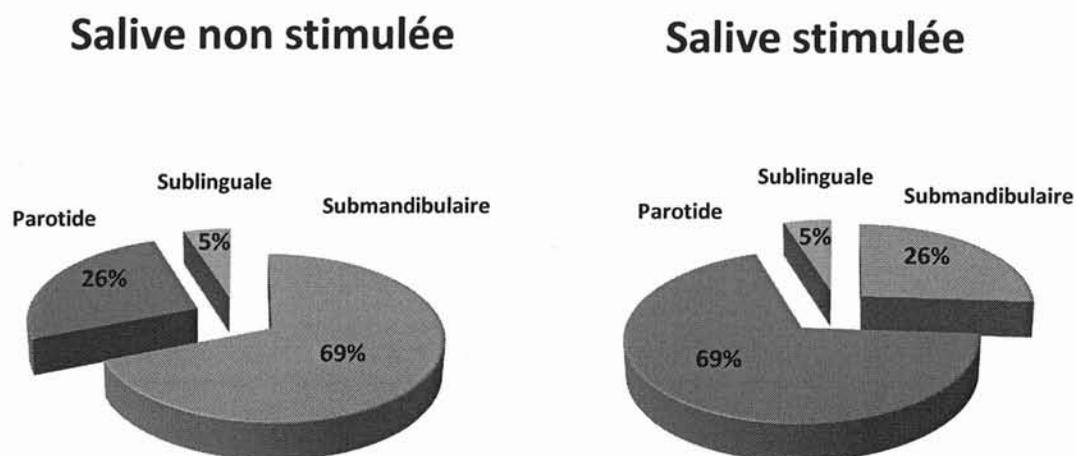


Figure 7 - Participation relative des glandes salivaires majeures au débit salivaire, d'après PAPARELLA (73)

2.2.1 ÉLÉMENTS INORGANIQUES

Les principaux ions inorganiques de la salive sont : sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorure (Cl^-) et bicarbonate (HCO_3^-). On trouve également en plus petites quantités : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), phosphate (PO_4^{3-}), thiocyanate (SCN^-), fluorure (F^-), iodure (I^-), nitrate (NO_3^-) (cf. Tableau 1).

La concentration de ces ions dans la salive est toujours inférieure à celle rencontrée dans le plasma pour les mêmes éléments, exception faite du potassium et des phosphates, cinq fois plus concentrés dans la salive que dans le plasma (REHAK et al., 77).

2.2.1.1 SODIUM, POTASSIUM ET CHLORURE (Na^+ , K^+ , Cl^-)

Les ions Na^+ , K^+ , Cl^- sont issus du plasma et ont principalement pour rôle d'établir l'osmolarité de la salive (concentration moléculaire de toutes les particules osmotiquement actives contenues dans une solution, pouvant engendrer une force de part et d'autre d'une membrane semi-perméable lorsque deux liquides séparés par celle-ci sont inégalement riches en molécules dissoutes). L'osmolarité de la salive est environ la moitié de celle du plasma (EDGAR, 18).

2.2.1.2 BICARBONATE (HCO_3^-)

Les ions bicarbonate, de par leur importante concentration salivaire, participent aussi à la valeur de l'osmolarité de la salive. Leur rôle le plus important est d'assurer le pouvoir tampon salivaire dont ils sont les principaux acteurs (à hauteur de 85 % à 90 %) ; les ions phosphates y participent également dans une moindre mesure (HUMPHREY et al., 36).

2.2.1.3 THIOCYANATE (SCN^-)

Le thiocyanate est le produit de la réaction de détoxification du cyanure (sous forme de traces issues de la fumée de tabac, ou d'aliments) par une enzyme hépatique. L'ion thiocyanate participe à l'action antibactérienne des enzymes peroxydases (PELLERIN et al., 74).

2.2.1.4 CALCIUM ET PHOSPHATES (Ca^{2+} , PO_4^{3-})

Les ions calcium et phosphate ne sont pas entièrement sous forme libre dans la salive : une partie des ions est liée aux protéines ou forme des complexes. Cette part non libre est dite « non

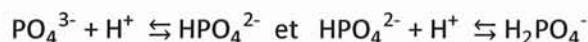
ultrafiltrable » et concerne de 4 % à 20 % des ions calcium et de 6 % à 24 % des ions phosphates. Le restant est rencontré sous la forme libre PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , ou H_2PO_4^- pour les phosphates et Ca^{2+} pour le calcium. Abstraction faite des formes liées des ions, la concentration en calcium et en phosphates est telle que la salive en est sursaturée. En d'autres termes leur concentration atteint des valeurs supérieures au seuil où une précipitation devrait avoir lieu, celle-ci étant en fait inhibée par plusieurs protéines salivaires (PELLERIN et al., 74).

Ces ions jouent un rôle clef dans les mécanismes pH-dépendants de dissolution et reminéralisation de l'hydroxyapatite. L'équilibre dissolution/reminéralisation est décrit par l'équation suivante :



Equation 1 - Equilibre entre dissolution et reminéralisation de l'hydroxyapatite, d'après EDGAR (18)

Si le pH diminue (c'est-à-dire si des ions H^+ sont apportés), les ions OH^- sont neutralisés en eau et les ions PO_4^{3-} sont convertis en HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^- selon l'équation :



Equation 2 - Pouvoir tampon des phosphates, d'après PELLERIN et al. (74)

La solution n'est alors plus sursaturée et la réaction se fait vers la droite (dissolution de l'hydroxyapatite).

Si le pH augmente, la réaction se fait vers la gauche (reminéralisation) car la sursaturation augmente.

Le pH auquel l'équation est en parfait équilibre entre dissolution et reminéralisation est appelé le pH critique, dont la valeur est fixée à $\text{pH} = 5,5$ (PELLERIN et al., 74).

2.2.1.5 FLUORURES (F^-)

La concentration en fluor de la salive est similaire à celle du plasma, et légèrement plus élevée en cas d'apports topiques fréquents (eau, dentifrice fluoré). Les ions fluorure jouent un rôle important dans la prévention des lésions carieuses (EDGAR, 18).

2.2.1.6 MAGNESIUM (Mg^{2+})

La concentration de magnésium dans la salive est très faible. A fort débit salivaire, sa concentration diminue. Cet ion ne semble pas jouer un rôle significatif dans les mécanismes de déminéralisation/reminéralisation, et peu d'études en font mention (MANDEL, 64).

2.2.1.7 NITRATES ET AMMONIUM (NO_3^- , NH_4^+)

Les nitrates, apportés en plus ou moins grandes quantités par l'alimentation (pollution) sont absorbés dans le tractus gastro-intestinal, puis atteignent les glandes salivaires via la circulation sanguine : sécrétés dans la cavité orale, ils sont partiellement réduits en nitrites (NO_2^-) par la flore buccale. Il s'instaure alors un véritable cycle gastro-oral, responsable de la longue demi-vie des nitrates et des nitrites. Ces substances pourraient être à l'origine de la formation de composés nitrés cancérigènes, potentiellement responsables de tumeurs gastriques (PELLERIN et al., 74).

Les ions ammonium pour leur part résultent de l'action des uréases bactériennes sur l'urée présente dans la salive (PELLERIN et al., 74).

Composition de la salive non stimulée				
Composants	Moyenne	Écart type	Intervalle	
Composants inorganiques (mmol/l)				
Calcium *	1,3	0,27	0,88 à 2,05	
Phosphore *	6,0	2,60	1,35 à 13,15	
Sodium *	9,0	6,0	3,0 à 29,0	
Potassium *	21,5	5,7	6,4 à 36,6	
Chlore *	16,0	6,0	0,0 à 27,0	
Magnésium *	0,22	0,11	0,08 à 0,56	
Dioxyde de carbone total *	4,0	3,0	0,0 à 11,0	
Ammonium *	4,5	1,5	2,9 à 6,8	
Bicarbonate **	3,0	-	1,0 à 30,0	
Fluorure **	-	-	0,52 · 10 ⁻³ à 15,0 · 10 ⁻³	
Iode **	0,010	-	0,005 à 0,020	
Nitrates et nitrites **	0,10	-	0,002 à 3,70	
Thiocyanate **	1,5	-	-	
Composants organiques				
Protéines totales ** (g/l)	3,2	-	3 à 3,4	
Glucose * (mmol/l)	< 0,1	-	-	
Albumine * (g/l)	≈ 1	-	-	
Acide urique * (μmol/l)	180	120	40 à 360	
Amylase * (U/l)	73 242	58 402	11 880 à 304 720	
Osmolalité (mmol/kg) *	77	17	52 à 111	
pH ****	6,79	-	5,86 à 7,54	

Composition de la salive stimulée				
Composants	Moyenne	Écart type	Intervalle	
Composants inorganiques (mmol/l) ***				
Sodium	32,40	20,50	-	
Potassium	24,80	9,90	-	
Calcium	1,83	1,02	-	
Chlore	22,10	8,50	-	
Phosphore	8,10	5,60	-	
Composants organiques (g/l) ***				
Protéines totales	1,75	0,89	-	
Glucose	1,20	1,38	-	

* d'après REHAK ; ** d'après PELLERIN ; *** d'après FERGUSON ; **** d'après FENOLL-PALOMARES

Tableau 1 - Composition de la salive totale, d'après FENOLL-PALOMARES et al. (22) ; FERGUSON et al. (23) ; PELLERIN et al. (74) ; REHAK et al. (77)

2.2.2 ÉLÉMENTS ORGANIQUES

Les constituants organiques sont quantitativement peu importants (cf. Tableau 1) dans la salive puisqu'on les trouve à la concentration moyenne de 3 à 3,4 g/l (à comparer par exemple aux 70 g/l du plasma sanguin).

Les protéines représentent l'élément majoritaire du matériel organique des sécrétions salivaires (PELLERIN et al., 74).

2.2.2.1 LES PROTEINES SALIVAIRES

La concentration en protéines peut varier de 1 à 3 g/l de salive selon le degré de stimulation de sécrétion et la méthode de dosage. La salive parotidienne s'avère être plus riche en protéines que la salive submandibulaire (PELLERIN et al., 74).

Ces protéines sont fort diverses : des glycoprotéines, des protéines à activité enzymatique, des immunoglobulines, des protéines plasmatiques... On ne retrouve pas obligatoirement chez chaque sujet toutes les protéines jusqu'ici découvertes (PELLERIN et al., 74).

2.2.2.1.1 LES PROTEINES SALIVAIRES RICHES EN PROLINE (PRP)

L'analyse des acides aminés des protéines totales (non fractionnées) de salive mixte révèle l'existence d'une proportion importante et tout à fait inhabituelle de proline (16 % à 33 % des acides aminés). Il est donc manifeste que la salive possède un groupe de protéines tout à fait particulier qu'il est convenu d'appeler protéines riches en proline (PRP). Ces protéines forment un groupe hétérogène caractérisé par une prédominance des acides aminés proline, glycine, glutamate (la proline étant dominante) qui représentent 80% de leurs acides aminés (PELLERIN et al., 74).

Cette famille peut être divisée en trois sous-groupes :

- PRP à caractère acide : 30 % des protéines totales des salives parotidienne et submandibulaire.

Il s'agit de protéines spécifiques aux glandes salivaires car on ne les retrouve dans aucune autre sécrétion (PELLERIN et al., 74). Elles font partie de la pellicule acquise exogène, retardant ainsi les mouvements d'ions entre la surface de l'émail et les fluides environnants. Ces protéines pourraient aussi contribuer au maintien d'une concentration constante en Ca^{2+} (HAY et al., 31 ; SCHENKELS et al., 80)

- PRP à caractère basique : 23 %

Ces protéines sont issues de la glande parotide uniquement (MESSANA et al., 66). Elles ont un rôle lubrifiant qui protège l'émail face aux forces de frottement lors de la mastication. Et elles protègent contre les tannins alimentaires, en formant des complexes afin d'en réduire les effets nocifs (SCHENKELS et al., 80).

- PRP glycosylées : 17 %

2.2.2.1.2 LA STATHERINE, LES CYSTATINES ET LES HISTATINES

La stathérine est présente au niveau des glandes parotide, submandibulaire, mais aussi dans les sécrétions nasales, bronchiques et les larmes. Elle semble inhiber la précipitation et la croissance des cristaux de phosphate de calcium. Ces propriétés mettraient la salive dans des conditions de sursaturation, mais néanmoins stables, nécessaires aussi bien à la stabilisation et à la recalcification de l'émail de surface, qu'à l'inhibition de la formation de lithiases au sein des canaux excréteurs des glandes salivaires. (SCHENKELS et al., 80).

Les cystatines sont des protéines présentes dans toutes les sécrétions muqueuses du corps. Elles jouent un rôle protecteur par leur action d'inhibiteur des protéinases (SCHENKELS et al., 80).

Les histatines sont une famille de peptides riches en histidine, neutres ou basiques, sécrétés principalement par la parotide. On recense 12 variantes de cette protéine. Elles ont un grand rôle antimicrobien, grâce à leur capacité à neutraliser les lipopolysaccharides membranaires des bactéries Gram négatif et grâce à leur capacité à inhiber la croissance de *Candida Albicans*. Elles contribuent également à la pellicule exogène acquise (MESSANA et al., 66 ; SCHENKELS et al., 80).

2.2.2.1.3 LES GLYCOPROTEINES SALIVAIRES

2.2.2.1.3.1 LES MUCINES

Les glycoprotéines salivaires, encore appelées mucines, sont les constituants majeurs des mucus épithéliaux, sécrétions très visqueuses que l'on retrouve dans les tractus trachéo-bronchial, gastro-intestinal et génital. Les glycoprotéines sont des protéines auxquelles sont liées de manière covalente (liaison forte) des chaînes glucidiques, et qui sont très répandues dans les tissus animaux. Elles sont constituées de protéines à hauteur de 15 à 20 % et de 80 % de glucides (OFFNER et al., 70).

Elles se répartissent en plusieurs classes : les mucines lourdes formant des gels (MUC2, MUC5AC, MUC5B, MUC6), les mucines lourdes associées aux membranes (MUC1, MUC3, MUC4, MUC12), et les mucines légères solubles (MUC7). Les mucines restantes sont encore trop mal connues pour être classées, et d'autres mucines continuent à être identifiées, complétant ainsi cette liste (OFFNER et al., 70).

Structure

Le squelette protéique comprend trois régions : le domaine N-terminal et le domaine C-terminal sont faiblement glycosylés, et riches en cystéine. Le domaine central est lui composé de séquences d'acides aminés répétées en tandem riches en sérine et thréonine. Au sein de l'appareil de GOLGI et avant la formation des granules sécrétoires, des chaînes latérales glucidiques de 1 à 20 oses seront greffées sur ces acides aminés de la région centrale, principalement par des liaisons O-glycosidiques, tandis qu'aura lieu un assemblage multi-mérique de ces protéines (OFFNER et al., 70 ; SCHENKELS et al., 80).

Les chaînes glycosidiques se terminent toujours par un acide sialique ou un fucose. Compte tenu des fortes charges négatives en présence, un repoussement mutuel électrostatique maintient la molécule en forme allongée de bâtonnet, ce qui confère leurs propriétés visco-élastiques aux mucines en solution aqueuse (PELLERIN et al., 74).

Rôles

Les mucines confèrent à la salive ses propriétés viscoélastiques, jouant ainsi un rôle dans la mastication, la phonation et la déglutition. Les mucines sont capables de recouvrir et lubrifier les muqueuses, l'émail et le bol alimentaire jusqu'à l'estomac. D'autre part, les glycoprotéines salivaires peuvent agglutiner les germes oraux, empêchant ainsi la colonisation de l'épithélium, et facilitant leur élimination. Par contre, si des glycoprotéines font partie de la pellicule acquise exogène, l'agglutination de micro-organismes à la surface de la dent sera favorisée (OFFNER et al., 70 ; SCHENKELS et al., 80).

2.2.2.1.3.2 GLYCOPROTEINES A ACTIVITE GROUPE SANGUIN

Dans toutes les sécrétions muqueuses (suc gastrique, liquide amniotique, salive) on retrouve sous forme de glycoprotéines les chaînes polyosidiques spécifiques des groupes sanguins. A partir d'une substance précurseur, les diverses substances H, A, B, Lewis a (Le^a), Lewis b (Le^b) se forment grâce à des transférases spécifiques. Ces diverses substances sont sécrétées à une concentration de 30 mg/l

de salive environ, soit plusieurs centaines de fois plus que dans les globules rouges (PELLERIN et al., 74).

2.2.2.1.3.3 IMMUNOGLOBULINES

Ce sont des protéines globulaires de type glycoprotéine qui constituent les anticorps. Les immunoglobulines A (IgA) sont les plus abondantes, mais on trouve aussi des IgM, des IgG (EDGAR, 18).

Les IgA sont présentes dans la salive sous forme d'IgA sécrétoires (IgAs) composées de deux IgA dimériques reliées par une pièce J, et d'une pièce SP, dite pièce sécrétoire (cf. Figure 8). SP joue un rôle dans le transport des IgAs dans le parenchyme des glandes salivaires et lui confère une résistance accrue à l'action protéolytique. Les IgAs, que l'on trouve surtout dans les salives issues des parotides et des glandes accessoires, sont synthétisées in situ par les plasmocytes à IgA du tissu interstitiel des glandes et des muqueuses : la pièce sécrétoire SP est produite par les cellules épithéliales (ORBAN et al., 72 ; SCHENKELS et al., 80).

Les IgAs salivaires jouent un rôle protecteur car elles peuvent se combiner in vivo avec des bactéries, empêchant celles-ci d'adhérer aux tissus de la cavité buccale (ORBAN et al., 72). Les IgAs sont également capables de neutraliser les antigènes de virus, toxines et enzymes (SCHENKELS et al., 80).

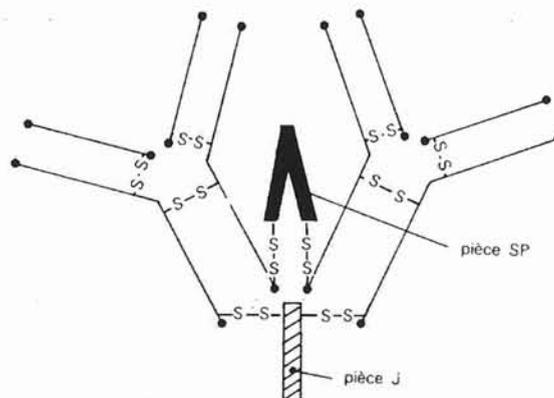


Figure 8 - Structure d'une Immunoglobuline A, d'après PELLERIN et al. (74)

2.2.2.1.4 LES ENZYMES SALIVAIRES

Elles sont diverses mais peu d'entre elles semblent jouer un rôle important au sein du milieu buccal, l'enzyme principale étant l' α -amylase.

2.2.2.1.4.1 ENZYMES DIGESTIVES

➤ α -AMYLASE

L' α -amylase est la seule enzyme « digestive » importante de la salive : elle représente de 40 à 50 % de l'ensemble des protéines de la salive mixte (PELLERIN et al., 74).

Rôles

L'amylase salivaire est une enzyme qui catalyse l'hydrolyse des liaisons $\alpha(1,4)$ glycosidiques des amidons (amylose et amylopectine) avec un pH optimum voisin de 6 à 8 et en présence d'ions chlorure. Les produits de l'hydrolyse sont variés : du maltose, un peu de glucose, et des oligosaccharides. En fait l'amylase ne peut attaquer que l'amidon cuit (la chaleur de cuisson solubilise l'enveloppe externe des granules d'amidon et permet la mise en contact enzyme-amidon colloïdal). La proportion d'amidon ainsi hydrolysé par l'amylase salivaire pourrait atteindre 60 % (EDGAR, 18 ; PELLERIN et al., 74 ; SCHENKELS et al., 80).

2.2.2.1.4.2 ENZYMES IMPLIQUEES DANS LES MECANISMES DE DEFENSE

➤ LE SYSTEME PEROXYDASE

Le système peroxydase est l'un des facteurs de défense non spécifique de la salive: il permet la formation d'hypothiocyanites fortement oxydants et donc très antibactériens. Les principaux composants de ce système sont les différentes formes de lactopéroxydases sécrétées par les glandes salivaires elles-mêmes et de myéloperoxydases des leucocytes polynucléaires. Les hypothiocyanites et l'acide hypothiocyaneux inhibent la croissance d'une grande variété de bactéries gram positif et gram négatif, de champignons, de virus, de mycoplasmes et de certaines cellules cancéreuses. Les peroxydases peuvent s'adsorber en surface de l'émail, et, en présence de ses cofacteurs, inhiber certaines enzymes-clé de la glycolyse (PELLERIN et al., 74).

➤ LE LYSOZYME

Le lysozyme est un autre facteur de défense non spécifique bien connu pour son pouvoir antibactérien : il présente la capacité de détruire les parois bactériennes par son activité enzymatique dirigée contre les liaisons $\beta(1,4)$ glycosidiques des peptidoglycanes membranaires. Une fois sa paroi détruite, la bactérie vulnérabilisée est facilement lysée (SCHENKELS et al., 80).

➤ LA LACTOFERRINE

La lactoferrine est une protéine liant le fer présent sous forme libre dans la salive, elle diminue ainsi la disponibilité de cet élément nécessaire à la croissance bactérienne (EDGAR, 18). D'autre part, en la présence d'anticorps spécifiques, la lactoferrine non saturée en fer est capable d'accroître l'effet inhibiteur des anticorps sur les microorganismes (ORBAN et al., 72).

➤ LES ANHYDRASES CARBONIQUES

L'anhydrase carbonique permet de maintenir constant le pH dans de nombreux tissus et liquides biologiques car elle catalyse la réaction d'hydratation du dioxyde de carbone. Cette réaction produit l'ion bicarbonate, principale source du pouvoir tampon à la salive.



Equation 3 - Formation de bicarbonate par hydratation du dioxyde de carbone, d'après LENANDER-LUMIKARI et al. (57)

On a recensé 11 isoenzymes à activité anhydrase carbonique, dont au moins deux jouent un rôle dans la régulation du pH salivaire : l'anhydrase carbonique II et VI.

L'anhydrase carbonique II est une enzyme cytosolique (donc non présente dans la salive) très active située dans les cellules acineuses séreuses des glandes parotide et submandibulaire, et responsable de l'ajout de bicarbonate à la salive lors de sa sécrétion. L'anhydrase carbonique VI est très différente car elle est excrétée directement dans la salive. Elle n'agit pas directement sur la régulation du pH salivaire mais va se lier à l'émail dentaire et catalyser la formation de CO_2 et d'eau à partir du bicarbonate présent dans la salive et des ions H^+ libérés par les bactéries acidogènes de la plaque. Son rôle protecteur vis-à-vis des tissus dentaires minéralisés est très important : une baisse anormale de la concentration de cette enzyme dans la salive s'accompagne d'une prévalence carieuse accrue (LENANDER-LUMIKARI et al., 57).

2.2.2.1.4.3 AUTRES ENZYMES

On peut retrouver au sein de la salive des enzymes provenant des bactéries, des glandes salivaires, du fluide gingival, des leucocytes, des cellules épithéliales et de l'alimentation. Les bactéries sont essentiellement à l'origine des uréases, lactico-déshydrogénases, désaminases, catalases, collagénases, protéases... Dans la salive pure (surtout parotidienne), on peut trouver des activités anhydrase carbonique, phosphatase acide, β -glucuronidase, aldolase, choline-estérase, estérase, succinate-déshydrogénase, transaminase (TGO, TGP), galactosyl-transférase... L'activité enzymatique globale de la salive totale est plus forte chez les patients atteints de parodontopathies (contribution d'autres éléments du milieu buccal tels que fluide gingival, bactéries, leucocytes, cellules épithéliales...) (PELLERIN et al., 74).

2.2.2.2 L'UREE

La concentration en urée salivaire suit plus ou moins régulièrement les fluctuations de l'urée sanguine (la teneur en urée de la salive parotidienne représente 86 % de la concentration plasmatique, alors qu'elle tombe à 31 % dans la salive totale) ; par exemple, lors d'insuffisance rénale non compensée, le taux d'urée et le pH salivaire augmentent fortement. Dans la salive, l'urée est rapidement transformée par des uréases bactériennes. Cette transformation est responsable de la formation d'ions ammonium NH_4^+ dans la salive et de la hausse de son pH (PELLERIN et al., 74).

2.2.2.3 LES LIPIDES SALIVAIRES

La concentration oscille entre 20 et 30 mg/l de salive (contre 5 à 7 g/l dans le plasma). Les lipides non phosphorés représenteraient 73 % de l'ensemble (triglycérides, monoglycérides, diglycérides, cholestérol libre et estérifié) et les lipides phosphorés 27 % (phosphatidylcholines, phosphatidyléthanolamines, sphingomyélines, acides phosphatidiques, polyglycéro-Phosphatides). Les glandes salivaires peuvent synthétiser de nombreux lipides et acides gras à partir de précurseurs simples : ce métabolisme est très dépendant du régime alimentaire. Certains acides gras semblent inhiber l'adsorption de telle ou telle bactérie sur l'hydroxyapatite. D'autre part, les lipides salivaires pourraient contribuer à la minéralisation de la plaque (PELLERIN et al., 74).

2.2.2.4 LES SUCRES SALIVAIRES

L'étude du glucose salivaire pose problème, car il est impossible de distinguer le glucose réellement excrété par les glandes (et qui pourrait refléter la glycémie), le glucose libéré à partir des glycoprotéines, et le glucose de l'alimentation (salive mixte ou totale). En moyenne, la glycosalie (concentration en glucose de salive prélevée à la sortie des canaux) est de 5 à 10 mg/l (28 ou 55 $\mu\text{mol/l}$), soit cent fois inférieure à la concentration plasmatique. Une augmentation volontaire de la glycémie (par perfusion de glucose par exemple) entraînera une augmentation plus ou moins proportionnelle de la glycosalie ; mais une détermination isolée de la teneur en glucose salivaire ne peut donner d'indication intéressante sur la glycémie (PELLERIN et al., 74).

2.3 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA SALIVE

2.3.1 TEMPERATURE

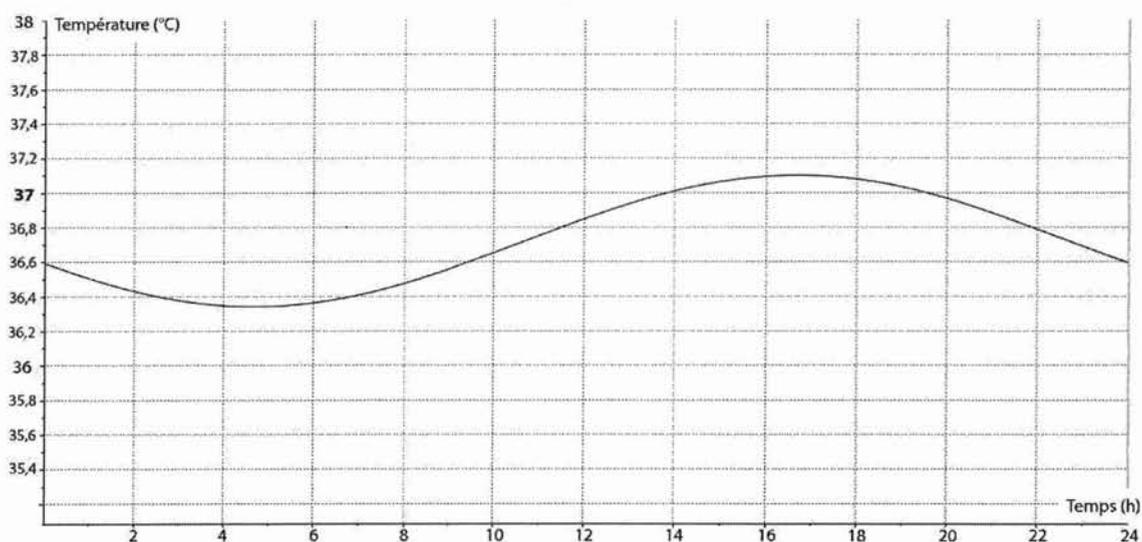


Figure 9 - Variations circadiennes de la température orale, d'après DAWES (12)

La température orale, et donc celle du milieu salivaire, présente d'importantes variations circadiennes (cf. Figure 9). Ses valeurs oscillent entre 36,2 et 37,2 degrés Celsius, avec une périodicité de 24 heures et une acrophase (le pic de la sinusoïde) l'après-midi vers 16h40 (DAWES, 12).

2.3.2 PH

La valeur du pH salivaire dépend principalement du dioxyde de carbone excrété dans la salive et du rapport de concentration entre sa forme libre et combinée (notamment sous forme de bicarbonate). Ainsi le pH salivaire varie selon la teneur en CO₂ du sang (CUMMINGS, 9).

Le pH de la salive non stimulée est en moyenne de 6,79 chez un sujet sain (FENOLL-PALOMARES et al., 22). Toutefois, contrairement au milieu sanguin où la valeur du pH est très finement régulée, on observe d'importantes fluctuations du pH dans la salive entre différents prélèvements chez un même sujet, dans un intervalle de 0,91 unités pH (LARSEN et al., 55). Dans le cas de prélèvements au sein de la population générale, on peut observer comme valeurs limites des pH allant de 5,86 à 7,54 (FENOLL-PALOMARES et al., 22).

D'autre part, de nombreuses boissons ont un pH très acide (par exemple, le pH d'une boisson au cola peut atteindre 2,64 et celui d'un jus d'orange 3,49). Leur consommation a un effet direct sur le pH salivaire (cf. Figure 10). Cependant la salive a la capacité de juguler ces baisses rapides de pH par son pouvoir tampon et son renouvellement, si bien que le pH salivaire retrouve sa valeur initiale dans un délai assez bref d'environ 20 minutes (HAGGARD et al., 30). On peut donc considérer que la prise de boissons acides a un effet négligeable sur les variations du pH salivaire à long terme, dans le cadre d'une consommation « normale » (HAGGARD et al., 30).

Enfin, on assiste dans la cavité buccale à la production d'acides organiques par la plaque dentaire, lorsque celle-ci est mise en présence de sucres (LAGERLOF et al., 53). Ces produits bactériens dépendent du régime alimentaire, les principaux acides organiques rencontrés sont l'acide lactique, l'acide acétique, et l'acide formique. La libération de ces acides s'accompagne d'une chute du pH dans la plaque, entraînant une déminéralisation des tissus dentaires : c'est le mécanisme de formation des caries (LENANDER-LUMIKARI et al., 57). Là aussi, la salive joue un rôle majeur dans la protection contre ces chutes de pH, par son pouvoir tampon et son renouvellement (LAGERLOF et al., 53). Cependant, l'acidité ainsi produite reste cantonnée au niveau de la plaque et de son site d'adhésion sans répercussion sur l'ensemble du milieu salivaire. L'évaluation du pH salivaire sur une période de 1 h 30 après ingestion d'aliments sucrés ne montre que des variations mineures, non significatives (HAGGARD et al., 30).

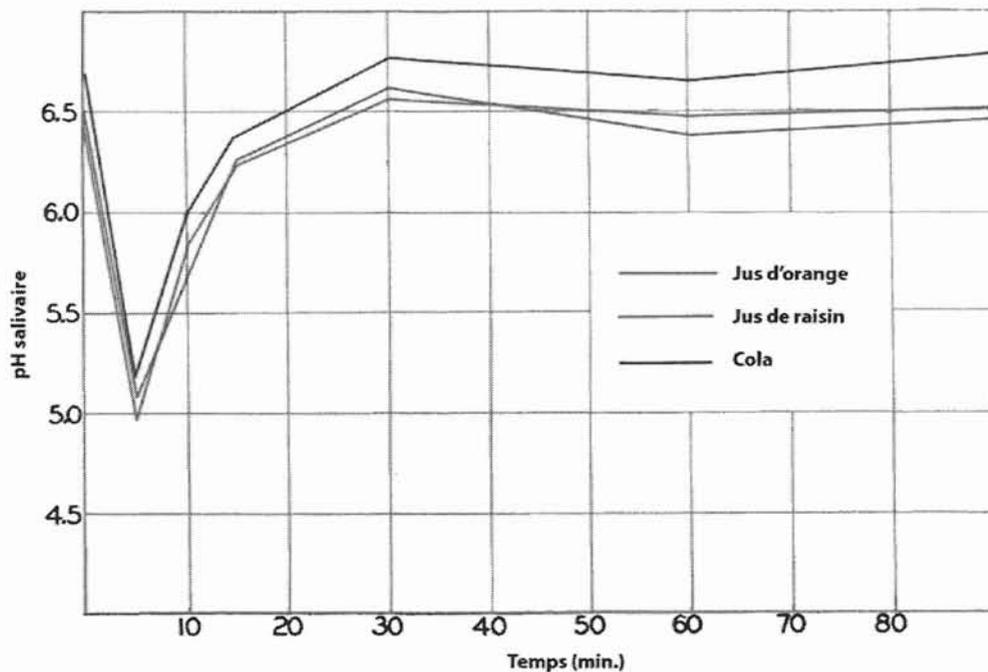
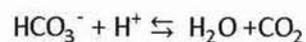


Figure 10 - Variations dans le temps du pH salivaire après ingestion d'une boisson acide, d'après HAGGARD et al. (30)

2.3.3 POUVOIR TAMPON

Le pouvoir tampon de la salive, stimulée ou non stimulée, met en jeu trois systèmes tampon : les bicarbonates, les phosphates, et les protéines. Ces différents systèmes tampon ont des domaines de pH optimum (pour lesquels leur pouvoir tampon est maximal) différents : de 6,1 à 6,3 pour les bicarbonates, et de 6,8 à 7,0 pour les phosphates (LENANDER-LUMIKARI et al., 57).

Le système tampon bicarbonate apporte la plus importante contribution au pouvoir tampon salivaire, il agit notamment pendant la prise alimentaire et la mastication, lorsque le débit salivaire est important. On peut considérer que, devant une concentration de bicarbonate inférieure à 1,8 mmol/l, le pouvoir tampon salivaire se trouve amoindri (FENOLL-PALOMARES et al., 22). La neutralisation des acides par le système tampon bicarbonate se fait selon la formule suivante :



Equation 4 - Action du système tampon bicarbonate, d'après LENANDER-LUMIKARI et al. (57)

En comparaison, les systèmes phosphates et protéines jouent uniquement un rôle mineur. Le système tampon phosphates agit sur un mode similaire à celui du bicarbonate (cf. Equation 2, page 19), son action est plus discrète, mais il est moins dépendant du débit salivaire pour son efficacité (LENANDER-LUMIKARI et al., 57).

Le pouvoir tampon de la salive naturelle a été évalué à $5,7 \mu\text{Eq.ml}^{-1}$ pour une titration à l'acide, à température ambiante ($\approx 24^\circ\text{C}$) et en équilibre avec l'air (GAL et al., 25).

2.3.4 VISCOSITE ET POUVOIR LUBRIFIANT

Une autre propriété importante de la salive est sa capacité de lubrification (propriété d'une substance de réduire la friction entre deux surfaces en mouvement). Si on étudie expérimentalement la friction entre deux surfaces de silice, on constate que la salive utilisée comme lubrifiant peut réduire la friction d'un facteur 20 par rapport à une solution de sérum physiologique (SCHIPPER et al., 82). Ce sont les protéines salivaires qui lui confèrent son pouvoir lubrifiant, principalement : les mucines, les stathérines, les PRP acides, l'amylase (SCHIPPER et al., 82).

Ces mêmes protéines sont également responsables de la viscosité de la salive. Ce paramètre revêt également une certaine importance car la viscosité du milieu salivaire influence la vitesse de diffusion des solutés et donc la vitesse des réactions (DE QUEIROZ et al., 15). Les valeurs observées sont assez variables, de l'ordre de 1,5 à 6 mPa.s (SCHIPPER et al., 82).

La viscosité et le pouvoir lubrifiant sont deux paramètres distincts, en effet la salive issue des glandes sublinguale et submandibulaire est deux fois plus visqueuse que celle issue de la glande parotide, en revanche leur pouvoir lubrifiant est identique (SCHIPPER et al., 82).

2.4 VARIATIONS DE LA COMPOSITION DE LA SALIVE

Les différents composants de la salive tant organiques qu'inorganiques, et par conséquent les propriétés du milieu salivaire (pH, pouvoir tampon...) décrivent des variations très importantes.

Ces variations existent au niveau inter individuel et intra-individuel.

2.4.1 VARIATIONS INTER-INDIVIDUELLES

2.4.1.1 POLYMORPHISME GENIQUE

Le contenu en protéines de la salive varie selon les personnes, en termes de concentration mais aussi d'espèces présentes du fait du polymorphisme des allèles codant pour ces protéines au sein de la population. Ainsi les PRP à caractère acide par exemple, sont codées par 2 loci sur le chromosome 12p13 : PRH1 (possédant 3 allèles : Db, PIF, Pa) et PRH2 (2 allèles : Pr1, Pr2). Chaque allèle donne naissance à deux PRP par clivage post-traductionnel ou dimérisation. Par conséquent, du fait de ce polymorphisme allélique, selon les individus on peut trouver dans la salive uniquement 4 des 10 variétés de PRP acides s'ils sont homozygotes pour les deux loci, 6 s'ils sont hétérozygotes sur un locus ou 8 types s'ils sont hétérozygotes sur les deux loci (HAY et al., 31 ; HUMPHREY et al., 36).

2.4.1.2 LE SEXE

Il existe des différences significatives entre hommes et femmes concernant le débit de sécrétion non stimulé. Ces différences s'expliquent par le fait que la taille des glandes parotides et submandibulaires est plus importante chez l'homme, le débit de sécrétion salivaire stimulé et non stimulé étant corrélé à la taille des glandes salivaires parotide et submandibulaire (INOUE et al., 40).

En revanche on n'observe pas de différence significative liée au sexe concernant les concentrations en électrolytes (du moins le Na⁺ et K⁺), en protéines ou le pH (INOUE et al., 40).

2.4.1.3 CONDITION PHYSIQUE ET PATHOLOGIES

2.4.1.3.1 EXERCICE

BEN-ARYEH et al. (5) ont démontré que l'exercice peut avoir des répercussions sur la composition et le débit salivaire : à l'issue d'une activité physique intense, le débit salivaire non stimulé est réduit de moitié, et on observe des concentrations salivaires plus importantes en potassium, en magnésium et en protéines.

2.4.1.3.2 PATHOLOGIES

De nombreuses maladies systémiques affectent les glandes salivaires directement ou indirectement, et peuvent avoir un effet sur le débit et la composition de la salive. Une revue de la littérature a été faite par KAUFMAN et al. (47), traitant des pathologies en question, dont voici une liste non exhaustive:

- Maladies auto-immunes : syndrome de Sjögren, maladies rhumatoïdes
- Maladies héréditaires : mucoviscidose, maladie coéliquaue
- Maladies neurologiques : maladie de Parkinson, maladie d'Alzheimer
- Cancers
- VIH (virus du sida)
- Stress et désordre affectif
- Autres : troubles hépatiques et rénaux, hypertension, asthme

On retrouve pour la plupart de ces pathologies une diminution du débit salivaire : c'est le cas dans le syndrome de Sjögren, la mucoviscidose (KAUFMAN et al., 47), l'asthme (LENANDER-LUMIKARI et al., 56), ainsi que chez les personnes soumises à un stress psychologique (SOMER et al., 84).

On retrouve également des variations des concentrations des composants salivaires : ainsi par exemple les sujets souffrant de mucoviscidose ont des concentrations plus élevées en Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , PO_4^{3-} , urée, et protéines ; dans le cadre du syndrome de Sjögren, les concentrations de Na^+ , Cl^- et IgA sont augmentées, tandis que celle de PO_4^{3-} diminue (KAUFMAN et al., 47).

2.4.2 VARIATIONS INTRA-INDIVIDUELLES

2.4.2.1 VARIATIONS EN FONCTION DU DEBIT DE SECRETION ET DE LA GLANDE

2.4.2.1.1 LE DEBIT

Les concentrations des différents composants de la salive varient inégalement en fonction du débit salivaire (cf. Figure 11).

Quand le débit salivaire devient légèrement supérieur au débit non stimulé, les concentrations de sodium et bicarbonate augmentent, les concentrations de potassium, phosphate, chlorure, urée et protéines diminuent; le pH augmente (DAWES, 11).

Quand le débit est augmenté de manière plus importante, les concentrations de sodium, calcium, chlorure, bicarbonate et protéines augmentent, la concentration de phosphate diminue et celle de potassium évolue peu; le pH augmente (DAWES, 11).

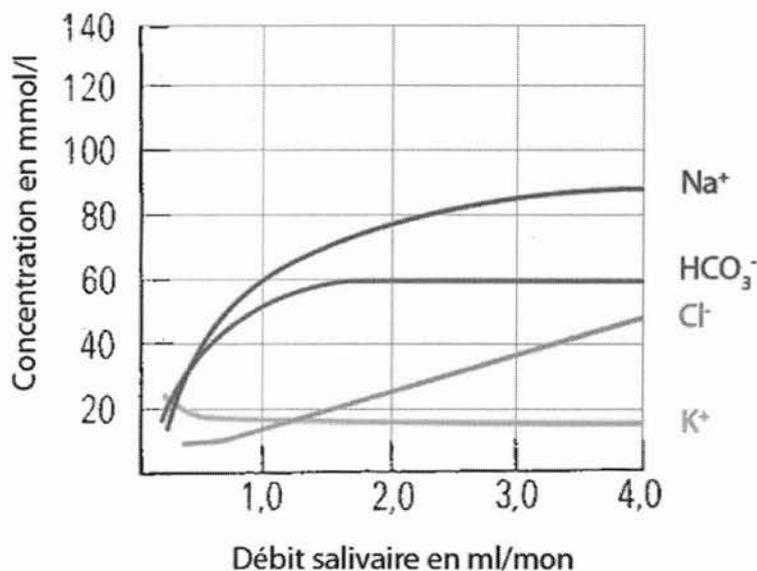


Figure 11 - Variation des concentrations des composants salivaires avec l'augmentation du débit salivaire, d'après LAMB et al. (54)

2.4.2.1.1.1 FACTEURS DE VARIATION DU DÉBIT SALIVAIRE

- Le débit salivaire suit des variations circadiennes (cf. "2.4.2.2.1 Variations circadiennes" page 37)
- Le débit salivaire suit des variations circannuelles (cf. "2.4.2.2.2 Variations circannuelles" page 40)
- La déshydratation cause une réduction du débit salivaire, tandis que l'hyperhydratation cause une augmentation du débit salivaire non stimulé mais n'affecte pas le débit salivaire stimulé (DAWES, 11).
- L'âge, pour certains auteurs, serait responsable d'une diminution du débit salivaire. Ainsi NAGLER et al. (69) décrivent une diminution de 62 % du débit salivaire chez le sujet âgé.

- Certains médicaments ont un effet sur le débit salivaire (cf. "2.4.2.4.2 Prise de médicaments" page 43)

2.4.2.1.2 LA GLANDE

La salive issue de la glande parotide présente des concentrations relativement faibles en calcium et fortes en phosphates comparativement aux glandes submandibulaires et sublinguales. De même en ce qui concerne les protéines, la majeure partie des amylases salivaires est issue des glandes parotides. Et de manière générale la concentration de protéines dans la salive parotidienne est plus importante que dans les autres glandes (cf. Tableau 2) (DAWES, 11).

Les sécrétions issues des glandes salivaires mineures sont atypiques en composition puisque le principal anion qu'elles excrètent est le chlorure, avec quasi-absence de bicarbonate, peu de phosphate et pas d'amylase (DAWES, 11).

Ainsi tout facteur entraînant un changement du taux de participation des différentes glandes à la salive mixte (tel un changement du débit salivaire) s'accompagne nécessairement de modifications de la composition de celle-ci. (DAWES, 11)

Différences de composition salivaire selon la glande		
Composants	Glande parotide	Glande submandibulaire
Composants inorganiques (mmol/l)		
K ⁺	20	17
Na ⁺	23	21
Cl ⁻	23	20
HCO ₃ ⁻	20	18
Ca ²⁺	2	3,6
Mg ²⁺	0,2	0,3
HPO ₄ ²⁻	6	4,5
Composants organiques (mg/dl)		
Urée	15	7
Ammoniac	0,3	0,2
Acide urique	3	2
Glucose	< 1	< 1
Cholestérol	< 1	-
Acides gras	1	-
Lipides totaux	2 à 6	2 à 6
Acides aminés	1,5	-
Protéines	250	150

Tableau 2 - Comparaison des concentrations de certains composants de la salive parotidienne et submandibulaire, d'après CUMMINGS (9)

2.4.2.2 VARIATIONS CIRCADIENNES ET CIRCANNUELLES

2.4.2.2.1 VARIATIONS CIRCADIENNES

Plusieurs auteurs ont mis en évidence l'existence de fluctuations dans la composition de la salive au cours de la journée pour un même sujet. La concentration de certains ions décrit une courbe sinusoïdale (cf. Figure 12) avec un maximum et un minimum par 24 heures (DAWES, 12).

Ces fluctuations peuvent être décrites par l'équation suivante :

$$f(t) = C_o + C \times \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau} + \phi\right)$$

Equation 5 - Expression de la concentration d'un composant salivaire donné en fonction du temps, d'après DAWES (12)

Où t = temps (en heures)

ϕ = acrophase (instant du pic, donné en degrés, avec $15^\circ \leftrightarrow 1h$)

τ = période étudiée (en heures)

C = amplitude du rythme (en mmol/l)

C_o = valeur moyenne des séries (en mmol/l)

L'étude menée par DAWES a mis en évidence l'existence de rythmes circadiens significatifs dans la salive totale non stimulée uniquement pour les ions sodium (Na^+) et chlorure (Cl^-). Les autres composants donnent des résultats non significatifs, et pour la plupart des sinusoïdes très plates. Les courbes de Na^+ et Cl^- sont en phase, avec un pic maximum situé vers 5h00, un minimum vers 17h00 et la même amplitude (cf. Tableau 3). L'étendue des variations circadiennes de concentration représente environ 30 % de la valeur moyenne de la concentration de Na^+ et 70 % de la valeur moyenne de la concentration de Cl^- (DAWES, 12).

Il faut toutefois noter que l'étude de salive pure issue des glandes majeures isolées présente des variations circadiennes significatives pour un plus grand nombre de composants que la salive totale : l'étude de la salive parotidienne non stimulée montre des rythmes circadiens pour les ions sodium, chlorure, potassium, calcium, et les protéines (DAWES, 12). L'étude de la salive submandibulaire non

stimulée montre des rythmes circadiens pour les ions sodium, chlorure, potassium, phosphate, magnésium (DAWES, 13). On peut alors se demander pourquoi, dans la salive totale non stimulée on ne retrouve que des rythmes circadiens pour deux ions (sodium et potassium). L'explication résiderait dans le fait que la salive totale est formée par le mélange des salives issues de toutes ces glandes, la contribution de chacune variant suffisamment au cours de la journée pour brouiller l'impression de rythme dans la salive totale pour la plupart des composants (DAWES, 12).

Les variations circadiennes ne comptent que pour jusqu'à 50 % de l'étendue des variations de concentration des composants de la salive, tous facteurs confondus. Cela nous rappelle le caractère multifactoriel de ces variations, les rythmes chronobiologiques n'étant qu'un facteur parmi d'autres (DAWES, 12).

D'autres études ont également été menées par FERGUSSON sur les variations circadiennes de la composition de la salive totale stimulée lors de la mastication : dans ces conditions aussi, on constate l'existence de rythmes dans les concentrations de sodium et chlorure, mais aussi de phosphates. Là aussi, le pic survient tôt le matin, entre 3h00 et 5h00 (FERGUSON et al., 23).

Enfin il faut noter que, de même que la composition, le débit de sécrétion salivaire suit lui aussi des variations circadiennes : le rythme est très marqué avec une forte amplitude, le pic survient à 15h26 et le minimum à 03h26 (DAWES, 12).

Paramètres du rythme circadien de la composition de la salive non stimulée							
Composants	C_o		C		ϕ		Significativité
	Moyenne	Erreur standard	Moyenne	Erreur standard	Moyenne	Erreur standard	
Inorganiques							
Sodium	6,2	± 0,9	4,3	± 1,2	- 70	± 2,6	sig (P<0,05)
Chlorure	17,4	± 1,4	4,8	± 0,9	-74	± 6,4	sig (P<0,01)
Potassium	21,6	± 1,2	1,1	± 0,2	-210,2	± 44,4	ns
Calcium	1,75	± 0,10	0,18	± 0,04	-137,3	± 33,6	ns
Phosphore	6,14	± 0,01	0,56	± 0,18	-325,6	± 28,2	ns
Organiques							
Protéines	223	± 20	63,5	± 15,6	-119,5	± 36,5	ns
Urée	32,2	± 2,5	3,7	± 0,9	-357	± 21,6	-
Débit							
(ml/5min)	2,43	± 0,46	0,94	± 0,17	-231,6	± 11,2	sig (P<0,01)

Tableau 3 - Paramètres de l'équation des variations circadiennes de la composition salivaire, d'après DAWES (12)

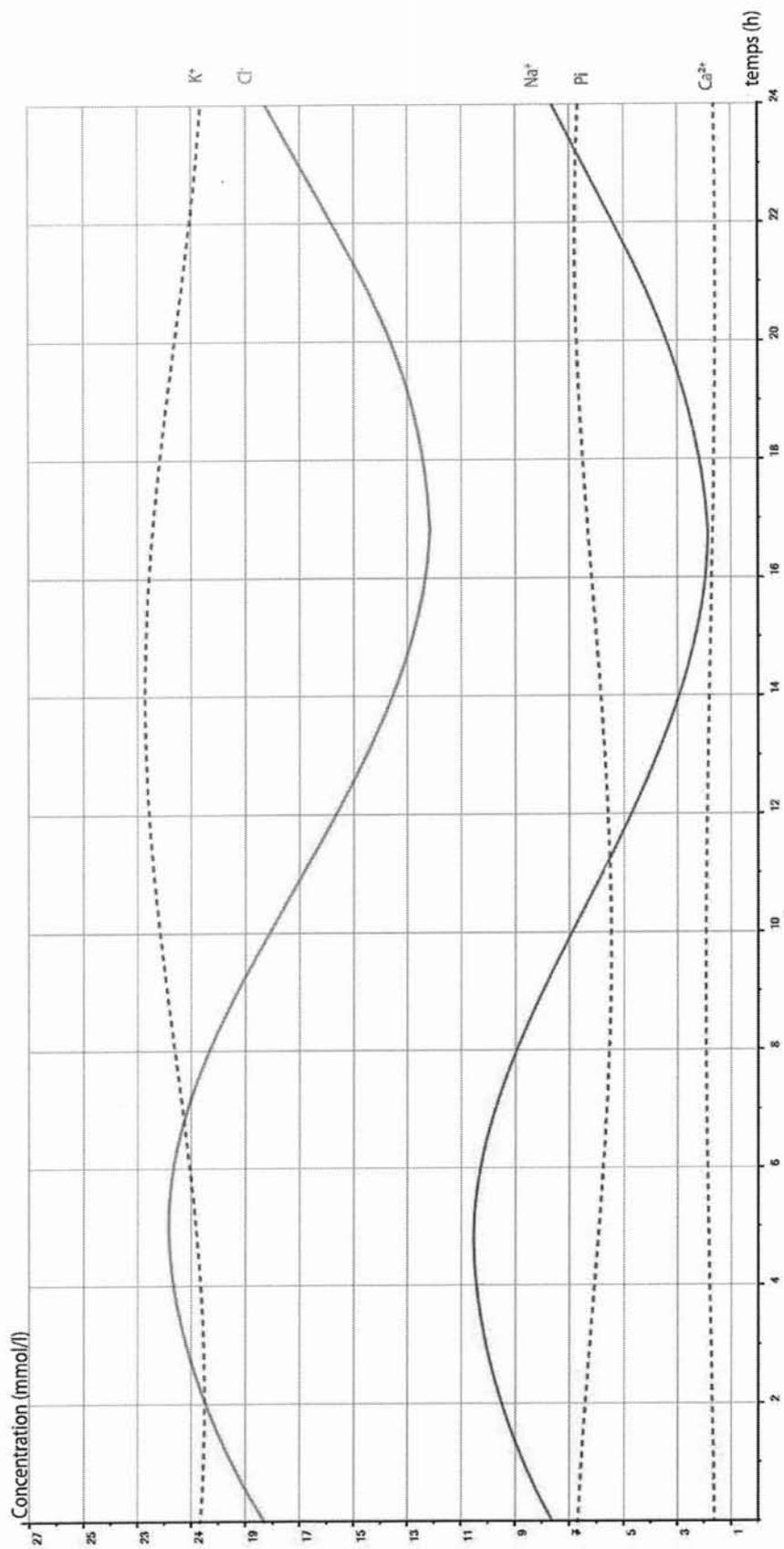


Figure 12 - Variations circadiennes de la composition de la salive totale non stimulée, d'après DAWES (12).

2.4.2.2.2 VARIATIONS CIRCANNUELLES

Il semble exister également des fluctuations dans la composition de la salive au fil des mois. Une étude menée par KAVANAGH et al. (49) portant sur les variations du phosphate, calcium, et du pouvoir tampon de la salive a permis de mettre en évidence des variations significatives de concentration pour l'ion calcium et le pouvoir tampon selon les mois. Ces variations semblent cependant assez chaotiques, l'auteur lui-même conclut que des variations dans le débit salivaire des sujets et les méthodes de prélèvement ont dû influencer sur les résultats obtenus.

Pour ce qui est du débit salivaire, on relève un schéma saisonnier dans ses variations : il tend à diminuer l'été et à augmenter l'hiver (il existe une corrélation négative entre le débit salivaire et la température de l'environnement) (KAVANAGH et al., 48).

2.4.2.3 VARIATIONS SELON L'AGE

L'âge et le vieillissement influent de manière remarquable sur la composition de la salive (cf. Figure 13 et Tableau 4) :

- D'une part chez le jeune enfant on observe dans les premières années de la vie une maturation du parenchyme des glandes salivaires, entraînant des variations de la composition de la salive qu'elles sécrètent (BEN-ARYEH et al., 4).
- D'autre part, chez l'adulte le vieillissement s'accompagne d'une altération du parenchyme résultant également en des variations de la composition de la salive (NAGLER et al., 69).

2.4.2.3.1 CHEZ L'ENFANT

Il existe une corrélation linéaire et croissante entre l'âge et la concentration de Na^+ dans la salive totale non stimulée, résumée par l'équation :

$$y = 0,31x + 3,34$$

Equation 6 - Concentration de sodium dans la salive totale non stimulée selon l'âge, d'après BEN-ARYEH et al. (4)

Où y = concentration de sodium en mmol/l

x = âge en années

La concentration en protéines suit également une courbe croissante avec l'âge, tandis que le potassium montre des différences significatives de concentration selon l'âge mais sans suivre une courbe de régression (BEN-ARYEH et al., 4).

Toutes ces variations sont le reflet des phénomènes de croissance et de maturation des glandes salivaires, mais aussi de changements du système hormonal, de la nutrition, de la composition plasmatique (BEN-ARYEH et al., 4).

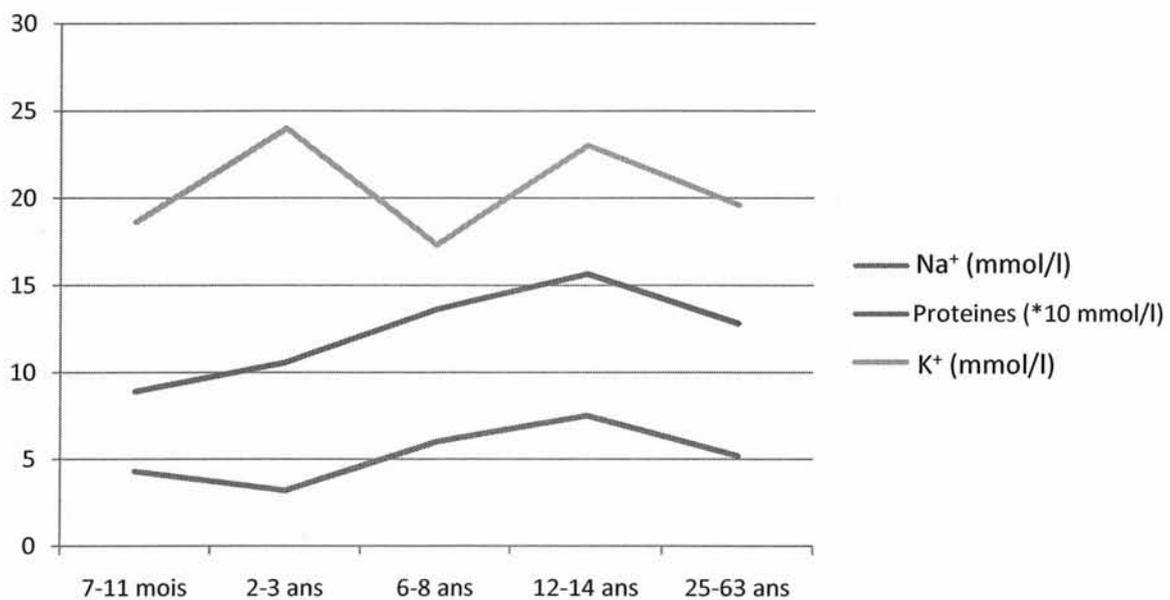


Figure 13 - Variations des concentrations de plusieurs composants salivaires selon l'âge, d'après BEN-ARYEH et al. (4)

2.4.2.3.2 CHEZ L'ADULTE

Il existe une controverse quant aux effets de l'âge sur la fonction salivaire :

Plusieurs auteurs dont GHEZZI et al. (27) défendent l'hypothèse selon laquelle, en l'absence de pathologies ou traitements médicamenteux, le vieillissement seul n'a pas d'effet sur la fonction salivaire.

Pour d'autres tels NAGLER et al. (69), au contraire, le vieillissement est le facteur principal d'altération de la fonction salivaire tandis que la prise de médicaments et les pathologies sont secondaires. Le vieillissement a pour effet des modifications histologiques des glandes salivaires : on

observe au sein du parenchyme une atrophie des épithélia acineux et canaux, qui sont progressivement remplacés par des tissus adipeux et fibreux afunctionnels. Il faut noter que la glande parotide est moins sensible au vieillissement que la glande submandibulaire. Ainsi le débit salivaire stimulé est moins réduit par le vieillissement puisque la glande parotide est la principale contributrice au débit salivaire stimulé.

Il en résulte une diminution de 62 % du débit salivaire non stimulé, ainsi qu'une baisse de la quantité des ions et protéines excrétés. On observe alors une augmentation de la concentration de tous les composants salivaires, qui n'est pas liée à une augmentation de leur excrétion (au contraire) mais à une concentration de ces composants causée par la baisse du volume du compartiment liquidien. Sur le plan physiologique on assiste donc bien à une diminution des bénéfices de ces composants (baisse de l'effet lubrifiant protecteur des muqueuses par les protéines, par exemple) en dépit de leur apparente augmentation de concentration (NAGLER et al., 69).

Evolution de la composition de la salive avec l'âge					
Composants	Population jeune		Population âgée		Test t (sig pour p < 0,01)
	Moyenne	Erreur standard	Moyenne	Erreur standard	
Composants inorganiques					
Na ⁺ (mmol/l)	9,52	± 0,86	12,56	± 1,50	ns
K ⁺ (mmol/l)	19,20	± 0,82	27,78	± 1,44	sig
Cl ⁻ (mmol/l)	19,70	± 1,07	29,50	± 1,59	sig
Ca ²⁺ (mg/dl)	3,45	± 0,43	5,15	± 0,97	ns
Composants organiques					
Protéines (mg/dl)	49,80	± 5,05	93,40	± 10,66	sig
IgG (mg/dl)	0,24	± 0,10	0,50	± 0,19	ns
IgM (mg/dl)	0,12	± 0,11	0,17	± 0,17	ns
IgAs (mg/dl)	326	± 28,4	572,5	± 47,8	sig
Lysozyme (mg/dl)	10,0	± 2,15	26,13	± 4,49	sig
Albumine (mg/dl)	3,97	± 0,76	13,5	± 2,04	sig
Amylase (U/l)	748	± 103	1476	± 198	sig

Tableau 4 - Variations de la composition de la salive totale non stimulée avec le vieillissement, d'après NAGLER et al. (69)

2.4.2.4 AUTRES FACTEURS DE VARIATIONS

2.4.2.4.1 ALIMENTATION

2.4.2.4.1.1 LA NATURE DE LA STIMULATION

La nature d'un stimulus gustatif peut induire des variations dans la composition de la salive. (DAWES, 14) a montré que le sel induit principalement une forte augmentation de la concentration en protéines de la salive, ainsi qu'une augmentation du calcium salivaire, tandis que l'acide citrique induit une légère augmentation de la concentration de sodium.

2.4.2.4.1.2 LES PRELEVEMENTS SUCCESSIFS

Il a été prouvé que la composition de la salive pouvait être modifiée si un prélèvement était effectué dans l'heure suivant une stimulation gustative ou la consommation d'un repas.

En revanche si le prélèvement est effectué après un intervalle de 4 heures, la stimulation gustative antérieure n'affecte plus la composition salivaire (DAWES, 11).

2.4.2.4.1.3 LE REGIME ALIMENTAIRE

Les tentatives pour modifier la concentration en électrolytes de la salive tels le calcium, phosphate, bicarbonate par modification du régime alimentaire semblent sans effet.

On peut en revanche observer une augmentation de l'urée salivaire dans les cas de régimes hyperprotéinés. En effet le taux d'urée plasmatique augmente en cas d'apports protéiques accrus et le taux d'urée salivaire est proportionnel au taux plasmatique (DAWES, 11).

2.4.2.4.2 PRISE DE MEDICAMENTS

La littérature fait souvent mention des effets secondaires des médicaments sur les glandes salivaires (HUNTER et al., 38 ; LLENA-PUY, 62 ; PAPARELLA, 73). L'effet indésirable le plus largement observé est une diminution du débit salivaire. Pour LLENA-PUY (62), il existerait sur le marché plus de 400 médicaments présentant cette caractéristique, la plupart d'entre eux étant d'usage courant (cf. Tableau 5).

L'effet des médicaments sur la concentration des différents composants salivaires est par contre rarement abordé. HUNTER et al. (38) observait que des antidépresseurs avaient tendance à diminuer la concentration de sodium et à augmenter la concentration de potassium dans la salive, mais l'auteur précise que ces changements pourraient n'être que le résultat de la diminution du débit salivaire (cf. 2.4.2.1 "Variations en fonction du débit de sécrétion et de la glande" page 34).

Médicaments responsables d'une diminution du débit salivaire	
Familles de médicaments	Exemples de molécules
Anxiolytiques	Lorazépam, Diazépam
Anticonvulsivants	Gabapentine
Antidépresseurs	Amitriptyline, Imipramine, Sertraline, Fluoxétine
Antiémétiques	Méclizine
Antihistaminiques	Loratadine
Antiparkinsoniens	Bipéridène, Sélégiline
Bronchodilatateurs	Ipratropium, Albutérol
Antipsychotiques	Clozapine, Chlorpromazine
Diurétiques	Spironolactone, Furosémide
Myorelaxants	Baclofène
Antihypertenseurs	Chlorhydrate de prazosine
Anti-inflammatoires	Piroxicam
Sédatifs	Flurazépam
Narcotiques analgésiques	Mépéridine, Morphine

Tableau 5 - Médicaments responsables d'une diminution du débit salivaire, d'après LLENA-PUY (62)

3 INTERACTION ENTRE LA SALIVE ET LES ALLIAGES METALLIQUES DES APPAREILS ORTHODONTIQUES

3.1 LA CORROSION DANS LA CAVITE BUCCALE

La corrosion est un phénomène très largement répandu, observable aussi bien dans la nature lorsqu'elle contribue à la biodégradation d'objets abandonnés, dans le domaine de l'industrie lorsque des conduites sont sujettes à la rouille, ou encore dans le domaine de l'orthodontie lorsque des dispositifs thérapeutiques faits d'alliages métalliques sont immergés pour de longues périodes dans le milieu salivaire. Elle peut avoir un rôle bénéfique lorsque la formation d'un produit de corrosion à la surface du matériau le protège d'une dégradation future, mais dans la plupart des cas, elle est nuisible : on peut alors dire que la corrosion d'un matériau est la détérioration qu'il subit dans le milieu dans lequel il se trouve.

3.1.1 DEFINITIONS

Oxydation-réduction

Un élément subit une oxydation lorsqu'il perd un ou plusieurs électrons.

Par exemple, quand l'élément cuivre dans l'atome Cu perd deux électrons, il subit une oxydation et appartient alors à l'ion Cu^{2+} : $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^{-}$

Un élément subit une réduction lorsqu'il gagne un ou plusieurs électrons. (ROCHAIX, 78)

Par exemple, quand l'élément fer dans l'ion Fe^{3+} capte un électron, il subit une réduction et appartient alors à l'ion Fe^{2+} : $Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$

Oxydant-réducteur

Les électrons cédés par un élément lors de son oxydation doivent être captés par un autre élément.

Un élément (ou l'espèce qui le contient) capable de fixer un ou plusieurs électrons est appelé « oxydant ».

L'ion Fe^{3+} , vu précédemment, agit comme un oxydant.

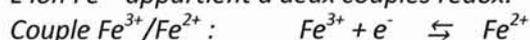
Les électrons fixés par un élément lors de sa réduction doivent être fournis par un autre élément. Un élément (ou l'espèce qui le contient) capable de céder un ou plusieurs électrons, est appelé « réducteur ». (ROCHAIX, 78)

L'atome Cu, vu précédemment, agit comme un réducteur.

Couple d'oxydoréduction ou couple redox

Un même élément peut appartenir à différentes espèces chimiques. Selon l'espèce à laquelle il appartient, l'élément peut s'oxyder ou se réduire. Lors d'une réduction, l'élément passe d'une espèce oxydée à une espèce réduite. Lors d'une oxydation, l'élément passe d'une espèce réduite à une espèce oxydée. Deux espèces contenant le même élément et dont le passage de l'une à l'autre se fait par un transfert d'électrons peuvent être associées dans un couple d'oxydoréduction symbolisé par Ox/Red. (ROCHAIX, 78)

L'ion Fe^{2+} appartient à deux couples redox:

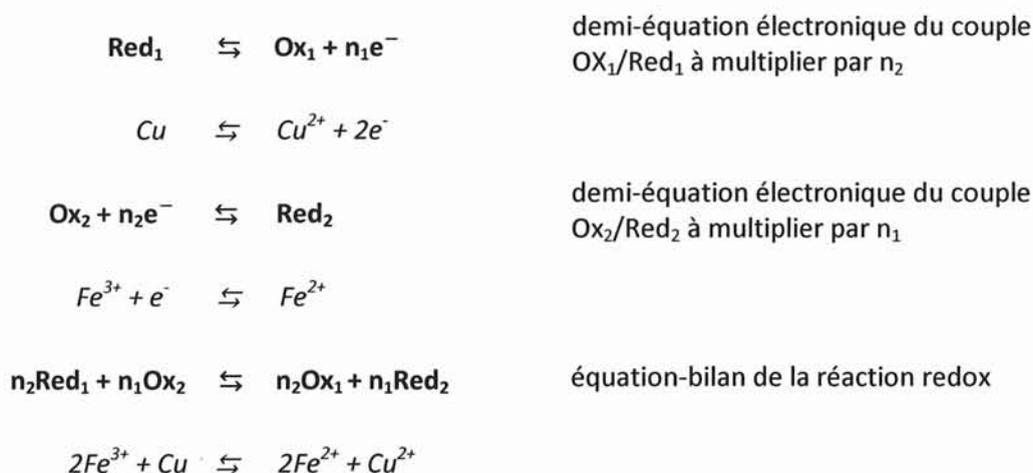


Fe^{2+} est le réducteur du couple

Fe^{2+} est l'oxydant du couple

Réaction d'oxydoréduction

En solution aqueuse, c'est une réaction chimique dans laquelle les réactifs sont transformés en produits par transfert d'électrons entre les espèces mises en jeu. D'après les définitions ci-dessus, un corps ne peut être réduit sans l'intervention d'un réducteur pour fournir les électrons et un corps ne peut être oxydé sans la présence d'un oxydant pour capter les électrons cédés. Ainsi, par exemple, une forme réduite Red_1 ne peut être transformée en forme oxydée Ox_1 sans la présence d'un oxydant Ox_2 capable de capter les électrons cédés par Red_1 . Simultanément, Ox_2 se transforme en sa forme réduite Red_2 . Il s'ensuit qu'une réaction d'oxydoréduction fait obligatoirement intervenir deux couples redox : Ox_1/Red_1 et Ox_2/Red_2 . Son équation peut être obtenue en superposant les deux demi-équations électroniques des deux couples mis en jeu et en tenant compte du fait qu'au cours d'une réaction d'oxydoréduction, le nombre d'électrons captés doit être égal au nombre d'électrons cédés et vice-versa. Par conséquent, une équation-bilan de réaction redox ne contient pas d'électrons. (ROCHAIX, 78)



Equation 7 - Equation bilan d'une réaction redox, d'après ROCHAIX (78)

Le transfert d'électrons entre les espèces chimiques peut se faire:

- soit par contact direct entre les réactifs d'une solution;
- soit par circulation des électrons dans des conducteurs électriques : c'est le cas des réactions électrochimiques qui se produisent dans une pile débitant un courant ou au cours d'une électrolyse (ROCHAIX, 78).

Réactions de corrosion

Ce sont des réactions d'oxydoréduction irréversibles entre le métal et un agent oxydant du milieu environnant. En milieu aqueux, toute corrosion qui provoque l'oxydation du métal est une réaction électrochimique avec transfert d'électrons cédés par le métal (réaction partielle anodique) et captés par l'agent oxydant (réaction partielle cathodique) (ROCHAIX, 78).

Passivation

La surface du métal est recouverte d'une couche de composé solide plus ou moins adhérent et donc plus ou moins protecteur (oxyde ou hydroxyde). Lorsque le film formé protège effectivement le métal d'une attaque ultérieure, on parle de « passivité du métal » (ROCHAIX, 78).

Ainsi, les alliages à base de titane réputés pour leur très grande résistance à la corrosion doivent cette propriété à la formation d'une couche d'oxyde de titane (cf. "3.1.3.1.2.1 Passivation" page 56).

Potentiel de corrosion (e_{cor})

C'est le potentiel pris par un métal plongeant dans un électrolyte qui est son milieu corrosif. C'est une grandeur cinétique qui dépend de l'élément métallique, mais aussi des paramètres du milieu corrosif.

Un métal est corrodé d'autant plus facilement que son potentiel de corrosion est faible. (ROCHAIX, 78)

Densité de courant de corrosion (I_{cor})

Unité de mesure de la vitesse d'une réaction de corrosion, exprimée en Ampères/m² (ROCHAIX, 78).

3.1.2 DIFFERENTS TYPES DE CORROSION

3.1.2.1 CORROSION GENERALISEE

La corrosion généralisée est la plus répandue. Elle concerne toute la surface de l'objet exposée à l'environnement. Elle peut être uniforme ou galvanique, et faire intervenir un ou plusieurs métaux (ROCHAIX, 78).

3.1.2.1.1 CORROSION UNIFORME

C'est la forme la plus répandue de corrosion, elle intervient sur tous les métaux à des vitesses différentes. Elle est difficile à détecter tant que d'importantes quantités de métal n'ont pas été corrodées. (ELIADES et al., 19) La surface entière du métal sert à l'oxydation et à la réduction, sans distinction des sites anodiques et cathodiques. Elle fait intervenir un seul métal (ROCHAIX, 78).

3.1.2.1.2 CORROSION GALVANIQUE

Elle survient lorsque deux métaux différents (ou deux pièces d'un même métal, qui ne sont plus au même potentiel du fait d'une hétérogénéité ou d'un âge différent) sont en contact ou reliés électriquement dans un milieu corrosif aqueux. Les sites anodiques et cathodiques sont distincts. Le métal le moins noble est oxydé (il devient l'anode) : certains de ses atomes libèrent des électrons, tandis que les ions résultants sont libérés dans le milieu (ROCHAIX, 78).

Il faut noter que cette forme de corrosion est la plus couramment rencontrée dans le cadre de l'application des biomatériaux dentaires. L'acier inoxydable est caractérisé par un comportement actif ou passif, selon que les conditions de l'environnement tendent à régénérer ou à éliminer la couche protectrice de chrome. Ainsi une corrosion galvanique peut prendre place selon le statut de l'acier inoxydable, par exemple s'il est en contact avec des alliages de brasure, comme c'est souvent le cas dans les appareils orthodontiques amovibles (ELIADES et al., 19).

3.1.2.2 CORROSION LOCALISEE

Dans ce type de corrosion, le site anodique du métal corrodé se limite à une petite surface voire à un point, mais les dégâts occasionnés peuvent être conséquents. Les exemples de corrosion localisée les plus courants sont la corrosion par piqûres, la corrosion caverneuse et la corrosion par attaque microbienne.

3.1.2.2.1 CORROSION PAR PIQURE

Lors de la formation de piqûres, le site anodique est réduit à un point mais la croissance de la piqûre sous la surface du métal peut être très rapide et causer d'importantes dégradations dans le matériau (cf. Figure 14). Les aciers inoxydables en solution acide ou neutre et en présence d'ions chlorures sont sujets aux piqûres. Ces dernières s'amorcent à cause de défauts de surface ou d'inclusions de certains éléments comme le sulfure de manganèse dans l'acier inox, par un mécanisme encore mal connu mais dont la fréquence et la rapidité augmentent avec la concentration en ions agressifs Cl^- . Le film passif des métaux comme les aciers inox est dépassivé et perméabilisé par endroits et joue le rôle de cathode, le fond de la piqûre joue le rôle d'anode. Les ions chlorures créent un milieu favorable à la croissance de la piqûre en donnant au phénomène un aspect autocatalytique (qui s'auto-entretient) ; de plus, la réduction de l'agent oxydant produit des ions hydrogène H^+ qui diminuent le pH à l'intérieur de la piqûre, ce qui favorise encore sa progression (ROCHAIX, 78).

On observe cette forme de corrosion sur les brackets et sur les fils. En effet, l'examen par microscopie électronique à balayage (MEB) permet souvent de mettre en évidence des porosités en surface des brackets et des fils, responsables de la susceptibilité de ces matériaux à la corrosion par piqûre (ELIADES et al., 19).

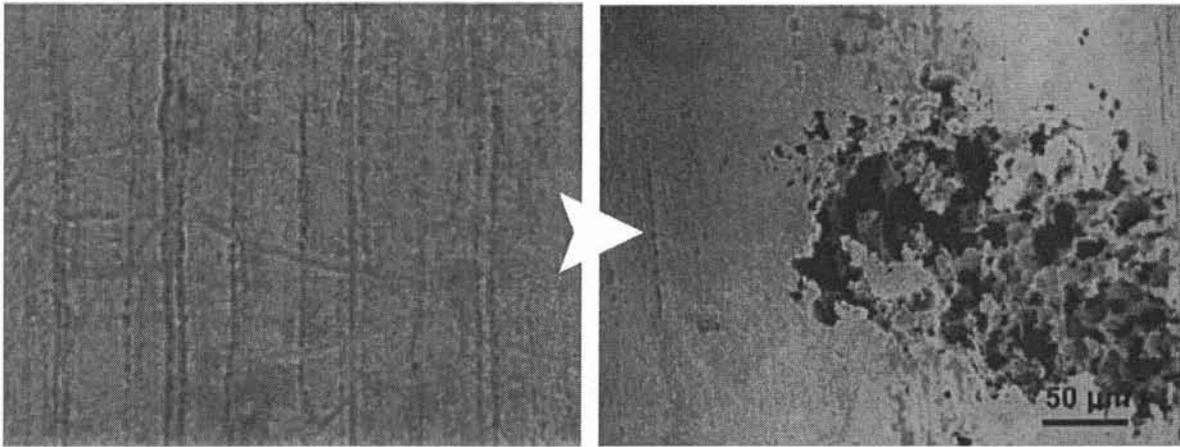


Figure 14 – Vue en MEB de l'état de surface d'un fil Ni-Ti avant et après corrosion par piqûre, d'après HUANG (34)

3.1.2.2.2 CORROSION CAVERNEUSE

La corrosion caverneuse concerne la formation d'une pile d'aération au niveau d'une rayure sur une pièce (en acier, par exemple) plongée dans un milieu aéré aqueux. Le fond de la rayure, déficitaire en O_2 dissout, devient l'anode et se corrode alors que la surface de la pièce où l' O_2 dissout est plus abondant est réduit (il s'y forme alors une couche d'oxyde pouvant masquer l'existence d'une cavité profonde au sein de la pièce) (ROCHAIX, 78).

Dans le cadre de l'application clinique des dispositifs orthodontiques, la corrosion caverneuse peut être attribuée à la présence de plaque, ou à l'application d'éléments non métalliques à la surface du métal (telles les ligatures élastomériques), tous deux responsables d'un déficit local en O_2 . Cette forme de corrosion est particulièrement agressive (cf. Figure 15), elle peut causer des crevasses allant jusqu'à 2 à 5 mm (pouvant éventuellement perforer entièrement la base d'un bracket) et est responsable d'un dégagement important d'ions métalliques (ELIADES et al., 19).

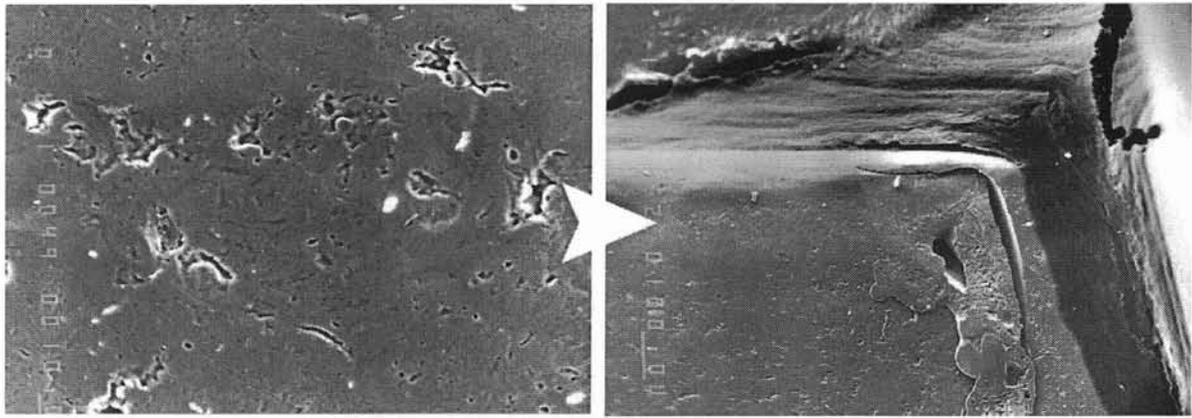


Figure 15 – Vue en MEB de l'état de surface d'un bracket en acier inox avant et après corrosion caverneuse, d'après ELIADES et al. (19)

3.1.2.2.3 CORROSION MICROBIOLOGIQUE

Moins connue, l'attaque d'un matériau par des micro-organismes n'en est pas moins une source importante de dégradations. Les bactéries interviennent soit directement sur les sites anodiques ou cathodiques, soit indirectement en modifiant la résistance des films protecteurs des métaux, soit en créant leur propre milieu corrosif. Le métabolisme interne des bactéries produit des acides favorisant la corrosion du matériau. Au sein de la cavité buccale, la bactérie acidogène la plus répandue est *Streptococcus mutans* (LENANDER-LUMIKARI et al., 57). Dans un même temps, la présence de ces bactéries empêche le dioxygène d'accéder à certains sites et crée ainsi les conditions d'une aération différentielle; les sites sous-oxygénés entraînent alors la prolifération de bactéries dont l'action a souvent comme conséquence de dépolariser la cathode (consommation du dihydrogène servant à réduire les ions sulfates en ions sulfures) donc d'augmenter la vitesse d'oxydation du métal à l'anode (ROCHAIX, 78).

Cette forme de corrosion se manifeste cliniquement principalement par l'apparition de cratères au niveau des bases des brackets. D'autre part, il a également été démontré que le métabolisme bactérien était capable de dégrader les résines composites utilisées comme adhésif (ELIADES et al., 19).

3.1.2.2.4 AUTRES FORMES DE CORROSION

Bien qu'ayant leur propre spécificité, les autres formes de corrosion aboutissent le plus souvent aux mécanismes, de pile galvanique, d'aération différentielle ou de formation de piqûres. Il s'agit des corrosions qui ont pour origine un facteur métallurgique ou mécanique.

3.1.2.2.4.1 CORROSION INTERGRANULAIRE

Elle est due à l'imperfection des limites de grains ou à des impuretés ou à l'appauvrissement en chrome aux limites de grains des aciers inox (ROCHAIX, 78). Dans le cas des brackets en inox, lorsque ceux-ci sont soumis à des températures importantes (soudure, brasure, etc.), ils subissent une altération de leur microstructure qui consiste en une précipitation de carbure de chrome à la jonction des grains. Le mécanisme de corrosion met alors principalement en jeu la dissolution du carbure de chrome (ELIADES et al., 19).

3.1.2.2.4.2 CORROSION PAR FROTTEMENT

Elle se produit au niveau de deux surfaces métalliques en contact, en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre, principalement lorsque l'interface est soumise à des vibrations et à des forces de compression. Ainsi on peut observer sur un fil de nickel-titane récupéré après utilisation une altération de la structure cristallographique en surface aux endroits où le fil était engagé dans la gorge des brackets (cf. Figure 16) (ELIADES et al., 19).

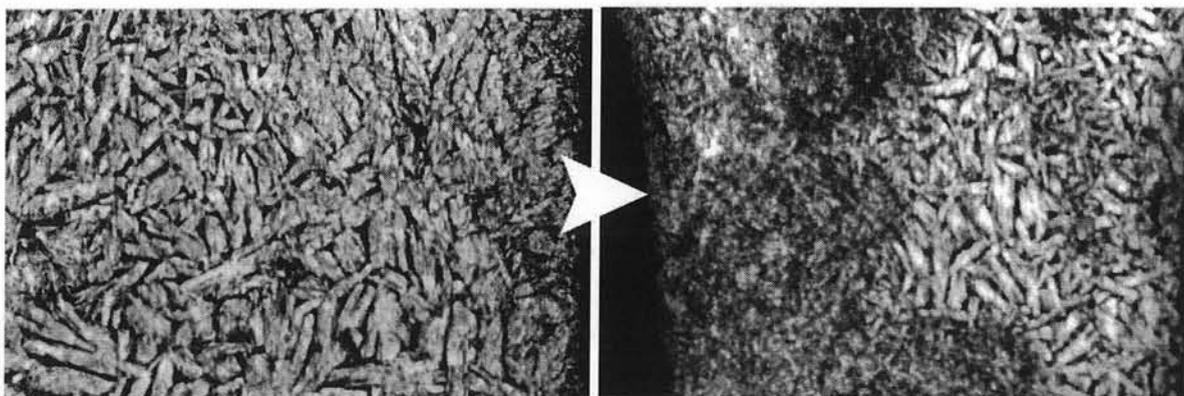


Figure 16 – Vue en MEB de l'état de surface d'un fil Ni-Ti avant et après corrosion par frottement, d'après ELIADES et al. (19)

3.1.2.2.4.3 CORROSION PAR EROSION

Elle concerne les matériaux soumis à des fluides en mouvement. Ces fluides peuvent être de nature très différente (gaz, liquide, liquide mélangé à des particules solides...). Selon la nature du matériau et selon notamment qu'il est recouvert d'un film protecteur ou non, la corrosion due à l'érosion aura une configuration et une vitesse différente (ROCHAIX, 78).

3.1.2.2.4.4 CORROSION AU NIVEAU D'UNE SOUDURE

Elle met en présence des matériaux différents et en modifie dans sa proche région les caractéristiques métallurgiques et mécaniques (ROCHAIX, 78).

3.1.2.2.4.5 CORROSION SOUS CONTRAINTE

Le matériau est dans un milieu corrosif et subit une contrainte : la conséquence en est souvent une rupture ou la création de fissures (ROCHAIX, 78).

Lorsqu'un arc est engagé et ligaturé dans des brackets, il subit des contraintes de traction et de compression localisées en de multiples points de sa structure, du fait des charges s'exerçant dans les trois sens de l'espace auxquelles il est soumis. Cela a pour effet l'apparition de différences de potentiel électrochimique, certains sites de la structure de l'alliage deviennent anodiques, et d'autres cathodiques. L'alliage est alors plus réactif aux phénomènes de corrosion (ELIADES et al., 19).

D'autre part, il est intéressant de noter que l'immersion d'une pièce métallique dans un milieu corrosif réduit la résistance à la fatigue de cette pièce. On peut donc assister à des ruptures prématurées par fatigue (fractures causées par des contraintes mécaniques répétées cycliquement). Ce phénomène semble être mis en cause lors de la fracture des arcs faciaux, au niveau de leur extrémité venant s'insérer dans le tube molaire (ELIADES et al., 19).

3.1.3 FACTEURS DETERMINANTS DANS LES PHENOMENES DE CORROSION

L'origine des différentes formes de corrosion des alliages utilisés dans la cavité buccale dépend d'une part de la composition et de la structure de l'alliage, et d'autre part des propriétés du milieu buccal.

Ainsi entrent en jeu :

- la composition chimique du métal

- la microstructure du métal
- la composition chimique de l'environnement, son pH, sa température
- les phénomènes mécaniques: contraintes, chocs, frottements

(BILHAN et al., 6 ; ROCHAIX, 78).

3.1.3.1 ROLE DE L'ALLIAGE

3.1.3.1.1 COMPOSITION CHIMIQUE DES ALLIAGES

➤ LES ALLIAGES D'ACIER INOXYDABLES :

Avec l'avènement de l'acier inoxydable dans l'industrie à l'issue de la première guerre mondiale et les progrès dans les techniques de fabrication, les arcs en acier inoxydable ont remplacé ceux en or utilisés jusque là (KUSY, 52).

Depuis 1950 les alliages d'acier inoxydable utilisés en orthodontie dérivent tous des séries 300 de l' AISI (American Iron and Steel Institute). Schématiquement, ces alliages sont composés de 71% de fer, 18% de chrome, 8% de nickel, et des traces (<0,2%) de carbone (FILLEUL, 24). En 2005, OH et al. (71) constatent que la majorité des fabricants utilisent l'acier 304L AISI : 18 à 20% de chrome, 8 à 10% de nickel, le reste étant du fer, ainsi qu'une très faible quantité de manganèse, silice, et carbone.

➤ LES ALLIAGES DE CHROME-COBALT

Aussi appelés stellite dans l'industrie, leur apparition remonte aux années 1950, lorsque l'Elgin Watch Company mit au point un alliage composé de 40% de cobalt, 20% de chrome, 15% de fer, et 15% de nickel qui était initialement destiné à la fabrication de ressorts d'horlogerie (FILLEUL, 24). Il fut commercialisé à l'attention des orthodontistes par Rocky Mountain Orthodontics sous le nom d'Elgiloy (KUSY, 52).

➤ LES ALLIAGES DE NICKEL-TITANE

Vers la fin des années 1960, la Navy étudiait de nouveaux types d'alliages qui présentaient un effet « mémoire de forme », l'un d'eux fut nommé Nitinol, acronyme de « nickel-titane Naval Ordnance Laboratory ». Cet alliage pouvait être chauffé puis refroidi dans une forme précise, il était alors possible de le déformer, puis en le chauffant à nouveau il reprenait sa forme d'origine. La firme

Unitek introduisit ce nouveau matériau dans le milieu de l'orthodontie, bien que dans ce contexte d'utilisation l'effet mémoire de forme était inexistant. L'alliage était composé d'exactly 50% de nickel et 50% de titane (alliage équiatomique). Plus récemment sont apparus sur le marché des alliages qui reprennent ces propriétés, tels le Copper Ni-Ti qui inclut dans sa composition 5 à 6% de cuivre et 0,2 à 0,5% de chrome (KUSY, 52).

➤ LES ALLIAGES DE TITANE-MOLYBDENE

Ce type d'alliage a été mis au point dans les années 1980 par le Pr BURSTONE, et commercialisé par la firme Ormco sous le nom de TMA ("Titan Molybdenum Alloy") (KUSY, 52). Sa composition inclut 79% de titane, 11% de molybdène, 6% de zircone et 4% d'étain (FILLEUL, 24).

➤ LES ALLIAGES DE BRASURE

Les plus couramment utilisés sont ceux à base d'argent : ils sont constitués de 46 à 78% d'argent et de 19 à 32% de cuivre et éventuellement de zinc (jusqu'à 25%) la composition variant fortement selon les fabricants (GRIMSDOTTIR et al., 29). Il existe aussi des alliages composés à 77% d'or, le reste étant formé de 10% de fer, 8% de nickel, 4% de chrome. Enfin il existe des alliages à base de nickel : 50% de nickel, 37% de fer, 13% de chrome, 1% de manganèse (GRIMSDOTTIR et al., 29).

Ces alliages posent un sérieux problème en termes de risques de corrosion, car les utiliser revient à mettre en contact direct au moins deux alliages de composition totalement différente. Il se crée alors un couple galvanique (GRIMSDOTTIR et al., 29). Le métal le moins noble est alors corrodé : un exemple typique est celui de l'acier inoxydable corrodé par des alliages de brasure plus nobles (ELIADES et al., 19). On peut observer un tel phénomène dans les brackets fixés sur leur base au moyen d'un alliage de brasure (cf. Figure 17).

Un autre dispositif orthodontique particulièrement en proie à la corrosion est l'arc facial des forces extra-orales : des quantités relativement importantes d'alliage de brasure sont utilisées pour solidariser l'arc interne et externe. On assiste alors à un relargage important d'ions résultant de la corrosion (notamment Ni^{2+}), c'est pourquoi il est préférable de préférer des arcs faciaux soudés au laser (HOUSE et al., 32).

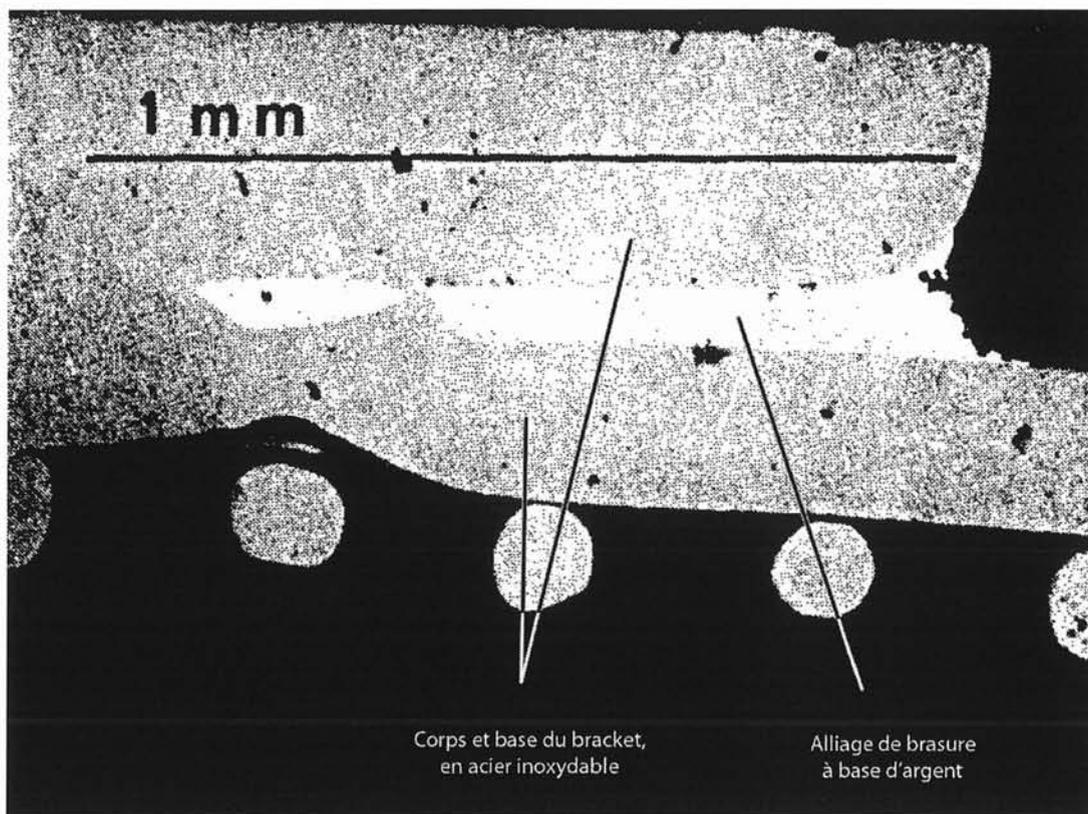


Figure 17 - Vue en MEB d'une coupe d'un bracket en acier inoxydable soudé sur sa base par un alliage d'argent, d'après GRIMSDOTTIR et al. (29)

3.1.3.1.2 PROTECTION CONTRE LA CORROSION DES ALLIAGES

3.1.3.1.2.1 PASSIVATION

C'est le principal mécanisme mis en jeu dans la protection contre la corrosion des alliages précédemment cités.

➤ ALLIAGES D'ACIER INOXYDABLE

Dans le cas de l'acier inoxydable, c'est l'adjonction de chrome et de nickel qui lui confère sa qualité « d'inoxydable ». Le chrome joue le rôle le plus important : lorsqu'il est présent à partir d'un taux de 10 à 13% dans l'alliage, il permet la formation spontanée d'une couche d'oxyde de chrome en surface (c'est la passivation) et sa reformation (c'est la repassivation), qui protège contre la corrosion. La formation de la couche d'oxyde nécessite pour se former et se maintenir la présence d'oxygène, au contraire une acidité ou une concentration importante en ions chlorure détériorent

cette couche (ELIADES et al., 19 ; KUSY, 52). Cette couche est principalement composée de Cr_2O_3 dans sa partie interne et $\text{Cr}(\text{OH})_3$ dans sa partie externe (CARDOSO et al., 8).

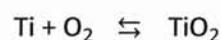
Le nickel permet, à partir d'un taux de 8% de stabiliser la phase austénitique du fer (une configuration cristallographique) et ainsi d'augmenter la résistance de tout l'alliage à la corrosion (KUSY, 52).

➤ ALLIAGES DE CHROME-COBALT

La résistance à la corrosion des alliages de chrome-cobalt semble mettre en jeu une couche de passivation d'oxyde de chrome, selon les mêmes mécanismes que ceux observés dans les alliages d'acier inoxydables (ELIADES et al., 19).

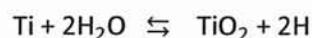
➤ ALLIAGES A BASE DE TITANE

Le titane est un métal très résistant à la corrosion (GRIMSDOTTIR et al., 29). Il est capable de former une couche de passivation formée de différents oxydes, dont TiO_2 , TiO_3 , Ti_2O_5 . La composition exacte de la couche d'oxyde n'a pas encore été clairement définie, cependant TiO_2 est la forme la plus stable et la plus répandue (ELIADES et al., 19). Cet oxyde se forme spontanément à l'air libre selon la réaction :



Equation 8 - Formation de la couche protectrice d'oxyde de titane à l'air libre, d'après ELIADES et al. (19)

Quand le titane est mis en présence d'eau, une couche d'oxyde de titane TiO_2 se forme selon la réaction :



Equation 9 - Formation de la couche protectrice d'oxyde de titane en présence d'eau, d'après ELIADES et al. (19)

Les alliages à base de titane sont bien plus résistants à la corrosion que l'acier inoxydable, car la couche d'oxyde de titane est plus stable que celle d'oxyde de chrome (HUANG, 33).

Ainsi, GRIMSDOTTIR et al. (29) ont démontré dans des tests de corrosion in vitro que des alliages de nickel-titane composés de 54% de nickel et 46% de titane relarguaient pourtant moins d'ions nickel que des aciers inoxydables ne contenant que 8% de nickel.

L'adjonction de cuivre aux alliages nickel-titane n'augmente pas la susceptibilité à la corrosion de l'alliage (DARABARA et al., 10).

3.1.3.1.2.2 ENROBAGE

On trouve sur le marché des brackets ou des fils orthodontiques enrobés d'une couche de nitrate de titane ou d'époxy. Le nitrate de titane a pour but de renforcer la dureté de surface et de diminuer la friction, mais il ne semble pas améliorer la résistance à la corrosion des alliages qu'il couvre. Les résines époxy en revanche améliorent la résistance à la corrosion, mais s'usent durant leur utilisation et risquent alors de découvrir l'alliage sous-jacent (HOUSE et al., 32).

3.1.3.1.3 MICROSTRUCTURE

Plusieurs auteurs ont montré que les fils ainsi que les brackets métalliques livrés par les fournisseurs présentent un état de surface très irrégulier (cf. Figure 18) (HUANG, 34 ; HUANG et al., 35 ; LIN et al., 60). Ces défauts en surface du matériau surviennent lors de la manufacture du produit, et occasionnent un stress dans la structure de l'alliage, ou une inhomogénéité dans la couche de passivation. L'hypothèse a été émise que ces irrégularités de surface constitueraient des sites préférentiels pour l'initiation des phénomènes de corrosion (HUANG, 33 ; LIN et al., 60).

Certains travaux infirment cette hypothèse : des auteurs ont étudié la corrosion de plusieurs auxiliaires orthodontiques métalliques dont ils avaient préalablement évalué l'état de surface, leurs résultats ont montré l'absence de corrélation entre la résistance à la corrosion et l'état de surface initial (HUANG, 34 ; LIN et al., 60).

D'autres au contraire l'accréditent : HUNT et al. (37) a démontré que le fait de polir un fil de nickel-titane avant son utilisation réduisait significativement la corrosion de ce dernier.

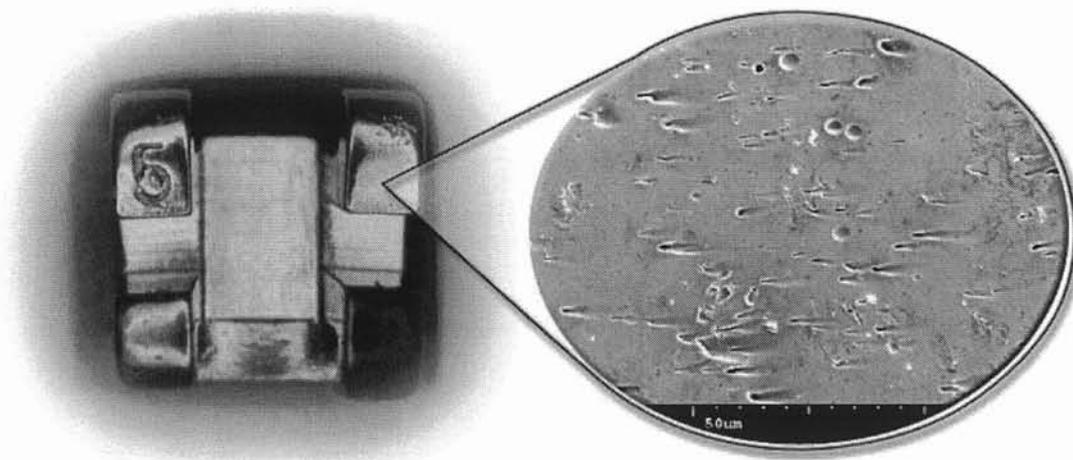


Figure 18 - Vue en MEB de l'état de surface d'un bracket neuf en acier inoxydable, d'après LIN et al. (60)

3.1.3.2 ROLE DU MILIEU BUCCAL

3.1.3.2.1 ROLE DE LA SALIVE

La bouche est un environnement propice au phénomène de corrosion car en permanence baignée par la salive (VON FRAUNHOFER, 89). En outre, elle est le siège de grandes fonctions telles la prise alimentaire et la mastication qui sont capables d'amplifier ce phénomène.

3.1.3.2.1.1 COMPOSITION

Parmi les nombreux ions rencontrés dans la salive, F^- et Cl^- sont les principaux incriminés dans les phénomènes de corrosion, tandis que certains autres éléments tels les protéines jouent un rôle protecteur.

➤ IONS CHLORURES

La salive présente dans des conditions normales une teneur importante en ions chlorures, or ceux-ci ont souvent été décrits comme des acteurs importants dans les phénomènes de corrosion par

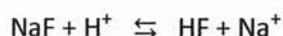
piqûre. Selon OH et al. (71), l'attaque par les ions chlorures est probablement le mode dominant de corrosion des dispositifs orthodontiques. Ces ions seraient capables d'attaquer la couche d'oxyde protectrice des alliages (SCHIFF et al., 81). Bien que les mécanismes exacts soient encore mal connus, la vitesse et l'ampleur du phénomène de corrosion est proportionnelle à la concentration en ions chlorures (ROCHAIX, 78).

➤ IONS FLUORURES

Les ions fluorures sont rencontrés en quantités importantes du fait de leur utilisation dans de nombreux produits d'hygiène bucco-dentaire : les dentifrices, les bains de bouche, les gels fluorés... (LI et al., 59).

Il a été démontré que ces ions, en milieu acide, supprimaient la passivation de l'acier inoxydable, et donc causaient la corrosion de l'alliage. Mais les ions fluor sont surtout réputés pour détruire aisément la couche de passivation des alliages à base de titane et donc soumettent ceux-ci, normalement bien protégés, à une corrosion importante. Cela concerne notamment les fils en nickel-titane, ou les brackets en titane. Devant ce constat, KAO et al. (45) recommandent de remplacer les arcs en nickel-titane après la réalisation d'une fluoruration chez un patient.

Les mécanismes mis en jeu sont les suivants : en milieu acide, les ions fluorures entraînent la formation d'acide fluorhydrique selon la réaction :



Equation 10 - Formation d'acide fluorhydrique à partir de fluorure de sodium en milieu acide, d'après KAO et al. (46)

L'acide fluorhydrique est capable de dissoudre la couche protectrice d'oxyde de titane (TiO_2) suivant les réactions ci-dessous :



Equation 11 - Attaque de la couche d'oxyde de titane par l'acide fluorhydrique, d'après KAO et al. (46)

L'alliage est alors exposé à la corrosion.

➤ IONS BICARBONATES

Les ions bicarbonates sont en charge du pouvoir tampon de la salive. Si on procède à des essais de corrosion dans un milieu dépourvu de pouvoir tampon, une augmentation du pH a lieu à l'interface métal solution, et entraîne la formation de dépôts de sels peu solubles qui interfèrent avec le déroulement des phénomènes de corrosion (GAL et al., 25).

➤ IONS CALCIUM ET PHOSPHATES

Lors des phénomènes de corrosion galvanique, l'augmentation de pH qui survient à la région cathodique est suffisante pour donner lieu, en présence de calcium, à la précipitation de sels de phosphates insolubles. Cette précipitation inhibe la corrosion dans la région concernée (GAL et al., 25).

➤ IONS SODIUM ET POTASSIUM

Le potassium et le sodium interviennent également dans la formation de sels capables de protéger l'alliage lors de leur précipitation. ELIADES et al. (20) ont montré que des fils de nickel-titane, après un mois ou plus d'utilisation en milieu buccal, présentaient un film de surface composé de protéines, mais également de précipités issus de composants inorganiques. Ces précipités sont : le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de potassium (KCl), et le phosphate de calcium ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Selon ces auteurs, les régions où s'accumulent ces précipités pourraient servir de protection à l'alliage sous-jacent, notamment vis-à-vis des baisses de pH.

➤ IONS THIOCYANATES

Les ions thiocyanates sont capables de former des complexes solubles ou insolubles avec de nombreux ions métalliques, et sont donc en mesure d'altérer l'équilibre des réactions mises en jeu dans la corrosion (GAL et al., 25).

➤ PROTEINES

Les protéines salivaires sont capables de s'adsorber en surface des alliages et augmentent leur potentiel de corrosion (elles jouent donc un rôle protecteur vis-à-vis de l'alliage). Cette propriété a été mise en évidence notamment dans le cas des mucines, glycoprotéines abondantes dans la salive (BILHAN et al., 6). VON FRAUNHOFER (89) au contraire ne reconnaît pas de propriétés protectrices aux mucines mais attribue ce rôle aux amylases salivaires.

3.1.3.2.1.2 pH

Le pH salivaire revêt une grande importance, car il est sujet à des variations fréquentes dans la cavité buccale et car le pH du milieu est un paramètre important dans le déterminisme des phénomènes de corrosion.

En effet, les équilibres d'oxydoréduction dépendent du potentiel e , mais aussi parfois du pH : c'est le cas lorsque les demi-équations électroniques d'une espèce étudiée font intervenir des ions H^+ . On peut alors étudier les équilibres entre des espèces chimiques comportant le même élément (Ni, Cr, ou Fe par exemple) à différents degrés d'oxydation. Les courbes d'équation $e = f(pH)$ tracées sur un diagramme pour chacun des équilibres découpent le plan en plusieurs parties qui représentent les domaines de prédominance pour les espèces dissoutes, ou les domaines de stabilité ou d'existence pour les autres corps. Ces diagrammes sont appelés diagrammes potentiel-pH ou diagrammes de POURBAIX (ROCHAIX, 78).

L'étude du diagramme potentiel-pH d'un métal permet de repérer différents états du métal et met en évidence le rôle du pH dans les phénomènes de corrosion (cf. Figure 19 pour l'exemple du nickel). Dans le domaine dit « d'immunité », le métal est exempt de toute transformation chimique au contact de son milieu. Dans le domaine dit « de passivation », la surface du métal est recouverte d'une couche protectrice (oxyde ou hydroxyde). Lorsque le film formé protège effectivement le métal d'une attaque ultérieure, on parle de « passivité du métal ». Dans le domaine dit de « corrosion », l'élément métallique se transforme en ions. On considère qu'il y a corrosion dès que la concentration molaire en ions métalliques du métal corrodé en solution aqueuse atteint 10^{-6} mol/l (ROCHAIX, 78).

Dans la pratique, des expériences ont été menées sur le rôle du pH dans la corrosion des fils orthodontiques. Il a par exemple été démontré que pour un pH de 6, la couche de passivation du nickel-titane est la plus stable et donc la protection contre la corrosion la meilleure. Les valeurs de pH plus élevées ou plus basses entraînent une stabilité réduite de la couche de passivation (WANG et al., 90).

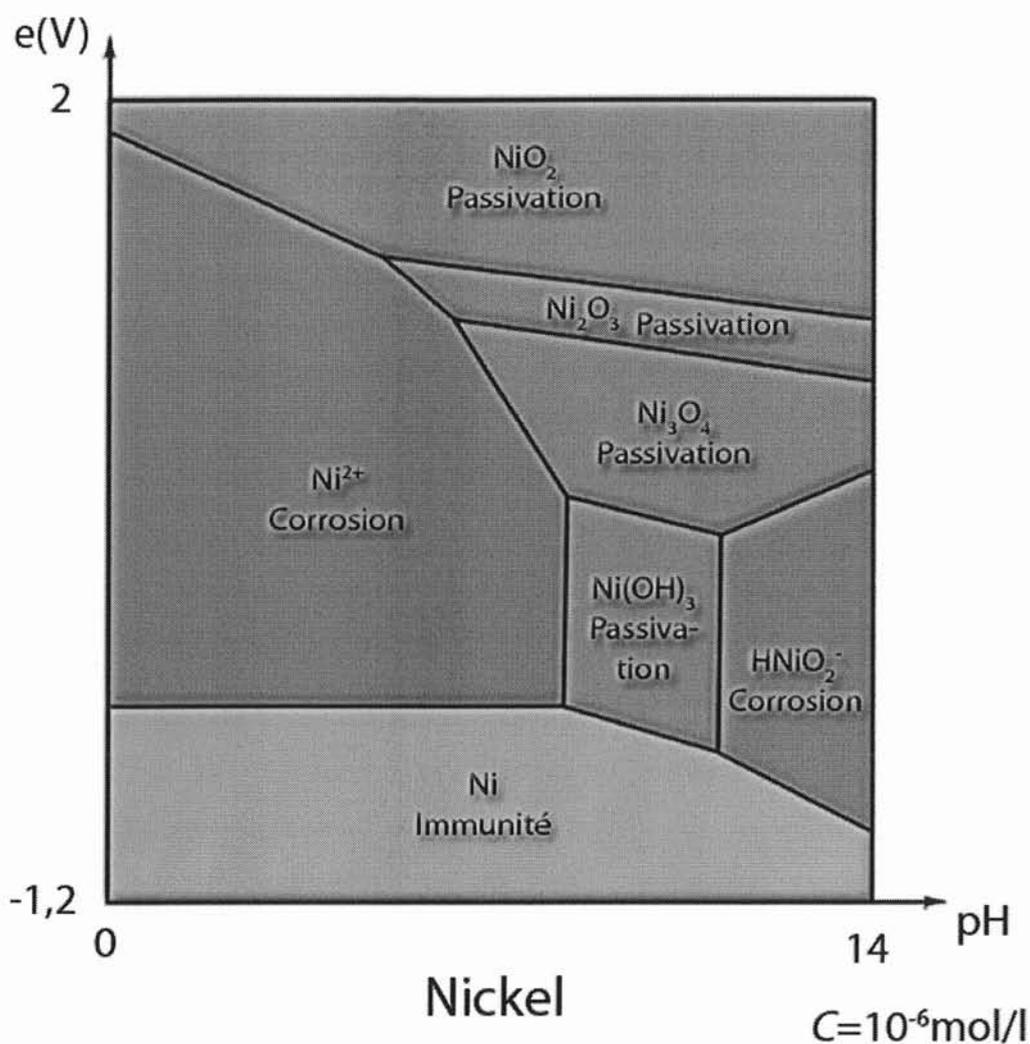


Figure 19 - Diagramme de POURBAIX du nickel, d'après ROCHAIX (78)

3.1.3.2.1.3 TEMPERATURE

Les variations de température du milieu buccal peuvent influencer les phénomènes de corrosion qui y ont lieu. Si les variations de température d'ordre physiologique sont minimales (de 36,2 à 37,2 °C ; cf. "2.3.1 Température" page 29), les prises alimentaires en revanche peuvent jouer un rôle à cet égard.

Dans le cas des aciers inoxydables, et en présence d'ions chlorure, la couche de passivation de l'alliage est sensible à la température : une augmentation de température diminue la résistance de cette couche à la dissolution. L'augmentation de température rend donc l'acier inoxydable plus vulnérable à la corrosion (CARDOSO et al., 8).

Les alliages de type NiTi sont également fortement sensibles à la température en matière de résistance à la corrosion. Un alliage NiTi peut présenter une phase austénitique, martensitique (deux phases solides de configurations cristallographiques différentes), ou les deux en même temps en fonction de la température (FILLEUL, 24). WANG et al. (90) ont constaté que le NiTi est plus vulnérable à la corrosion (i_{cor} diminue) en phase austénitique que lorsque coexistent une phase austénitique et martensitique. Par conséquent, l'alliage est plus vulnérable à la corrosion pour des valeurs de température du milieu supérieures à A_f ("Austenite finish" : température à partir de laquelle l'alliage est totalement en phase austénitique). D'autre part PUN et al. (75) ont constaté que lorsque la température augmente i_{cor} augmente également (l'alliage se corrode plus vite), et ce phénomène est d'autant plus marqué que la valeur A_f de l'alliage est faible. Ainsi en soumettant un échantillon de "27°C copper Ni-Ti" (A_f évaluée à 21°C) à une température de 45°C, les auteurs ont observé une valeur i_{cor} trois fois plus grande qu'à 37°C.

3.1.3.2.2 PHENOMENES MECANIQUES

Dans la cavité buccale, les alliages métalliques sont soumis à de nombreuses sollicitations mécaniques, entre autres lors de la mastication. Celles-ci ont tendance à favoriser les phénomènes de corrosion, de diverses manières.

La contrainte peut causer des modifications électrochimiques au sein de l'alliage lui-même, initiant ainsi un phénomène de corrosion sous contrainte (cf. "3.1.2.2.4.5 Corrosion sous contrainte" page 53). Mais on assiste aussi à une dégradation par ces phénomènes mécaniques de la couche d'oxydes protectrice des alliages, élément clé de leur résistance à la corrosion.

Ainsi selon HWANG et al. (39), le brossage des dents peut éliminer ces couches d'oxydes.

Selon VON FRAUNHOFER (89), les frottements occasionnés par le mouvement lent et continu entre la surface de l'arc et des brackets, endommagent la couche d'oxyde. Il en va de même pour l'effet abrasif des aliments lors des cycles masticatoires.

LIU et al. (61) considèrent que les arcs utilisés au cours d'un traitement orthodontique sont soumis à des contraintes de flexion sur de longues durées. Ils ont étudié le rôle de ces contraintes sur des fils de nickel-titane immergés dans un milieu salivaire artificiel : les fils soumis à un essai de flexion en trois points présentent un potentiel de corrosion significativement plus faible que les fils d'un groupe contrôle non soumis à la flexion. Les auteurs ont observé que pour les spécimens soumis aux contraintes de flexion, des perforations ou des craquements de la couche d'oxyde protectrice

survenaient au centre de la zone de flexion, ce qui explique la plus grande vulnérabilité à la corrosion.

Enfin KEROSUO et al. (51) ont étudié les contraintes mécaniques répétitives subies par les arcs et les brackets au moyen d'un banc d'essai. Le dispositif pouvait accueillir un demi-arc et six attaches mues par un arbre à cames (cf. "4.4 Autres considérations" page 84 pour une description plus détaillée), ce qui permettait d'appliquer au système des mouvements dans l'espace. Les auteurs ont observé une perte d'ions métalliques significativement plus importante de la part du système arc attaches en mouvement que pour un système témoin statique.

3.1.4 EFFETS INDESIRABLES DE LA CORROSION

3.1.4.1 ALTERATION DE L'ETAT DE SURFACE ET AUGMENTATION DES FORCES DE FROTTEMENT

La friction agit à la surface entre deux corps lorsque l'un glisse au contact de l'autre. Le sens de cette force de friction est parallèle aux deux surfaces en contact. Son amplitude est proportionnelle à la force normale aux deux surfaces qui les applique au contact l'une de l'autre, ainsi qu'au coefficient de friction. Ce coefficient dépend de paramètres caractérisant les surfaces en contact, tels que la rugosité des surfaces et la lubrification notamment (BAKER et al., 2).

Or la corrosion des alliages a pour effet une augmentation de leur rugosité via la formation des produits de la réaction en surface (OH et al., 71). HUANG et al. (35) faisaient la même constatation dans une étude visant à évaluer le comportement de fils Ni-Ti immergés plusieurs jours en milieu salivaire artificiel de pH 6,25 ou inférieur : les auteurs relevaient systématiquement une augmentation de la rugosité de la surface des fils, dont la couche de passivation est pourtant parmi les plus résistantes.

Ces données sont très intéressantes pour le clinicien, car les frottements sont mis en jeu dans les mécaniques orthodontiques de glissement. Selon OH et al. (71) et KAO et al. (46) des valeurs élevées des forces de frottement peuvent avoir un effet désastreux sur le déroulement du traitement orthodontique, en occasionnant :

- Une augmentation du temps de traitement
- Une diminution de la précision des mouvements dentaires

- Une diminution ou un blocage du déplacement dentaire, pouvant occasionner une perte d'ancrage
- Un décollement de brackets.

3.1.4.2 NOCIVITE DES IONS METALLIQUES RELARGUES

Comme nous l'avons vu précédemment, lorsqu'a lieu la corrosion d'un métal, on assiste à la libération dans le milieu d'ions et d'autres produits de corrosion issus de la réaction. On trouve dans la littérature de nombreuses études montrant la libération par les alliages orthodontiques d'ions connus pour leur nocivité :

- Les produits majoritaires issus de la corrosion de l'acier inoxydable sont le fer, le chrome, et le nickel (ELIADES et al., 19).
- Les alliages de type NiTi libèrent des ions nickel (HUANG et al., 35).
- L'Elgiloy libère du nickel et du cobalt (ES-SOUNI et al., 21).
- On peut également observer la libération d'ions titane par les alliages en contenant (HUANG et al., 35), mais le titane n'est pas nocif (STAFFOLANI et al., 86). Pour cette raison, chez les patients à risque (notamment ceux présentant une hypersensibilité au nickel) ELIADES et al. (19) recommandent l'utilisation de brackets en titane ou en céramique, et d'arcs en TMA.

Il est important de noter que la quantité d'ions libérés par un alliage est proportionnelle à la corrosion de ce dernier, et non pas à sa teneur en cet ion. Ainsi par exemple dans une étude in vitro, GRIMSDOTTIR et al. (29) observaient que les fils en acier inoxydable (contenant en moyenne 8% de nickel) relarguaient plus d'ions nickel que des fils de type Ni-Ti (contenant jusqu'à 50% de nickel). Cela est dû à la plus grande résistance à la corrosion des fils en nickel-titane.

3.1.4.2.1 CYTOTOXICITE

Dans la pratique, il existe une controverse au sujet des dangers potentiels des ions relargués par les dispositifs orthodontiques.

TOMAKIDI et al. (88) et MOCKERS et al. (67) sont arrivés aux mêmes conclusions : les ions relargués n'ont pas montré d'effet cytotoxique sur les cultures cellulaires.

Au contraire, KAO et al. (45) ont démontré que les ions libérés en milieu salivaire artificiel par des arcs en acier inoxydable et en NiTi pouvaient être cytotoxiques. L'expérience était cependant réalisée dans des conditions d'acidité importante, et en présence d'ions fluorure.

3.1.4.2.2 HYPERSENSIBILITE AU NICKEL

Le nickel est susceptible de produire plus de réactions allergiques que tout autre élément métallique (HUANG et al., 35) et c'est donc ce dernier qui fait l'objet de la majorité des études traitant d'allergies aux métaux utilisés en orthodontie. L'allergie au nickel touche environ 20 % des femmes, et 2 % des hommes (KEROSUO et al., 50), il s'agit d'une hypersensibilité retardée (de type IV) se manifestant par des signes cliniques observables : inflammation, vésiculation, suintement (DUCOMBS et al., 17).

Le problème de l'hypersensibilité est lui aussi controversé. De nombreux auteurs ont conclu qu'un traitement orthodontique n'induit ou n'aggrave pas l'existence d'une hypersensibilité au nickel (JANSON et al., 42 ; JENSEN et al., 43). Il pourrait même bénéficier au patient en induisant une tolérance au nickel, qui préviendrait la survenue ultérieure d'allergies (KEROSUO et al., 50). Toutefois, en parallèle des rapports isolés font état de manifestations allergiques imposant des modifications des dispositifs en place (cf. Figure 20) (BISHARA, 7).

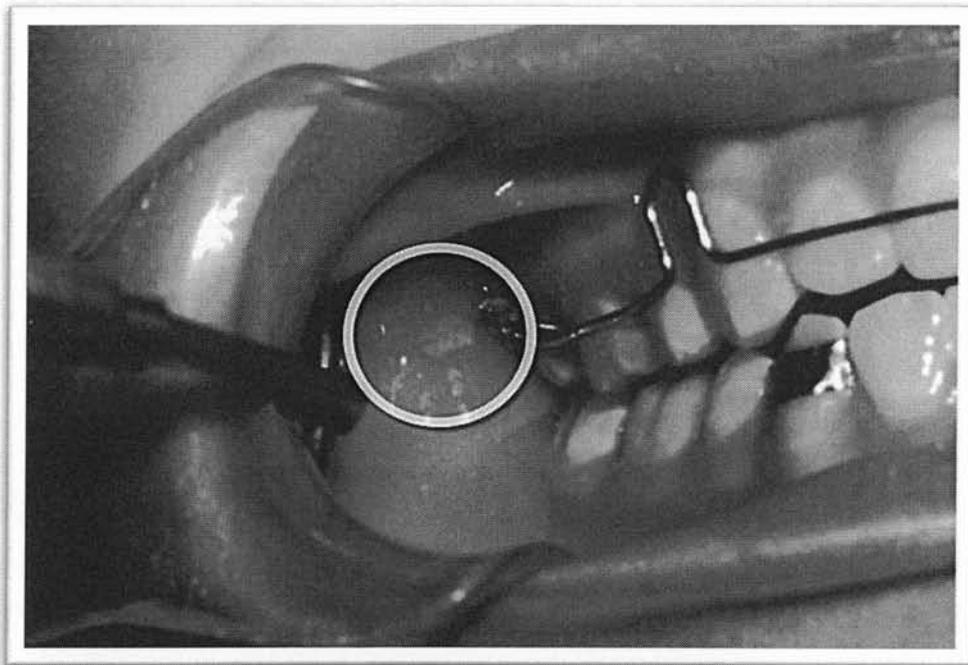


Figure 20 – Lésion muqueuse d'origine allergique, d'après BISHARA (7)

3.1.4.3 COLORATIONS PAR LES IONS METALLIQUES

Des particules métalliques issues des réactions de corrosion peuvent diffuser au sein de la couche d'adhésif. Ce phénomène est notamment observable lors de la dépose de brackets métalliques, avant le polissage : la couche de résine présente alors des taches de couleur métallique (cf. Figure 21). Mais on peut également observer des taches similaires lors de la dépose de brackets non métalliques, les produits de corrosion étant alors probablement issus de l'arc (ELIADES et al., 19). Plus grave, MAIJER et al. (63) ont signalé des cas de taches amélares. Ces taches surviennent lorsque les produits de corrosion diffusent au-delà de la couche adhésive, du fait d'une trop grande porosité, de la présence de fissures, ou de déficits localisés de la couche d'adhésif.

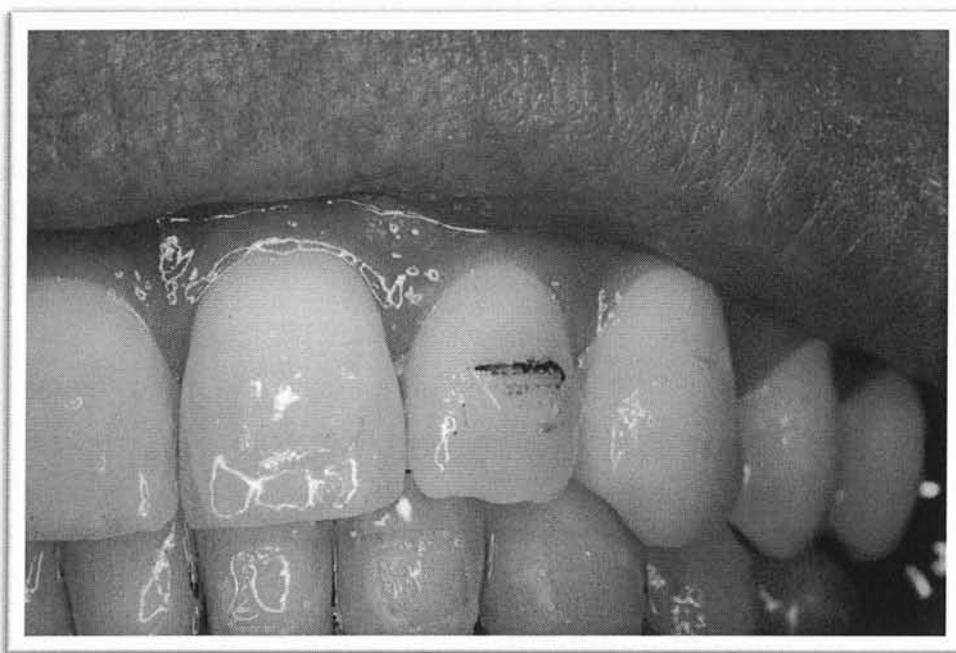


Figure 21 – Coloration métallique de la couche d'adhésif due aux produits de corrosion, d'après ELIADES et al. (19)

3.2 LA CORROSION EN MILIEU SALIVAIRE ARTIFICIEL

3.2.1 LES SALIVES ARTIFICIELLES

3.2.1.1 DEFINITION ET CHAMPS D'APPLICATION

Une salive artificielle est un milieu d'essai simulant la salive naturelle (ISO, 41).

Les biomatériaux dentaires sont baignés en permanence par la salive durant leur service, c'est pourquoi on cherche à reproduire les propriétés de ce milieu durant leur phase de test. L'immersion des échantillons directement au sein de prélèvements de salive naturelle serait inapproprié à cet usage, pour plusieurs raisons : d'abord la difficulté à se procurer de salive naturelle en grande quantité et à résoudre les problèmes d'asepsie inhérents à cette procédure. Mais le principal obstacle est la composition complexe et inconstante de la salive naturelle, très fortement variable d'un individu à l'autre, et même au sein d'un seul individu. C'est pourquoi préfère-t-on l'utilisation de salive artificielle, reproductible et basée sur la composition moyenne de la salive naturelle, afin de standardiser les tests (GAL et al., 25 ; LEUNG et al., 58).

Les salives artificielles présentent un vaste champ d'applications, aussi bien dans le domaine de la recherche en sciences biologiques ou des matériaux que de la clinique (LEUNG et al. 58) :

- Tests in vitro de corrosion d'alliages dentaires (alliages précieux, acier, titane, amalgame...)
- Étude du processus carieux, de la captation de fluor par l'émail, de la nucléation de l'hydroxyapatite, de la reminéralisation de l'émail, de la formation du tartre...
- Caractérisation physico-chimique des polymères, évaluation de l'absorption hydrique des polymères, du relargage de fluor par les verres-ionomères...
- Culture bactérienne de plaque dentaire
- Salive de substitution pour les patients souffrant de xérostomie.

3.2.1.2 COMPOSITION

Depuis leur première utilisation en 1931 et jusqu'à aujourd'hui, on recense plus de 60 formules différentes dans la littérature (cf. Tableau 6).

Dans leur grande majorité ces formules consistent en une compilation d'éléments inorganiques rencontrés dans la salive naturelle, en solution aqueuse : calcium, potassium, sodium, chlorure, thiocyanate, ammonium, magnésium, phosphate, bicarbonate... Le problème est que bien souvent les auteurs font des choix arbitraires dans la détermination des éléments incorporés à la solution. Ainsi dans de très nombreuses formules des composants sont omis, principalement le calcium, bicarbonate et thiocyanate (dont le rôle de chacun est pourtant avéré dans les mécanismes de corrosion, ou dans le maintien de l'intégrité de l'émail pour le calcium). A l'inverse on observe parfois des ajouts d'éléments étrangers à la salive naturelle : des sulfates notamment. Enfin les concentrations des différents solutés ne sont pas toujours fidèles à celles observées in vivo : le taux de chlorure, impliqué dans la corrosion, s'élève jusqu'à 215 mmol/l dans certaines formules, contre 16 mmol/l dans la salive naturelle.

La composante organique de la salive est encore plus rarement prise en compte : elle est formée principalement des glycoprotéines mucines, responsables de la viscosité de la salive, mais elles sont presque systématiquement exclues des formules (car plus difficiles à obtenir que les sels minéraux), seuls de rares auteurs tel SHELLIS font exception (GAL et al. 25). Dans le cas particulier des salives artificielles à usage médical, ce sont souvent des molécules synthétiques (hydroxyéthylcellulose ou carboxyméthylcellulose) qui remplacent les mucines afin d'assurer le rôle lubrifiant (DE QUEIROZ et al., 15).

Selon LEUNG et al. (58), l'affinement d'une formule grâce à l'étude du rôle, des implications et de la proportion de chaque constituant permet d'assurer un domaine d'application vaste et la meilleure fiabilité possible.

Formules des salives artificielles décrites dans la littérature (concentrations en mmol/l)

Salive artificielle	Année	Ca ²⁺	CO ₃ tot*	Pi tot**	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SCN ⁻	NH ₄ ⁺	S***	pH
Souder	1931	0.25	0.00	0.31	0.00	1.03	0.62	1.84	0.00	0.00		-
Greenwood	1937	5.80	0.00	16.79	0.00	58.60	14.64	32.19	0.00	0.00		6.7
Worner	1937	5.80	0.00	8.75	0.00	42.52	14.64	32.19	0.00	0.00		-
Muhler	1947	6.00	5.99	4.24	0.02	5.37	15.30	12.21	0.00	0.00	+	-
Wasserman	1958	1.02	6.43	3.87	0.00	4.69	84.16	76.72	0.00	0.00		-
Vielra	1961	0.00	1.19	3.62	0.00	0.00	1.85	13.69	0.00	4.54		-
Fusayama	1963	5.41	0.00	4.23	0.01	5.37	15.34	23.02	0.00	0.00	+	-
Ringer	1963	1.14	2.38	0.00	0.00	5.37	156.38	161.65	0.00	0.00		-
Hay	1966	2.14	10.12	5.45	0.42	18.18	13.04	15.43	2.23	5.61		-
Carter	1967	2.90	17.85	3.08	0.00	21.48	29.83	28.08	3.40	0.00		-
Tani	1967	0.00	14.91	1.36	0.00	25.06	10.96	19.73	5.33	0.00		6.7
Guthrow	1967	5.99	5.99	0.00	0.02	6.71	11.85	13.55	0.00	0.00	+	7.1
Mukherjee	1968	2.00	20.00	3.00	0.00	0.00	23.00	4.00	0.00	0.00		7.2
Brugirard	1970	0.00	17.85	2.98	0.00	21.48	33.49	28.07	3.40	0.00		6.7
Melcer	1972	0.00	17.86	2.98	0.00	21.79	33.50	28.08	3.40	0.00		-
Matzer	1973	1.27	0.00	1.96	0.48	21.05	14.43	34.03	1.03	0.00		7.2
Meyer (Fusayama)	1975	6.12	0.00	5.00	0.00	5.36	11.84	24.46	0.00	0.00		5.0
Stookey	1976	0.30	0.00	0.80	0.00	1.10	1.80	1.70	0.00	0.00	+	7.0
Ellis	1977	1.44	9.12	57.38	0.00	116.51	13.10	6.82	2.27	0.00		-
Shannon	1977	1.53	0.00	6.80	0.63	19.71	14.99	26.67	0.00	0.00		-
Darvell	1978	0.00	7.10	4.70	0.00	0.00	27.14	29.80	2.50	4.10		6.8
Shellis	1978	1.43	6.45	5.10	0.00	20.50	11.55	23.22	2.30	4.35		-
Holland	1980	5.41	0.00	5.00	0.00	5.37	11.89	23.03	0.00	0.00	+	5.1
DeMagistris	1981	0.00	0.00	2.74	0.00	20.97	4.35	18.90	2.07	0.00		-
Lagerlöf	1984	0.30	0.00	10.00	0.06	20.00	10.00	20.66	0.00	0.00		7.0
AFNOR S91B	1985	5.40	0.00	5.00	0.00	5.36	11.90	23.02	0.00	0.00	+	5.0
Canivet	1985	5.40	23.80	14.08	0.00	34.22	53.53	45.04	1.55	0.00	+	-
Di Costanzo	1985	1.50	5.00	0.00	0.40	10.00	10.00	18.80	0.00	0.00		-
Palaghias C	1985	1.50	15.00	15.00	0.00	0.00	37.50	3.00	0.00	0.00		-
Palaghias Cab	1985	1.50	15.00	15.00	0.00	0.00	47.50	13.00	0.00	0.00		-
Ten Cate	1985	0.00	0.00	0.90	0.00	150.90	1.50	150.00	0.00	0.00		7.0
Kem	1986	0.00	0.00	12.30	0.06	0.00	15.50	18.78	0.00	9.09		-
Joyston	1987	1.32	20.00	3.90	0.00	0.00	23.90	2.65	0.00	0.00		7.2
Glandosane	1987	0.99	0.00	1.96	0.26	20.02	14.44	33.04	0.00	0.00		5.06
Luborant	1987	1.50	0.00	7.30	0.61	20.30	0.10	12.61	0.00	0.00		6.86
Orthana	1987	0.69	0.00	2.01	0.25	21.15	14.55	32.50	1.03	0.00		7.7
Johansson	1989	5.40	0.00	5.00	0.00	5.40	11.84	23.00	0.00	0.00	+	-
Leung	1989	0.00	0.00	4.67	0.00	25.74	28.16	29.84	2.24	4.10		-
Marek	1990	0.00	17.90	3.60	0.00	25.20	21.50	20.10	5.10	0.00		6.85
Sieck	1990	1.09	0.00	0.68	0.00	30.68	0.00	32.18	0.00	0.00		7.0
Mas 84	1991	1.35	0.00	2.01	0.53	20.12	14.55	34.39	0.00	0.00		-
Papadogiannis	1991	1.00	17.86	1.00	0.00	0.00	51.14	37.08	0.00	0.00		-
Blake	1992	1.50	8.20	4.00	0.00	141.00	13.00	144.80	0.00	0.00		-
Caney	1992	0.00	0.00	63.55	0.00	232.40	90.70	215.44	0.00	0.00		7.0
ISO	1992	5.41	0.00	5.00	0.00	5.36	11.90	23.02	0.00	0.00		5.0
Tai	1992	6.16	0.00	4.31	0.00	5.36	15.60	24.53	0.00	0.00		-
AFNOR NF S90-701	1993	0.00	17.85	3.30	0.00	20.96	136.10	130.74	3.40	0.00		-
AFNOR NF S91-141	1993	0.00	17.80	3.50	0.00	20.90	31.80	28.00	3.40	0.00		-
Barret	1993	0.00	0.00	5.00	0.00	16.23	11.88	23.07	0.00	0.00	+	6.7
Luthy	1994	6.12	0.00	5.00	0.00	5.36	11.89	24.46	0.00	0.00	+	5.5
Olsson	1994	7.16	0.00	5.00	0.00	5.37	11.9	26.5	0.00	0.00	+	-
Oralube	1994	0.00	0.00	7.01	2.9	20.01	0.00	14.19	0.00	0.00		7.2
Oralube bis	1994	0.82	0.00	7.01	2.9	20.01	0.00	15.82	0.00	0.00		7.2
Zampatti	1994	1.08	2.38	6.79	0.29	22.08	10.20	23.64	0.00	0.00		7.0
Artisial	1995	1.13	0.00	7.00	0.29	20.00	14.81	26.03	0.00	0.00		-
Davidas	1995	0.00	17.86	3.30	0.00	4.87	33.50	11.98	3.40	0.00		-
Syaline	1995	1.01	0.00	2.00	0.26	20.33	14.65	33.51	0.00	0.00		7.8
SAGF	1995	1.55	7.51	4.81	0.00	19.69	14.40	21.51	1.95	3.33		6.8
Van der Reijden	1996	0.88	0.00	2.01	0.25	20.12	14.55	32.9	0.00	0.00		-

*CO₃tot = [CO₃²⁻] + [HCO₃⁻] + [CO₂ dissout]; **Pi tot = [PO₄³⁻] + [HPO₄²⁻] + [H₂PO₄⁻]; ***S + : présence de sulfates

Tableau 6 - Formules des salives artificielles décrites dans la littérature, d'après GAL et al. (25)

3.2.2 LES TESTS DE CORROSION

3.2.2.1 ESSAI D'IMMERSION STATIQUE

Dans ce protocole expérimental préconisé par l'ISO (41), on place séparément chacun des échantillons à tester dans un récipient en verre, en veillant à ce que la surface de contact entre l'échantillon et le verre soit minimale. Les échantillons sont utilisés dans l'état dans lequel ils sont reçus pour ce qui concerne les dispositifs préfabriqués, s'ils sont constitués de plusieurs pièces on évitera que celles-ci se touchent. Le récipient utilisé est un tube à essai en verre borosilicaté et de 16 mm de diamètre et 160 mm de hauteur.

On ajoute dans chaque récipient la solution en quantité suffisante pour obtenir un rapport de 1 ml par 1 cm² de surface d'échantillon testé. On enregistre le volume de solution. La solution utilisée dans le protocole préconisé par l'ISO est une solution de 10 g/l d'acide lactique et 5,85 g/l de chlorure de sodium, de pH 2,3.

On referme le récipient qui sera maintenu à 37° Celsius pendant sept jours. À l'issue de ce délai, on retire les échantillons, on mesure le pH de la solution résiduelle, et on procède à l'analyse quantitative et qualitative de la solution. Au moyen d'une instrumentation de mesure analytique, chaque élément retrouvé dans la solution résiduelle de chaque essai est quantifié en µg/cm²/7jours, notamment les éléments dangereux (les éventuels métaux lourds relargués par l'échantillon par exemple).

3.2.2.2 ESSAI ELECTROCHIMIQUE

Cette méthode d'essai nécessite l'utilisation d'une cellule d'étude électrochimique.

Il s'agit d'un dispositif expérimental à trois électrodes (AFNOR, 1 ; ISO, 41):

- Une électrode de travail constituée par le matériau à tester. Le potentiel de l'électrode de travail est égal à la différence de potentiel, imposée par le potentiostat, entre celle-ci et l'électrode de référence prise comme zéro de potentiel.
- Une électrode de référence à potentiel constant (électrode saturée au calomel, ESC). L'électrode de référence est connectée à la cellule de mesure par l'intermédiaire d'un pont électrolytique qui se termine par un capillaire de Luggin (tube de verre à lumière fine) dont l'extrémité débouche dans l'électrolyte à proximité de l'électrode de travail.

- Une contre-électrode (en carbone vitreux), dans laquelle passe le courant.

La cellule comprend également un dispositif de barbotage gazeux (permettant la désaération de la solution par un gaz neutre), un agitateur magnétique mû par un moteur placé sous la cellule, et la cuve à double paroi permet le passage d'eau thermostatée afin de garder constante la température de l'électrolyte tout au long des essais. L'électrolyte utilisé est une salive artificielle.

Le schéma d'une cellule électrochimique est représenté à la Figure 22, et le schéma du circuit électrique mis en jeu est représenté à la Figure 23.

Il est possible de réaliser au moyen de la cellule électrochimique deux types d'essais : un essai potentiodynamique (la chronoampérométrie à variation linéaire de potentiel) et un essai à potentiel constant (la chronoampérométrie à potentiel constant). Ils consistent tous deux à mesurer à un potentiel défini la quantité de courant qui traverse l'interphase matériau-solution.

L'emploi conjugué des deux méthodes présente l'avantage de pouvoir décrire un phénomène de biodégradation sous ses aspects qualitatifs (au moyen du voltammogramme $I(E)$ donné par l'essai potentiodynamique) et quantitatif (au moyen de la courbe $I_{E=Cst}(t)$ donnée par l'essai à potentiel constant) (AFNOR 1).

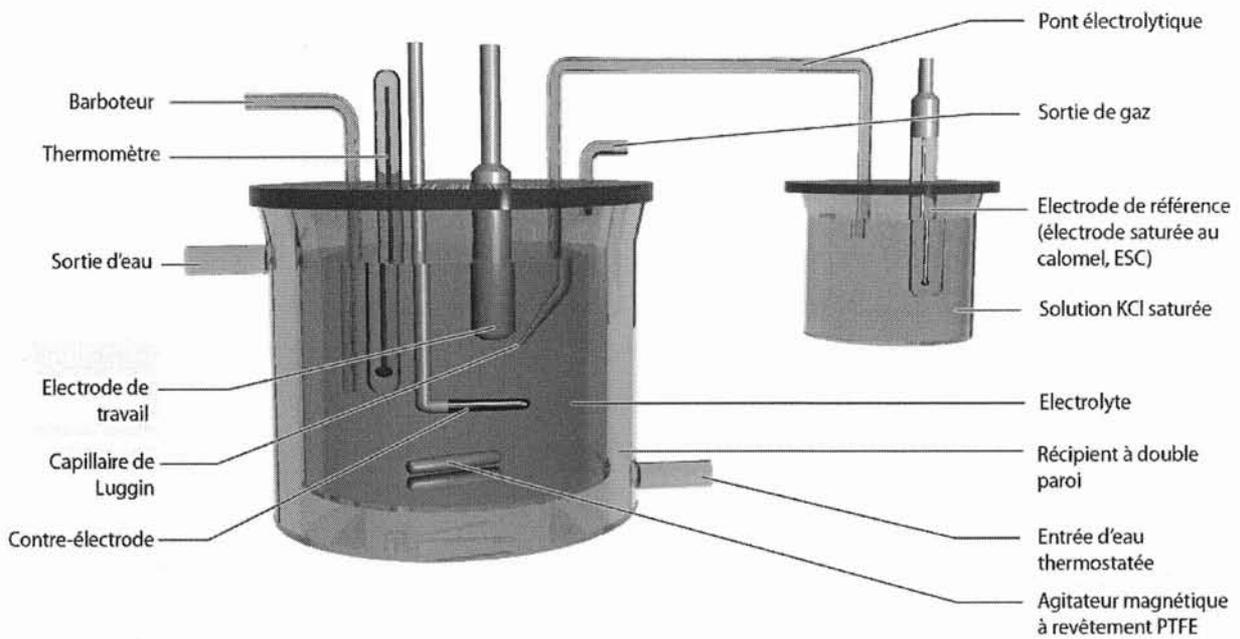


Figure 22 – Cellule d'étude électrochimique, d'après AFNOR (1)

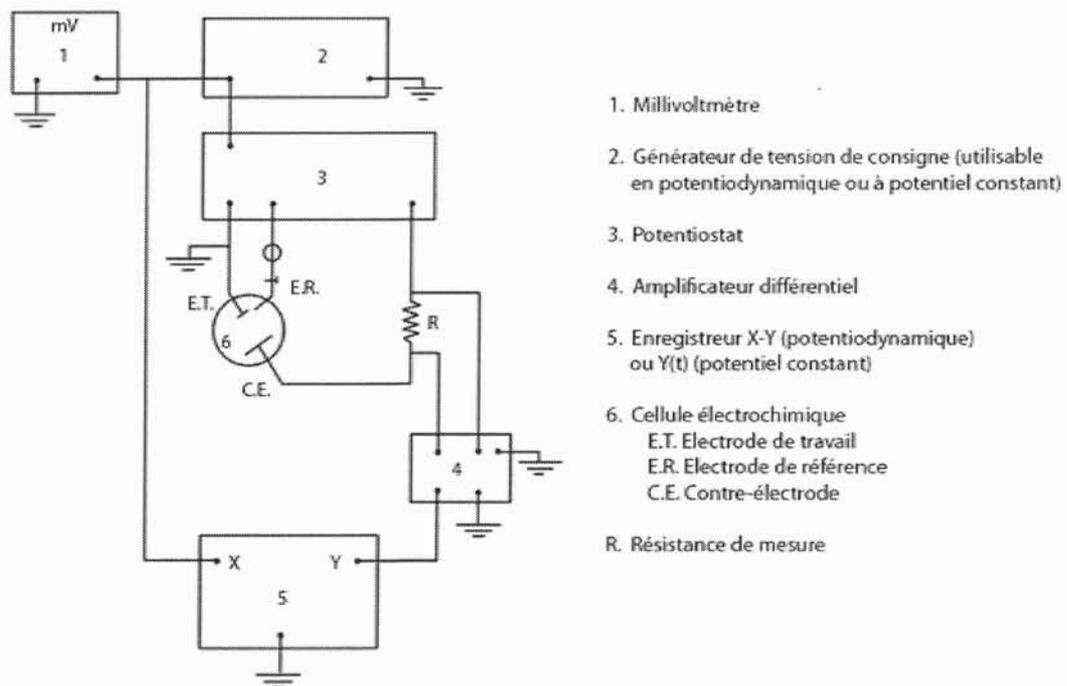


Figure 23 – Circuit électrique de la cellule d'étude électrochimique, d'après AFNOR (1)

3.2.2.2.1 CHRONOAMPEROMETRIE CYCLIQUE A VARIATION LINEAIRE DE POTENTIEL

Cette technique potentiodynamique consiste à faire varier le potentiel de l'électrode de travail linéairement en fonction du temps dans un domaine de potentiel défini. Un générateur de tension pilote le potentiel et permet d'effectuer des cycles de balayage en potentiel à la vitesse désirée. On mesure le courant traversant le système au cours du balayage et l'on trace les voltammogrammes cycliques à l'aide d'un enregistreur X-Y.

Après immersion dans la solution, le potentiel de repos de l'électrode de travail est mesuré. Cette valeur sert de repère pour déterminer le point de départ du balayage. On effectue celui-ci vers les potentiels positifs à une vitesse constante ($5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ le plus souvent), jusqu'à une borne supérieure déterminée par la limite du domaine de passivation. On obtient ainsi une courbe $I(E)$ (cf Figure 24).

Cette méthode permet de révéler le comportement électrochimique général du matériau dans un domaine de potentiel défini. La morphologie des courbes indique : les zones de réactivité (anodiques et cathodiques) la zone de passivation dans laquelle l'amplitude du courant est voisine de zéro et la présence éventuelle de phénomènes d'hystérésis. Il est possible, à l'issue d'un cycle de balayage, d'effectuer un balayage en sens inverse jusqu'au retour au potentiel initial pour obtenir des informations sur la résistance du matériau à la corrosion par piqûre.

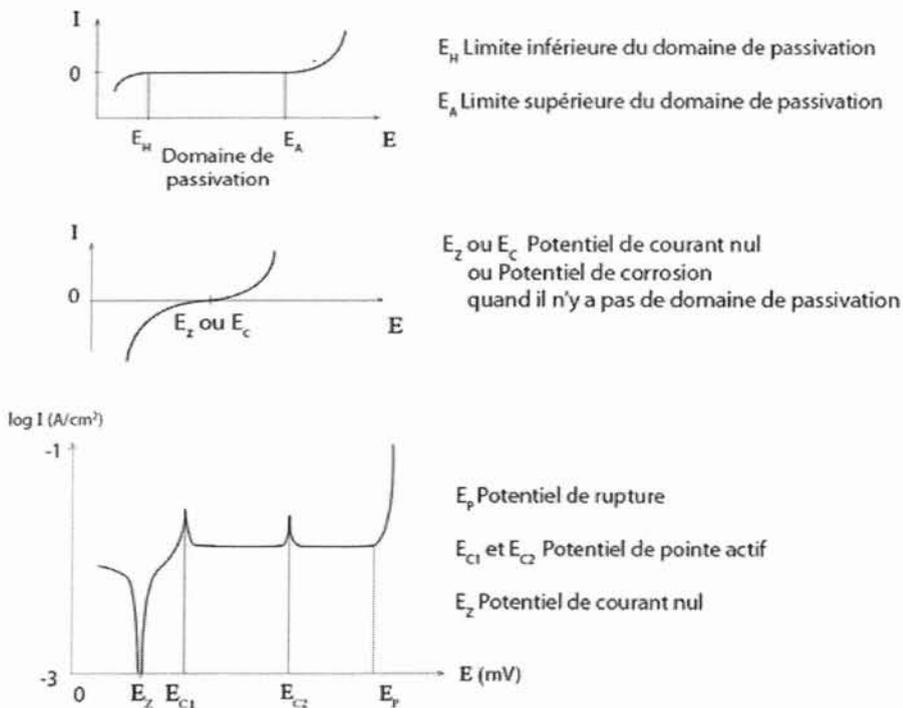


Figure 24 – Exemples de voltammogrammes, d'après AFNOR (1) ; ISO (41)

3.2.2.2.2 CHRONOAMPEROMETRIE A POTENTIEL CONSTANT

Le potentiel électrochimique d'un matériau au contact d'un milieu biologique est normalement situé à l'intérieur du domaine de passivation de celui-ci. Dans cette zone de potentiel, certains éléments de l'alliage métallique peuvent néanmoins subir une dégradation électrochimique lente et se dissoudre progressivement dans le milieu environnant.

La technique de chronoampérométrie à potentiel constant consiste à maintenir le matériau à un potentiel voisin de la limite positive du domaine de passivation et permet ainsi d'accroître la cinétique du processus de dégradation : cette accélération du vieillissement du matériau permet de simuler en un temps réduit une longue période de contact avec le milieu biologique. On peut par exemple déterminer par cette technique les quantités de produits de dégradation dissous dans la solution (AFNOR 1).

Le domaine de passivation doit être préalablement défini par chronoampérométrie à variation linéaire de potentiel. On effectue les tests sur des périodes de 1h et 5h.

3.2.2.3 ESSAI D'IMMERSION DYNAMIQUE (ESSAI DE TERNISSEMENT)

Les échantillons sont placés sur un dispositif d'immersion, permettant de plonger l'échantillon puis de l'extraire de la solution cycliquement à raison de 10 à 15 secondes d'immersion par minute. La température est maintenue à 23° C, l'essai est réalisé sous une hotte aspirante. La solution doit être remplacée toutes les 24 heures, puis les échantillons sont récupérés, rincés et séchés au bout de 72 heures.

Le contrôle consiste à comparer visuellement, sans grossissement, les surfaces traitées et non traitées, pour vérifier la présence éventuelle de signes de détérioration.

La solution utilisée pour cet essai dans le cadre du protocole décrit par l'ISO (41) est une solution de 22,3 g/l d'hydrate de sulfure de sodium (Na_2S , H_2O).

4 SELECTION D'UNE SALIVE ARTIFICIELLE DESTINEE A DES TESTS DE CORROSION D'ALLIAGES ORTHODONTIQUES

Avant toute chose, il convient de préciser que répliquer exactement les propriétés de la salive naturelle est impossible (GAL et al., 25 ; LEUNG et al., 58). En effet comme nous l'avons vu précédemment, la composition et les propriétés physico-chimiques de celle-ci se montrent inconstantes d'une personne à l'autre, et même d'un prélèvement à l'autre chez une même personne.

Toutefois, la revue des nombreuses propriétés de la salive que nous avons menée doit nous permettre d'établir le cahier des charges d'une salive artificielle qui simule le plus fidèlement possible la salive naturelle. D'autre part, l'étude comparative des propriétés de plus de 60 salives artificielles menée par GAL et al. (25), ainsi que les recommandations de l'AFNOR (1) qui propose une formule de salive artificielle en vue de la standardisation des études de corrosion d'alliages dentaires, nous apportent de précieuses informations.

4.1 CAHIER DES CHARGES DE LA SALIVE ARTIFICIELLE

4.1.1 COMPOSITION

Nous avons vu au paragraphe "3.1.3.2.1.1 Composition" (page 59) que de nombreux composants de la salive participaient à la corrosion des alliages. Leur présence est donc nécessaire dans une salive artificielle.

4.1.1.1 COMPOSANTS INORGANIQUES

GAL et al. (25) considèrent que la présence de calcium, phosphate, bicarbonate et thiocyanate est obligatoire dans une salive artificielle. La salive artificielle "SAGF" (Salive Artificielle GAL FOVET) développée par ces auteurs comprend en plus des éléments précédemment cités les ions K^+ , Na^+ , Cl^- , et NH_4^+ . Dans le modèle proposé par l'AFNOR (1), sont présents les ions HCO_3^- , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SCN^- , en revanche le calcium est absent.

De plus la teneur en ions du milieu détermine sa conductivité électrique, une conductivité plus importante entraînant une vitesse de corrosion accrue (GAL et al., 25). Il est donc important de respecter, pour chaque ion, une concentration fidèle à celle rencontrée dans la salive naturelle.

✓ Critères de composition retenus au cahier des charges (cf. Tableau 1) :

• Chlorure (Cl^-).....	16 ±7 mmol/l
• Sodium (Na^+).....	9 ±6 mmol/l
• Phosphates (sous forme PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , ou $H_2PO_4^-$).....	6 ±2,6 mmol/l
• Bicarbonate (sous forme CO_3^{2-} , ou HCO_3^-).....	4 ±3 mmol/l
• Calcium (Ca^{2+}).....	1,3 ±0,27 mmol/l
• Potassium (K^+).....	21,5 ±5,7 mmol/l
• Thiocyanate (SCN^-).....	1,5 ±1 mmol/l

4.1.1.2 COMPOSANTS ORGANIQUES

Nous avons vu aux paragraphes "2.3.4 Viscosité et pouvoir lubrifiant" (page 32) et "3.1.3.2.1.1 Composition" (page 59) que les α -amylases sont présentes en grande quantité dans la salive, et susceptibles d'interférer avec la corrosion des alliages. Il en va de même pour les mucines, qui sont en plus responsables de la viscosité salivaire.

✓ Critères de composition retenus :

- Glycoprotéines mucines
- α -amylase

4.1.2 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

4.1.2.1 pH ET POUVOIR TAMPON

Nous avons vu précédemment (paragraphe "2.3.2 pH" page 30) que le pH salivaire moyen était voisin de 6,8. Ce paramètre est important dans la détermination des phénomènes de corrosion.

Le pouvoir tampon quant à lui détermine la capacité de la salive artificielle à résister aux variations de pH (cf. "2.3.3 Pouvoir tampon" page 31), il est donc également important pour l'étude de la corrosion.

✓ Critères retenus au cahier des charges :

- Pouvoir tampon voisin de $5,7 \mu\text{Eq} \cdot \text{mL}^{-1}$ pour la titration acide de la solution à 24°C en équilibre avec l'air.
- pH initial à 6,8.

4.1.2.2 TEMPERATURE

La température de la salive artificielle doit être maintenue à 37°C pour simuler les conditions de la cavité buccale (AFNOR, 1 ; ISO, 41).

4.2 SALIVE ARTIFICIELLE RETENUE

4.2.1 COMPARATIF SELON LES CRITERES RETENUS

➤ COMPOSANTS INORGANIQUES

Au vu de ce critère, seules trois salives artificielles parmi les 60 citées au Tableau 6 présentaient les ions requis dans des proportions fidèles à celles de la salive naturelle (GAL et al., 25) :

- La formule SAGF de GAL
- La formule de SHELLIS
- La formule de HAY

Formules des salives artificielles de GAL, SHELLIS, et HAY (extrait du Tableau 6)												
Salive artificielle	Année	Ca ²⁺	CO ₃ tot ⁺	Pi tot ^{**}	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SCN ⁻	NH ₄ ⁺	S ^{***}	pH
SAGF	1995	1.55	7.51	4.81	0.00	19.69	14.40	21.51	1.95	3.33		6.8
Shellis	1978	1.43	6.45	5.10	0.00	20.50	11.55	23.22	2.30	4.35		-
Hay	1966	2.14	10.12	5.45	0.42	18.18	13.04	15.43	2.23	5.61		-

Tableau 7 – Rappel des formules des trois salives artificielles présentant la composition en éléments inorganiques requise.

Il faut noter que la formule proposée par HAY est assez similaire à celle de SHELLIS. Cependant la formule de SHELLIS est plus récente et ses propriétés sont mieux connues, elle est également bien plus citée dans la littérature (29 citations contre 2 selon SCOPUS, à la date du 01/09/2008). Pour ces raisons nous ne ferons mention plus que de la formule de SHELLIS dans la suite du comparatif.

➤ COMPOSANTS ORGANIQUES

- Au vu de ce critère, seule la formule de SHELLIS convient.

Ces protéines ont été délibérément omises de la SAGF. Les auteurs justifient ce choix par le fait que les glycoprotéines sont des molécules complexes, dont la présence en solution empêche le calcul d'équations d'équilibre thermodynamique. Ainsi en leur absence la SAGF est un milieu qui permet par exemple de prévoir par le calcul la formation de précipités insolubles (GAL et al., 25). Cependant ces calculs n'interviennent pas dans les protocoles d'évaluation des phénomènes de corrosion (AFNOR, 1 ; ISO, 41).

➤ pH ET POUVOIR TAMPON

- La valeur de pH 6,8 a été adoptée par GAL et al. (25) et SHELLIS (83) pour leur salive artificielle.

Cependant lors de la préparation de la salive artificielle, malgré le respect des dosages préconisés par les auteurs, le pH obtenu peut s'écarter légèrement de cette valeur, c'est pourquoi SHELLIS (83) effectue un ajustement au moyen de l'adjonction d'une solution d'acide chlorhydrique à 0,1 M sous contrôle d'un pH-mètre. Cette procédure est en accord avec les recommandations de l'AFNOR (1), qui préconise toutefois de travailler à pH 6,7 et de réaliser deux essais supplémentaires, un à pH 3,5 pour simuler des conditions acides et un autre à pH 8,5 pour simuler un milieu basique.

- La valeur de pouvoir tampon $5,7 \mu\text{Eq} \cdot \text{ml}^{-1}$ a été adopté par GAL et SHELLIS.

Ils ont adapté leur formule en conséquence, chacune donne donc des valeurs similaires à celles trouvées dans la salive naturelle. A titre de comparaison, la formule proposée par l'AFNOR (1) a un pouvoir tampon presque trois fois supérieur à la salive naturelle (GAL et al., 25).

➤ CRITERES SUBSIDIAIRES

Bien que ne figurant pas au cahier des charges, nous pouvons signaler deux spécificités intéressantes des salives artificielles les plus satisfaisantes :

- La salive artificielle de SHELLIS est apte à jouer le rôle de milieu de culture bactérien.

- La SAGF a une composition plus restreinte mais strictement déterminée permettant des calculs de chimie analytique, notamment la résolution d'équations d'équilibre thermodynamique.

4.2.2 RESULTATS

Tableau récapitulatif du comparatif des différentes salives artificielles					
Salive artificielle	Critères requis			Critères subsidiaires	
	Composants inorganiques	Composants organiques	pH et pouvoir tampon	Milieu de culture	Chimie analytique
SHELLIS	✓	✓	✓	✓	✗
SAGF	✓	✗	✓	✗	✓
Autres (Tableau 1)	✗	-	-	-	-

✓ : répond au critère ; ✗ : ne répond pas au critère ; - : n/a

Tableau 8 - Récapitulatif du comparatif des différentes salives artificielles

Au vu des critères retenus au cahier des charges (cf. Tableau 8), la salive artificielle la plus appropriée aux essais de corrosion in vitro des alliages orthodontiques est la suivante :

➤ LA SALIVE ARTIFICIELLE FORMULEE PAR SHELLIS

L'auteur l'a mise au point à la Dental School of Bristol (Royaume-Uni) en 1978. Pour ce faire, il s'est référé fidèlement à la composition de la salive naturelle, son objectif étant d'élaborer un milieu artificiel permettant la culture de bactéries de la cavité buccale. Ces travaux sont toujours d'actualité puisqu'en 2001 WONG et al. (91) ont publié une étude mettant en œuvre une salive artificielle calquée sur celle de SHELLIS.

Outre les ions et les protéines mentionnés précédemment au cahier des charges, la salive artificielle de SHELLIS contient également de nombreux acides aminés et vitamines. Ces composants servent de nutriments et autorisent ainsi la croissance bactérienne. Cette caractéristique est particulièrement intéressante car elle étend le champ d'applications de cette salive artificielle, rendant ainsi possible l'étude des phénomènes de corrosion microbiologique. L'exclusion de cette forme de corrosion des modèles in vitro est considérée par ELIADES et al. (19) comme la plus importante lacune de ce type d'études.

➤ PROPOSITION SUBSIDIAIRE

Bien qu'elle n'ait pas satisfait au cahier des charges, nous présenterons également, à titre indicatif, la formule proposée par GAL en 1995. Celle-ci est digne d'intérêt car elle a été conçue en collaboration entre la faculté d'odontologie et le laboratoire de chimie analytique de l'université de Montpellier (France), spécifiquement en vue d'essais de corrosion. Elle est relativement récente, et sa composition moins complète est un choix consenti pour permettre des analyses plus poussées des réactions chimiques.

4.3 MODE D'EMPLOI

4.3.1 PREPARATION

➤ SALIVE ARTIFICIELLE DE SHELLIS

La préparation de la salive artificielle consiste à préparer une solution des réactifs énumérés au Tableau 9 suivant les dosages précisés. SHELLIS préconise de réaliser en premier lieu une solution contenant uniquement les acides aminés et vitamines requis suivant les dosages spécifiés, puis de la lyophiliser. La poudre obtenue peut alors aisément être pesée et ajoutée avec les autres réactifs lors de la préparation de la solution de salive artificielle.

SHELLIS décrit également une méthode pour extraire les mucines utilisées de glandes submandibulaires bovines, mais on peut plus aisément se procurer des mucines d'origine porcine dans le commerce (WONG et al., 91).

Réactifs de la salive artificielle de SHELLIS (concentrations en mg/l)

Composant	Concentration
Chlorure de calcium dihydraté (CaCl ₂ , 2H ₂ O)	210
Chlorure de magnésium hexahydraté (MgCl ₂ , 10H ₂ O)	43
Potassium dihydrogénophosphate (KH ₂ PO ₄)	354
Di sodium hydrogénophosphate (Na ₂ HPO ₄)	375
Chlorure de potassium (KCl)	1162
Chlorure d'ammonium (NH ₄ Cl)	233
Thiocyanate de potassium (KSCN)	222
Hydrogénocarbonate de sodium (NaHCO ₃)	535
Citrate de sodium	13
Urée	173
Acide urique	10.5
Choline	13
Créatinine	0.1
Albumine	25
Glycoprotéines mucines	2500
α-amylase	1000
Mélange d'acides aminés*	41
Mélange de vitamines**	0.8

* Mélange d'acides aminés (mg/l)

Composant	Concentration
Alanine	3.3
Arginine	1.9
Acide aspartique	1.6
Acide glutamique	3.9
Glycine	8.9
Histidine	1.0
Isoleucine	2.9
Leucine	2.9
Lysine	2.7
Méthionine	0.03
Phénylalanine	2.9
Proline	0.2
Sérine	2.1
Thréonine	2.9
Tyrosine	2.1
Valine	1.8

** Mélange de vitamines (mg/l)

Composant	Concentration
Thiamine	0.007
Riboflavine	0.05
Acide folique	0.0001
Acide nicotinique	0.03
Pyridoxine	0.6
Acide pantothénique	0.08
Biotine	0.0008
Vitamine B12	0.003
Vitamine K	0.015

Tableau 9 – Composants de la salive artificielle de SHELLIS (83)

➤ SAGF

La préparation de cette salive artificielle est également obtenue par mise en solution de réactifs, décrits au Tableau 10.

Réactifs de la salive artificielle de SAGF (concentrations en mg/l)	
Composant	Concentration
Chlorure de sodium (NaCl)	125.6
Chlorure de potassium (KCl)	963.9
Thiocyanate de potassium (KSCN)	189.2
Potassium dihydrogénophosphate (KH ₂ PO ₄)	654.5
Urée	200
Sulfate de sodium décahydraté (Na ₂ SO ₄ , 10H ₂ O)	763.2
Chlorure d'ammonium (NH ₄ Cl)	178
Chlorure de calcium dihydraté (CaCl ₂ , 2H ₂ O)	227.8
Hydrogénocarbonate de sodium (NaHCO ₃)	630.8

Tableau 10 – Composants de la salive artificielle SAGF de GAL et al. (25)

4.3.2 MISE EN ŒUVRE

Les salives artificielles de SHELLIS (83) et GAL et al. (25) sont stables. SHELLIS recommande le stockage à -20°C dans des bouteilles en plastique fermées, conditions dans lesquelles la salive artificielle peut être conservée plusieurs semaines avant utilisation.

Ces deux salives, lorsqu'elles sont exposées à l'air, perdent du dioxyde de carbone gazeux. Il est donc recommandé lors de leur utilisation de maintenir un barbotage de 95% de N₂ et 5% de CO₂ (SHELLIS, 83) dans le milieu. Cette précaution permet d'assurer un pouvoir tampon optimum à la formule de SHELLIS, et se montre indispensable lors de l'utilisation de la formule SAGF sous peine de voir son pH augmenter assez rapidement.

4.4 AUTRES CONSIDERATIONS

4.4.1 LACUNES DES MODELES IN VITRO FACE A LA REALITE IN VIVO

ELIADES et al. (19) ont inventorié les lacunes que présentent les études de la corrosion menées en milieu salivaire artificiel face à la réalité in vivo :

- La salive artificielle est un milieu dont la composition est finement ajustée avant le début de l'expérience, plus aucune modification extérieure n'est apportée durant le déroulement de celle-ci. La salive naturelle au contraire connaît d'importantes variations de divers paramètres dans le temps, la concentration en certains ions et le pH notamment. De même, le passage d'aliments à différents moments de la journée peut induire des variations de pH et de température.
- L'utilisation de solutions non agitées et non renouvelées, au contraire de la salive naturelle qui est régulièrement sécrétée et déglutie, peut fausser les résultats. Dans ces conditions la libération d'ions par les alliages arrive rapidement en situation d'équilibre dans la solution, ce qui empêche le phénomène de s'exprimer à long terme.
- Les alliages sont immergés pour de longues périodes dans le milieu salivaire artificiel, tandis qu'en situation réelle ils sont également exposés à l'air présent dans la cavité buccale. Les auteurs précisent que chez un respirateur buccal, 1 m³ d'air transite par la bouche toutes les deux heures environ. Ce volume non négligeable est susceptible de contenir divers produits liés à la pollution atmosphérique urbaine, qu'on ne trouve pas dans la salive artificielle.
- Un échantillon d'alliage immergé statiquement dans la salive artificielle n'est pas soumis aux contraintes exercées par la ligature, aux frottements à l'interface arc-bracket, au stress lors de la mastication, etc. Or tous ces phénomènes sont présents en bouche et contribuent à favoriser la corrosion (corrosion par frottement et corrosion sous contrainte).
- En milieu salivaire artificiel, les alliages ne sont pas soumis à la colonisation bactérienne et à l'acidité des produits de leur métabolisme que subissent les alliages en bouche. Cette différence est la plus importante aux yeux des auteurs.

4.4.2 SOLUTIONS POSSIBLES

Pour remédier à ces problèmes, pouvant être source d'écarts importants entre les résultats des tests in vitro et le comportement en situation réelle des alliages, certaines solutions sont envisageables.

4.4.2.1 BANC D'ESSAI

KEROSUO et al. (50) ont mis au point un banc d'essai capable de simuler la mise en fonction dynamique du système arc-attaches, qu'ils ont nommé OFS ("Oral Functional Simulator").

Celui-ci consiste à fixer 5 brackets et une bague chacun sur une barre en résine polymère, un arc est ligaturé dans les gorges, et l'ensemble immergé dans une cuve de salive artificielle. Les barres de résine sont mises en mouvement par un arbre à cames actionné par un moteur électrique, ce qui permet d'appliquer au système des mouvements dans l'espace, légers et réguliers (le moteur tourne à 6 tours/min).

Ce dispositif pourrait permettre de soumettre les échantillons testés aux phénomènes de corrosion par frottement et sous contrainte.

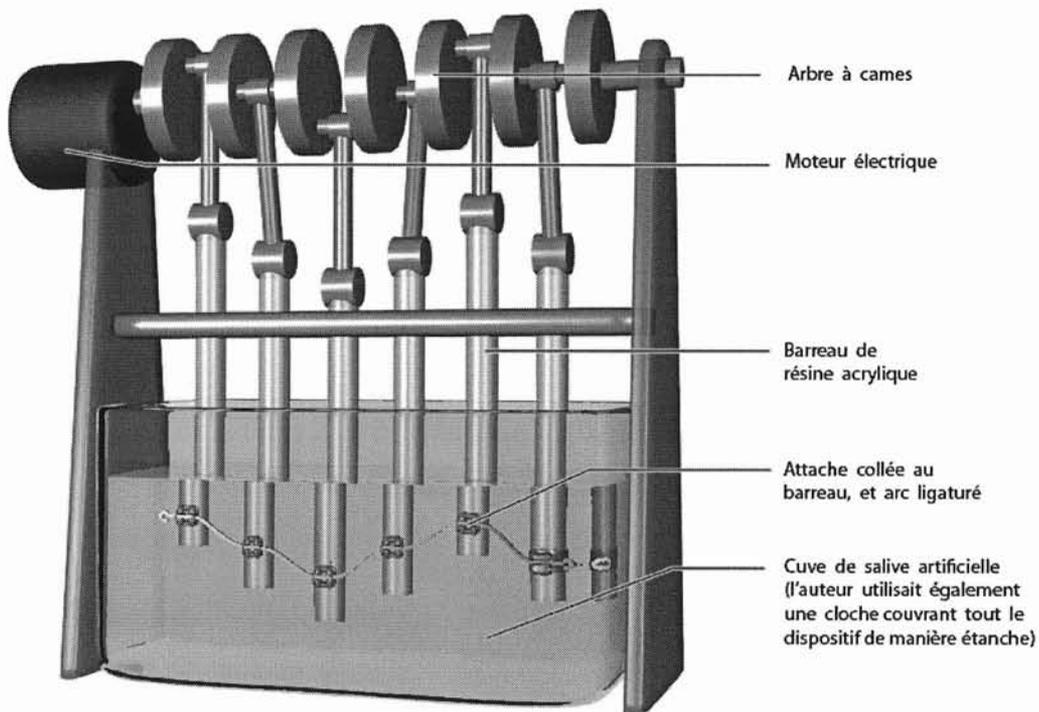


Figure 25 – Banc d'essai permettant de simuler les contraintes mécaniques subies par les alliages orthodontiques en bouche, d'après KEROSUO et al. (51)

4.4.2.2 VARIATIONS DES PARAMETRES

LAGERLOF et al. (53) ont étudié les effets de la consommation de sucre dans les variations de pH salivaire. Ils se sont servis pour leur étude d'une cuve principale, équipée d'une part d'une électrovalve permettant de chasser la salive et le sucre (simulant ainsi la déglutition) et d'autre part de pompes à débit variable ajoutant régulièrement de la salive au milieu (simulant ainsi la sécrétion de salive, avec éventuellement la possibilité de puiser alternativement dans des solutions différentes pour reproduire en partie les variations de composition de la salive dans le temps).

5 CONCLUSION

Les alliages orthodontiques pendant leur utilisation sont baignés par la salive pour des durées s'évaluant en mois ou en années. Ils sont au cours de leur service exposés à la corrosion, qui s'accompagne de multiples effets indésirables, tant pour le patient que pour l'orthodontiste.

Or nous avons vu que la salive est un mélange complexe d'éléments organiques et inorganiques, dont une proportion importante entre en jeu, directement ou indirectement, dans les phénomènes de corrosion.

Il est donc particulièrement important de pouvoir simuler au mieux cette corrosion dans les études in vitro, car une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu permettra une lutte plus efficace contre ces phénomènes. Il convient donc pour cela de choisir une salive artificielle qui reproduit au mieux la composition de la salive naturelle, mais également ses propriétés physico-chimiques (température du milieu, pH, pouvoir tampon...).

Ces efforts sont malheureusement entravés par le caractère extrêmement variable des différents paramètres salivaires, rendant très difficile l'élaboration d'un standard.

Pour réduire les écarts entre le caractère éminemment variable du milieu salivaire naturel et les modèles in vitro, il semble intéressant de se tourner vers le concept de "bouche artificielle" plutôt que de se limiter à celui de salive artificielle. Un tel concept pourrait se prévaloir d'intégrer un dispositif plus ou moins complexe, capable de reproduire au sein de la solution de salive artificielle diverses variations (renouvellement de la solution, variations de concentration des composants, variations du pH et de la température, contraintes mécaniques, etc.) plus conformes à la réalité mais toutefois pilotables par informatique et donc parfaitement quantifiables et standardisables.



TABLE DES ILLUSTRATIONS

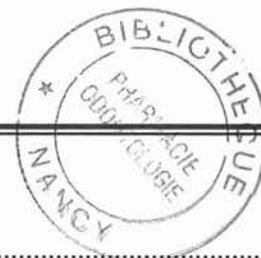


Figure 1 - Les glandes salivaires majeures, d'après CUMMINGS (9).....	4
Figure 2 - Les glandes salivaires mineures, d'après KAMINA (44)	6
Figure 3 - Schéma de principe de l'organisation d'une glande salivaire, d'après PAPARELLA (73)	8
Figure 4 - Vue en MET (x 10400) d'une cellule acineuse de glande salivaire de rat, d'après ORBAN et al. (72)	9
Figure 5 - Vue en MET (x 7400) d'une cellule des canaux striés de glande salivaire de rat, d'après ORBAN et al. (72)	12
Figure 6 - Concentration salivaire en sodium et potassium en fonction de la localisation dans le système canalaire, dans la glande submandibulaire du rat, d'après PAPARELLA (73).....	13
Figure 7 - Participation relative des glandes salivaires majeures au débit salivaire, d'après PAPARELLA (73)	17
Figure 8 - Structure d'une Immunoglobuline A, d'après PELLERIN et al. (74)	25
Figure 9 - Variations circadiennes de la température orale, d'après DAWES (12)	29
Figure 10 - Variations dans le temps du pH salivaire après ingestion d'une boisson acide, d'après HAGGARD et al. (30)	31
Figure 11 - Variation des concentrations des composants salivaires avec l'augmentation du débit salivaire, d'après LAMB et al. (54)	35
Figure 12 - Variations circadiennes de la composition de la salive totale non stimulée, d'après DAWES (12).....	39
Figure 13 - Variations des concentrations de plusieurs composants salivaires selon l'âge, d'après BEN-ARYEH et al. (4)	41
Figure 14 - Vue en MEB de l'état de surface d'un fil Ni-Ti avant et après corrosion par piqûre, d'après HUANG (34)	50
Figure 15 - Vue en MEB de l'état de surface d'un bracket en acier inox avant et après corrosion caverneuse, d'après ELIADES et al. (19)	51

Figure 16 – Vue en MEB de l'état de surface d'un fil Ni-Ti avant et après corrosion par frottement, d'après ELIADES et al. (19)	52
Figure 17 - Vue en MEB d'une coupe d'un bracket en acier inoxydable soudé sur sa base par un alliage d'argent, d'après GRIMSDOTTIR et al. (29).....	56
Figure 18 - Vue en MEB de l'état de surface d'un bracket neuf en acier inoxydable, d'après LIN et al. (60)	59
Figure 19 - Diagramme de POURBAIX du nickel, d'après ROCHAIX (78)	63
Figure 20 – Lésion muqueuse d'origine allergique, d'après BISHARA (7).....	67
Figure 21 – Coloration métallique de la couche d'adhésif due aux produits de corrosion, d'après ELIADES et al. (19)	68
Figure 22 – Cellule d'étude électrochimique, d'après AFNOR (1)	74
Figure 23 – Circuit électrique de la cellule d'étude électrochimique, d'après AFNOR (1)	74
Figure 24 – Exemples de voltammogrammes, d'après AFNOR (1) ; ISO (41).....	75
Figure 25 – Banc d'essai permettant de simuler les contraintes mécaniques subies par les alliages orthodontiques en bouche, d'après KEROSUO et al. (51).....	86

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Composition de la salive totale, d'après FENOLL-PALOMARES et al. (22) ; FERGUSON et al. (23) ; PELLERIN et al. (74) ; REHAK et al. (77).....	21
Tableau 2 - Comparaison des concentrations de certains composants de la salive parotidienne et submandibulaire, d'après CUMMINGS (9)	36
Tableau 3 - Paramètres de l'équation des variations circadiennes de la composition salivaire, d'après DAWES (12).....	38
Tableau 4 - Variations de la composition de la salive totale non stimulée avec le vieillissement, d'après NAGLER et al. (69)	42
Tableau 5 - Médicaments responsables d'une diminution du débit salivaire, d'après LLENA-PUY (62).....	44
Tableau 6 - Formules des salives artificielles décrites dans la littérature, d'après GAL et al. (25)	71
Tableau 7 – Rappel des formules des trois salives artificielles présentant la composition en éléments inorganiques requise.	79
Tableau 8 - Récapitulatif du comparatif des différentes salives artificielles	81
Tableau 9 – Composants de la salive artificielle de SHELLIS (83).....	83
Tableau 10 – Composants de la salive artificielle SAGF de GAL et al. (25)	84



TABLE DES EQUATIONS

Equation 1 - Equilibre entre dissolution et reminéralisation de l'hydroxyapatite, d'après EDGAR (18)	19
Equation 2 - Pouvoir tampon des phosphates, d'après PELLERIN et al. (74).....	19
Equation 3 - Formation de bicarbonate par hydratation du dioxyde de carbone, d'après LENANDER-LUMIKARI et al. (57).....	27
Equation 4 - Action du système tampon bicarbonate, d'après LENANDER-LUMIKARI et al. (57).....	31
Equation 5 - Expression de la concentration d'un composant salivaire donné en fonction du temps, d'après DAWES (12)	37
Equation 6 - Concentration de sodium dans la salive totale non stimulée selon l'âge, d'après BEN-ARYEH et al. (4).....	40
Equation 7 - Equation bilan d'une réaction redox, d'après ROCHAIX (78)	47
Equation 8 - Formation de la couche protectrice d'oxyde de titane à l'air libre, d'après ELIADES et al. (19).....	57
Equation 9 - Formation de la couche protectrice d'oxyde de titane en présence d'eau, d'après ELIADES et al. (19).....	57
Equation 10 - Formation d'acide fluorhydrique à partir de fluorure de sodium en milieu acide, d'après KAO et al. (46)	60
Equation 11 - Attaque de la couche d'oxyde de titane par l'acide fluorhydrique, d'après KAO et al. (46).....	60



TABLE DES ABREVIATIONS



➤ NOMS COMMUNS :

ADN, ARN	Acide désoxyribonucléique, acide ribonucléique
A _f	Austenite finish
e _{cor}	Potentiel de corrosion
I _{cor}	Densité de courant de corrosion
IgA, -As, -G, -M	Immunoglobuline A, -A sécrétoire, - G, -M
MEB	Microscopie électronique à balayage
MET	Microscopie électronique à transmission
PRP	Protéine riche en proline
REG	Réticulum endoplasmique granulaire

➤ NOMS PROPRES :

AISI	American Iron and Steel Institute
NiTi, Ni-Ti	Alliage de nickel-titane
TMA	Alliage de titane-molybdène

➤ ELEMENTS CHIMIQUES :

C	Carbone
Ca ²⁺	Ion calcium
Cl ⁻	Ion chlorure
Co	Cobalt
CO ₂	Dioxyde de carbone
CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	Ion carbonate, hydrogénocarbonate (bicarbonate)
Cr	Chrome
F ⁻	Ion fluorure
Fe	Fer
H ⁺	Ion hydrogène
I ⁻	Ion iodure
K ⁺	Ion potassium
Mg ²⁺	Ion magnésium
Na ⁺	Ion sodium
NH ₄ ⁺	Ion ammonium
Ni, Ni ²⁺	Nickel, ion nickel
NO ₃ ⁻	Ion nitrate
O ₂	Dioxygène
PO ₄ ³⁻ , HPO ₄ ²⁻ , H ₂ PO ₄ ⁻	Ion phosphate, hydrogénophosphate, dihydrogénophosphate
SCN ⁻	Ion thiocyanate
Ti	Titane

BIBLIOGRAPHIE



- (1) AFNOR
Biodégradabilité des alliages métalliques utilisés en art dentaire - Normalisation d'essais électrochimiques
AFNOR NF S91-141, 1997, 20 p.
- (2) BAKER K.L., NIEBERG L.G., WEIMER A.D., et al.
Frictional changes in force values caused by saliva substitution.
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 1987, 91, 4, p.316-320.
- (3) BARDOW A., NYVAD B., NAUNTOFTE B.
Relationships between medication intake, complaints of dry mouth, salivary flow rate and composition, and the rate of tooth demineralization in situ.
Arch. Oral. Biol., 2001, 46, 5, p.413-423.
- (4) BEN-ARYEH H., FISHER M., SZARGEL R., et al.
Composition of whole unstimulated saliva of healthy children : changes with age.
Arch. Oral. Biol., 1990, 35, 11, p.929-931.
- (5) BEN-ARYEH H., ROLL N., LAHAV M., et al.
Effect of exercise on salivary composition and cortisol in serum and saliva in man.
J. Dent. Res., 1989, 68, 11, p.1495-1497.
- (6) BILHAN H., BILGIN T., CAKIR A.F., et al.
The effect of mucine, IgA, urea, and lysozyme on the corrosion behavior of various non-precious dental alloys and pure titanium in artificial saliva.
J. Biomater. Appl., 2007, 22, 3, p.197-221.
- (7) BISHARA S.E.
Oral lesions caused by an orthodontic retainer : a case report.
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 1995, 108, 2, p.115-117.
- (8) CARDOSO M.V., AMARAL S.T., MARTINI E.M.A.
Temperature effect in the corrosion resistance of Ni-Fe-Cr alloy in chloride medium.
Corros. Sci. (en ligne), 2008, url : <http://www.sciencedirect.com> (consulté le 23/08/2008)
- (9) CUMMINGS C.W.
Otolaryngology : head and neck surgery. 2, Salivary glands, oral cavity/oropharynx, neck.
St. Louis : Mosby, 1986, 864 p.
- (10) DARABARA M.S., BOURITHIS L.I., ZINELIS S., et al.
Metallurgical characterization, galvanic corrosion, and ionic release of orthodontic brackets coupled with Ni-Ti archwires.
J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater., 2007, 81, 1, p.126-134.

- (11) DAWES C.
Effects of diet on salivary secretion and composition.
J. Dent. Res., 1970, 49, 6, p.1263-1273.
- (12) DAWES C.
Circadian rhythms in human salivary flow rate and composition.
J. Physiol., 1972, 220, 3, p.529-545.
- (13) DAWES C.
Circadian rhythms in the flow rate and composition of unstimulated and stimulated human submandibular saliva.
J. Physiol., 1975, 244, 2, p.535-548.
- (14) DAWES C.
Stimulus effects on protein and electrolyte concentrations in parotid saliva.
J. Physiol., 1984, 346, p.579-588.
- (15) DE QUEIROZ G.M., SILVA L.F., FERREIRA J.T., et al.
Electrochemical behavior and pH stability of artificial salivas for corrosion tests.
Braz. Oral. Res., 2007, 21, 3, p.209-215.
- (16) DENNY P., HAGEN F.K., HARDT M., et al.
The proteomes of human parotid and submandibular/sublingual gland salivas collected as the ductal secretions.
J. Proteome. Res., 2008, 7, 5, p.1994-2006.
- (17) DUCOMBS G., CHABEAU G.
Dermato-allergologie de contact - 2e éd.
Paris : Masson, 1988, 168 p.
- (18) EDGAR W.M.
Saliva : its secretion, composition and functions.
Br. Dent. J., 1992, 172, 8, p.305-312.
- (19) ELIADES T., ATHANASIOU A.E.
In vivo aging of orthodontic alloys: Implications for corrosion potential, nickel release, and biocompatibility.
Angle Orthod., 2002, 72, 3, p.222-237.
- (20) ELIADES T., ELIADES G., ATHANASIOU A.E., et al.
Surface characterization of retrieved NiTi orthodontic archwires.
Eur. J. Orthod., 2000, 22, 3, p.317-326.
- (21) ES-SOUNI M., FISCHER-BRANDIES H.
On the in vitro biocompatibility of Elgiloy, a Co-based alloy, compared to two titanium alloys.
J. Orofac. Orthop., 2003, 64, 1, p.16-26.
- (22) FENOLL-PALOMARES C., MUNOZ MONTAGUD J.V., SANCHIZ V., et al.
Unstimulated salivary flow rate, pH and buffer capacity of saliva in healthy volunteers.
Rev. Esp. Enferm. Dig., 2004, 96, 11, p.773-783.

- (23) FERGUSON D.B., BOTCHWAY C.A.
Circadian variations in the flow rate and composition of whole saliva stimulated by mastication.
Arch. Oral. Biol., 1979, 24, 12, p.877-881.
- (24) FILLEUL M.P.
Les fils orthodontiques. Propriétés mécaniques.
Chapitre 13. In : CHATEAU M. Orthopédie Dento-Faciale.
Paris : CDP, 1992, p. 299-310.
- (25) GAL J.Y., FOVET Y., ADIB-YADZI M.
About a synthetic saliva for in vitro studies.
Talanta, 2001, 53, 6, p.1103-1115.
- (26) GARNIER M., DELAMARE V., DELAMARE J., et al.
Dictionnaire des termes de médecine - 25e éd. rev. et augm.
Paris : Maloine 1998, 973 p.
- (27) GHEZZI E.M., LANGE L.A., SHIP J.A.
Determination of variation of stimulated salivary flow rates.
J. Dent. Res., 2000, 79, 11, p.1874-1878.
- (28) GOLDBERG M.
Tissus non minéralisés et milieu buccal : histologie et biologie.
Paris : Masson, 1993, 190 p.
- (29) GRIMSDOTTIR M.R., GJERDET N.R., HENSTEN-PETTERSEN A.
Composition and in vitro corrosion of orthodontic appliances.
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 1992, 101, 6, p.525-532.
- (30) HAGGARD H.W., GREENBERG L.A.
The acidity of saliva after ingestion of carbohydrate and acid-containing substances.
J. Dent. Res., 1951, 30, 1, p.126-129.
- (31) HAY D.I., AHERN J.M., SCHLUCKEBIER S.K., et al.
Human salivary acidic proline-rich protein polymorphisms and biosynthesis studied by high-performance liquid chromatography.
J. Dent. Res., 1994, 73, 11, p.1717-1726.
- (32) HOUSE K., SERNETZ F., DYMOCK D., et al.
Corrosion of orthodontic appliances - should we care?
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 2008, 133, 4, p.584-592.
- (33) HUANG H.H.
Corrosion resistance of stressed NiTi and stainless steel orthodontic wires in acid artificial saliva.
J. Biomed. Mater. Res. A, 2003, 66, 4, p.829-839.
- (34) HUANG H.H.
Surface characterizations and corrosion resistance of nickel-titanium orthodontic archwires in artificial saliva of various degrees of acidity.
J. Biomed. Mater. Res. A, 2005, 74, 4, p.629-639.

- (35) HUANG H.H., CHIU Y.H., LEE T.H., et al.
Ion release from NiTi orthodontic wires in artificial saliva with various acidities.
Biomaterials, 2003, 24, 20, p.3585-3592.
- (36) HUMPHREY S.P., WILLIAMSON R.T.
A review of saliva : normal composition, flow, and function.
J. Prosthet. Dent., 2001, 85, 2, p.162-169.
- (37) HUNT N.P., CUNNINGHAM S.J., GOLDEN C.G., et al.
An investigation into the effects of polishing on surface hardness and corrosion of orthodontic archwires.
Angle Orthod., 1999, 69, 5, p.433-440.
- (38) HUNTER K.D., WILSON W.S.
The effects of antidepressant drugs on salivary flow and content of sodium and potassium ions in human parotid saliva.
Arch. Oral. Biol., 1995, 40, 11, p.983-989.
- (39) HWANG C.J., SHIN J.S., CHA J.Y.
Metal release from simulated fixed orthodontic appliances.
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 2001, 120, 4, p.383-391.
- (40) INOUE H., ONO K., MASUDA W., et al.
Gender difference in unstimulated whole saliva flow rate and salivary gland sizes.
Arch. Oral. Biol., 2006, 51, 12, p.1055-1060.
- (41) ISO
Produits dentaires métalliques - Méthodes pour les essais de corrosion
NF EN ISO 10271, 2002, 34 p.
- (42) JANSON G.R., DAINESI E.A., CONSOLARO A., et al.
Nickel hypersensitivity reaction before, during, and after orthodontic therapy.
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 1998, 113, 6, p.655-660.
- (43) JENSEN C.S., LISBY S., BAADSGAARD O., et al.
Release of nickel ions from stainless steel alloys used in dental braces and their patch test reactivity in nickel-sensitive individuals.
Contact Dermatitis, 2003, 48, 6, p.300-304.
- (44) KAMINA P.
Anatomie clinique. Tome 2, Tête, cou, dos - 3e ed.
Paris : Maloine, 2006, 405 p.
- (45) KAO C.T., DING S.J., HE H., et al.
Cytotoxicity of orthodontic wire corroded in fluoride solution in vitro.
Angle Orthod., 2007, 77, 2, p.349-354.
- (46) KAO C.T., DING S.J., WANG C.K., et al.
Comparison of frictional resistance after immersion of metal brackets and orthodontic wires in a fluoride-containing prophylactic agent.
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 2006, 130, 5, p.568-569.

- (47) KAUFMAN E., LAMSTER I.B.
The diagnostic applications of saliva - a review.
Crit. Rev. Oral Biol. Med., 2002, 13, 2, p.197-212.
- (48) KAVANAGH D.A., O'MULLANE D.M., SMEETON N.
Variation of salivary flow rate in adolescents.
Arch. Oral. Biol., 1998, 43, 5, p.347-352.
- (49) KAVANAGH D.A., SVEHLA G.
Variation of salivary calcium, phosphate and buffering capacity in adolescents.
Arch. Oral. Biol., 1998, 43, 12, p.1023-1027.
- (50) KEROSUO H., KULLAA A., KEROSUO E., et al.
Nickel allergy in adolescents in relation to orthodontic treatment and piercing of ears.
Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 1996, 109, 2, p.148-154.
- (51) KEROSUO H., MOE G., KLEVEN E.
In vitro release of nickel and chromium from different types of simulated orthodontic appliances.
Angle Orthod., 1995, 65, 2, p.111-116.
- (52) KUSY R.P.
A review of contemporary archwires: their properties and characteristics.
Angle Orthod., 1997, 67, 3, p.197-207.
- (53) LAGERLOF F., DAWES R., DAWES C.
Salivary clearance of sugar and its effects on pH changes by Streptococcus Mitior in an artificial mouth.
J. Dent. Res., 1984, 63, 11, p.1266-1270.
- (54) LAMB J.F., INGRAM C.G., JOHNSTON I.A., et al.
Manuel de physiologie.
Paris : Masson, 1990, 480.
- (55) LARSEN M.J., JENSEN A.F., MADSEN D.M., et al.
Individual variations of pH, buffer capacity, and concentrations of calcium and phosphate in unstimulated whole saliva.
Arch. Oral. Biol., 1999, 44, 2, p.111-117.
- (56) LENANDER-LUMIKARI M., LAURIKAINEN K., KUUSISTO P., et al.
Stimulated salivary flow rate and composition in asthmatic and non-asthmatic adults.
Arch. Oral. Biol., 1998, 43, 2, p.151-156.
- (57) LENANDER-LUMIKARI M., LOIMARANTA V.
Saliva and dental caries.
Adv. Dent. Res., 2000, 14, p.40-47.
- (58) LEUNG V.W., DARVELL B.W.
Artificial salivas for in vitro studies of dental materials.
J. Dent., 1997, 25, 6, p.475-484.

- (59) LI X., WANG J., HAN E.H., et al.
Influence of fluoride and chloride on corrosion behavior of NiTi orthodontic wires.
Acta Biomater., 2007, 3, 5, p.807-815.
- (60) LIN M.C., LIN S.C., LEE T.H., et al.
Surface analysis and corrosion resistance of different stainless steel orthodontic brackets in artificial saliva.
Angle Orthod., 2006, 76, 2, p.322-329.
- (61) LIU I.H., LEE T.M., CHANG C.Y., et al.
Effect of load deflection on corrosion behavior of NiTi wire.
J. Dent. Res., 2007, 86, 6, p.539-543.
- (62) LLENA-PUY C.
The role of saliva in maintaining oral health and as an aid to diagnosis.
Med. Oral Patol. Oral Cir. Bucal, 2006, 11, 5, p.E449-455.
- (63) MAIJER R., SMITH D.C.
Corrosion of orthodontic bracket bases.
Am. J. Orthod., 1982, 81, 1, p.43-48.
- (64) MANDEL I.D.
Relation of saliva and plaque to caries.
J. Dent. Res., 1974, 53, 2, p.246-266.
- (65) MATZKER J., SCHREIBER J.
Synthetic saliva in the treatment of hyposalivies, especially in radiation sialadenitis.
Z. Laryngol. Rhinol. Otol., 1972, 51, 7, p.422-428.
- (66) MESSANA I., CABRAS T., PISANO E., et al.
Trafficking and postsecretory events responsible for the formation of secreted human salivary peptides : a proteomic approach.
Mol. Cell. Proteomics, 2008, 7, 5, p.911-926.
- (67) MOCKERS O., DEROZE D., CAMPS J.
Cytotoxicity of orthodontic bands, brackets and archwires in vitro.
Dent. Mater., 2002, 18, 4, p.311-317.
- (68) MORLEY D.J., HODES M.E.
In situ localization of amylase mRNA and protein. An investigation of amylase gene activity in normal human parotid gland.
J. Histochem. Cytochem., 1987, 35, 1, p.9-14.
- (69) NAGLER R.M., HERSHKOVICH O.
Relationships between age, drugs, oral sensorial complaints and salivary profile.
Arch. Oral. Biol., 2005, 50, 1, p.7-16.
- (70) OFFNER G.D., TROXLER R.F.
Heterogeneity of high-molecular-weight human salivary mucins.
Adv. Dent. Res., 2000, 14, p.69-75.

- (71) OH K.T., CHOO S.U., KIM K.M., et al.
A stainless steel bracket for orthodontic application.
Eur. J. Orthod., 2005, 27, 3, p.237-244.
- (72) ORBAN B.J., BHASKAR S.N.
Orban's Oral histology and embryology.
St. Louis : Mosby, 1980, 482 p.
- (73) PAPARELLA M.M.
Basic sciences and related principles - 3rd ed.
Philadelphia : W.B. Saunders, 1991, 881 p. (Otolaryngology 1)
- (74) PELLERIN C., PELLAT B.
Biochimie odonto-stomatologique.
Paris : Masson, 1986, 263 p.
- (75) PUN D.K., BERZINS D.W.
Corrosion behavior of shape memory, superelastic, and nonsuperelastic nickel-titanium-based orthodontic wires at various temperatures.
Dent. Mater., 2008, 24, 2, p.221-227.
- (76) PUSKULIAN L.
Salivary electrolyte changes during the normal menstrual cycle.
J. Dent. Res., 1972, 51, 5, p.1212-1216.
- (77) REHAK N.N., CECCO S.A., CSAKO G.
Biochemical composition and electrolyte balance of "unstimulated" whole human saliva.
Clin. Chem. Lab. Med., 2000, 38, 4, p.335-343.
- (78) ROCHAIX C.
Electrochimie : thermodynamique, cinétique.
Paris : Nathan, 1996, 239 p.
- (79) ROUVIÈRE H., DELMAS A.
Anatomie humaine descriptive, topographique et fonctionnelle. Tome 1, Tête et cou - 15e éd.
Paris : Masson, 2002, 654 p.
- (80) SCHENKELS L.C., VEERMAN E.C., NIEUW AMERONGEN A.V.
Biochemical composition of human saliva in relation to other mucosal fluids.
Crit. Rev. Oral Biol. Med., 1995, 6, 2, p.161-175.
- (81) SCHIFF N., DALARD F., LISSAC M., et al.
Corrosion resistance of three orthodontic brackets: a comparative study of three fluoride mouthwashes.
Eur. J. Orthod., 2005, 27, 6, p.541-549.
- (82) SCHIPPER R.G., SILLETTI E., VINGERHOEDS M.H.
Saliva as research material: biochemical, physicochemical and practical aspects.
Arch. Oral. Biol., 2007, 52, 12, p.1114-1135.

- (83) SHELLIS R.P.
A synthetic saliva for cultural studies of dental plaque.
Arch. Oral Biol., 1978, 23, 6, p.485-489.
- (84) SOMER E., BEN-ARYEH H., LAUFER D.
Salivary composition, gender and psychosocial stress.
Int. J. Psychosom., 1993, 40, 1-4, p.17-21.
- (85) SOUDER W., SWEENEY W.T.
Is mercury poisonous in dental amalgam restorations?
Dental Cosmos, 1931, 123, 12, p.1145-1152.
- (86) STAFFOLANI N., DAMIANI F., LILLI C., et al.
Ion release from orthodontic appliances.
J. Dent., 1999, 27, 6, p.449-454.
- (87) TANAKA T., GRESIK E.W., BARKA T.
Immunocytochemical localization of amylase in the parotid gland of developing and adult rats.
J. Histochem. Cytochem., 1981, 29, 10, p.1189-1195.
- (88) TOMAKIDI P., KOKE U., KERN R., et al.
Assessment of acute cyto- and genotoxicity of corrosion eluates obtained from orthodontic materials using monolayer cultures of immortalized human gingival keratinocytes.
J. Orofac. Orthop., 2000, 61, 1, p.2-19.
- (89) VON FRAUNHOFER J.A.
Corrosion of orthodontic devices.
Semin. Orthod., 1997, 3, 3, p.198-205.
- (90) WANG J., LI N., HAN E.H., et al.
Effect of pH, temperature and Cl⁻ concentration on electrochemical behavior of NiTi shape memory alloy in artificial saliva.
J. Mater. Sci. Mater. Med., 2006, 17, 10, p.885-890.
- (91) WONG L., SISSIONS C.H.
A comparison of human dental plaque microcosm biofilms grown in an undefined medium and a chemically defined artificial saliva.
Arch. Oral Biol., 2001, 46, 6, p.477-486.



Jury : Président : MP FILLEUL – Professeur des Universités
Juges : C. RAPIN – Professeur des Universités
Y. BOLENDER – Maître de Conférence des Universités
O. GEORGE – Docteur en Chirurgie Dentaire

Thèse pour obtenir le diplôme D'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire

Présentée par: **Monsieur EGLOFF Benoît, Frédéric**

né(e) à: **SARREGUEMINES (Moselle)**

le **21 Avril 1984**

et ayant pour titre : «**Etude des salives artificielles utilisées pour les tests de corrosion des alliages orthodontiques.**»

Le Président du jury,



M.P. FILLEUL

Le Doyen
de la Faculté d'Odontologie



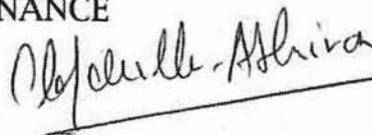
Autorise à soutenir et imprimer la thèse 3202

NANCY, le 15 JAN. 1984

Le Président de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1

Pour le Président
et par délégation,
le Vice-Président du
Conseil des Etudes et de
la Vie Universitaire,

J-P. FINANCE



EGLOFF (Benoît) - Étude des salives artificielles utilisées pour les tests de corrosion des alliages orthodontiques.

Th : Chir.-Dent. : NANCY 1 : 2009

Mots clefs :

Salive, Salive artificielle, Appareils orthodontiques, Corrosion.

EGLOFF (Benoît) - Étude des salives artificielles utilisées pour les tests de corrosion des alliages orthodontiques.

Th : Chir.-Dent. : NANCY 1 : 2009

Les alliages métalliques utilisés en orthodontie sont soumis à la corrosion au sein du milieu buccal, ce phénomène est à imputer en grande partie à la salive. En laboratoire, les tests de résistance à la corrosion des alliages sont effectués dans des salives artificielles.

L'objectif de ce travail est de sélectionner une salive artificielle qui reproduise au mieux les conditions du milieu buccal in vitro, permettant ainsi l'obtention des résultats expérimentaux les plus fiables possibles.

Pour ce faire, nous étudierons dans une première partie la composition, les propriétés physico-chimiques et les variations de la salive.

Dans une deuxième partie, nous étudierons les différentes formes de corrosion mises en jeu et comment les paramètres du milieu buccal influent sur celle-ci.

Nous concluons en sélectionnant, au vu des résultats précédents, la salive artificielle la plus à même de reproduire les conditions du milieu buccal lors de tests de corrosion in vitro.

JURY :

<u>Pr. FILLEUL M.P.</u>	Professeur des universités	Président
Pr. RAPIN C.	Professeur des universités	Juge
Dr. BOLENDER Y.	Maître de conférences	Juge
<u>Dr. GEORGE O.</u>	Attaché	Directeur

ADRESSE :

EGLOFF Benoît
1 square d'Oslo
54500 VANDŒUVRE-LES-NANCY

EGLOFF (Benoît) - Étude des salives artificielles utilisées pour les tests de corrosion des alliages orthodontiques.

Th : Chir.-Dent. : NANCY 1 : 2009

Mots clefs :

Salive, Salive artificielle, Appareils orthodontiques, Corrosion.

EGLOFF (Benoît) - Étude des salives artificielles utilisées pour les tests de corrosion des alliages orthodontiques.

Th : Chir.-Dent. : NANCY 1 : 2009

Les alliages métalliques utilisés en orthodontie sont soumis à la corrosion au sein du milieu buccal, ce phénomène est à imputer en grande partie à la salive. En laboratoire, les tests de résistance à la corrosion des alliages sont effectués dans des salives artificielles.

L'objectif de ce travail est de sélectionner une salive artificielle qui reproduise au mieux les conditions du milieu buccal in vitro, permettant ainsi l'obtention des résultats expérimentaux les plus fiables possibles.

Pour ce faire, nous étudierons dans une première partie la composition, les propriétés physico-chimiques et les variations de la salive.

Dans une deuxième partie, nous étudierons les différentes formes de corrosion mises en jeu et comment les paramètres du milieu buccal influent sur celle-ci.

Nous concluons en sélectionnant, au vu des résultats précédents, la salive artificielle la plus à même de reproduire les conditions du milieu buccal lors de tests de corrosion in vitro.

JURY :

<u>Pr. FILLEUL M.P.</u>	Professeur des universités	Président
Pr. RAPIN C.	Professeur des universités	Juge
Dr. BOLENDER Y.	Maître de conférences	Juge
<u>Dr. GEORGE O.</u>	Attaché	Directeur

ADRESSE :

EGLOFF Benoît
1 square d'Oslo
54500 VANDŒUVRE-LES-NANCY