

UNIVERSITE DE LILLE
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2020

N°:

THESE POUR LE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 15 Décembre 2020

Par Maëlys BILE BOOTO LONGOLO

Née le 15 Janvier 1994 à Villeneuve d'Ascq – France

Dioxyde de titane et titane en odontologie : état actuel des connaissances

JURY

Président : Professeur DEVEAUX Etienne

Assesseurs : Docteur NAWROCKI Laurent

Docteur COUTEL Xavier

Docteur LOVI Bernice

UNIVERSITE DE LILLE
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2020

N°:

THESE POUR LE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 15 Décembre 2020

Par Maëlys BILE BOOTO LONGOLO

Née le 15 Janvier 1994 à Villeneuve d'Ascq – France

Dioxyde de titane et titane en odontologie : état actuel des connaissances

JURY

Président : Professeur DEVEAUX Etienne

Assesseurs : Docteur NAWROCKI Laurent

Docteur COUTEL Xavier

Docteur LOVI Bernice

Président de l'Université	: Pr. J-C. CAMART
Directeur General des Services de l'Université	: P-M. ROBERT
Doyen	: Dr. E. BOCQUET
Vice-Doyen	: Dr. A. de BROUCKER
Responsable des Services	: S. NEDELEC
Responsable de la Scolarité	: M. DROPSIT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
E. DELCOURT-DEBRUYNE	Professeur émérite Parodontologie
C. DELFOSSE	Responsable du Département d' Odontologie Pédiatrique
E. DEVEAUX	Dentisterie Restauratrice Endodontie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

K. AGOSSA	Parodontologie
T. BECAVIN	Dentisterie Restauratrice Endodontie
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
P. BOITELLE	Prothèses
F. BOSCHIN	Responsable du Département de Parodontologie
E. BOCQUET	Responsable du Département d' Orthopédie Dento-Faciale Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire
C. CATTEAU	Responsable du Département de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale
X. COUDEL	Biologie Orale
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	Parodontologie
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
P. HILDEBERT	Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Responsable du Département de Chirurgie Orale Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin – CHRU Lille
C. OLEJNIK	Responsable du Département de Biologie Orale
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
M. SAVIGNAT	Responsable du Département des Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Responsable du Département de Prothèses

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

Remerciements

Aux membres du jury,

Monsieur le Professeur Etienne DEVEAUX

Professeur des universités – Praticien hospitalier des CSERD

Section réhabilitation orale

Département de dentisterie restauratrice endodontie

Docteur en chirurgie dentaire

Docteur en sciences odontologiques

Docteur en odontologie de l'Université de Lille

Habilité à diriger des recherches

Doyen honoraire de la faculté de chirurgie dentaire de Lille

Membre associé national de l'Académie nationale de chirurgie dentaire

Personne compétente en radioprotection

Ancien président de la Société française d'endodontie

Chevalier dans l'Ordre des palmes académiques

*Vous me faites le très grand honneur de présider mon jury de thèse.
Je vous assure de toute ma gratitude pour la qualité de l'ensemble des
enseignements que vous nous avez prodigués ainsi que pour la pédagogie dont
vous avez fait preuve.
Veuillez accepter l'expression de mes sentiments les meilleurs ainsi que mon
profond respect.*

Monsieur le Docteur Laurent NAWROCKI

Maitre de conférences des universités – Praticien hospitalier des CSERD

Section chirurgie orale, parodontologie, biologie orale

Département chirurgie orale

Docteur en chirurgie dentaire

Docteur en odontologie de l'Université de Lille

Maîtrise en biologie humaine

Certificat d'Etudes Supérieures d'odontologie chirurgicale

Secrétaire du Collège National des Enseignants de Chirurgie Orale et Médecine Orale

Chef du Service d'odontologie du CHU de LILLE

Coordonnateur du Diplôme d'Etudes Spécialisées de Chirurgie Orale (Odontologie)

Responsable du Département de chirurgie orale

Tout au long de mon apprentissage pratique en clinique, vous avez été un référent attentif et à l'écoute de mes préoccupations. Vous m'avez accompagnée tout au long de ce travail afin qu'il puisse être de qualité. Soyez assuré de toute ma reconnaissance quant à la bienveillance et les conseils dont vous avez fait preuve à mon égard. Et pour tout cela je vous remercie infiniment.

Monsieur le Docteur Xavier COUTEL

Maitre de conférences des universités - Praticien hospitalier des CSERD

Section chirurgie orale, parodontologie, biologie orale

Département biologie orale

Docteur en chirurgie dentaire – UFR d'odontologie de Lille

Docteur en science de la vie et de la santé - Université de Lille

Master Recherche «Sciences, Technologies, Santé (STS), mention « Biologie Cellulaire, Physiologie et Pathologies (BCPP) », spécialité « Biologie, Biomorphologie, Bio-ingénierie du squelette (B3) », université Paris Descartes

Ancien Assistant Hospitalo-Universitaire des CSERD de Lille

Lauréat de l'Académie Nationale de chirurgie dentaire.

Dès les travaux pratiques d'anatomo-pathologie au début de mon cursus, j'ai compris que votre priorité était de livrer un enseignement de qualité, cela s'est confirmé avec les vacances de sixième année que vous supervisiez. Le fait de pouvoir vous poser des questions sans ressentir un jugement quelconque m'ont aidé à progresser et à prendre confiance dans ma pratique quotidienne. Pour avoir accepté de siéger dans mon jury et tous ces moments de stress évités je vous remercie sincèrement.

Madame le Docteur Bernice LOVI

Assistante Hopitalo-Universitaire des CSERD

Section chirurgie orale, parodontologie, biologie orale

Département biologie orale

Docteur en chirurgie dentaire

Certificat d'Etudes Supérieures d'odontologie chirurgicale – mention médecine buccale – Université de Lille

Certificat d'Etudes Supérieures de parodontologie

Master I Recherche Biologie Santé – parcours physiologie/physiopathologie – Université de Lille 2

*Je suis très honorée de vous compter parmi les membres de mon jury.
Veuillez trouver ici l'expression de mes sincères remerciements
et soyez assurée de mon profond respect.*

A ma famille, mes amis,

Table des matières

1	Introduction	15
2	Généralités	17
2.1	Historique	17
2.1.1	Le titane	17
2.1.2	Le dioxyde de titane	18
2.2	Les différentes méthodes d'extraction du titane	19
2.2.1	La méthode de Hunter	19
2.2.2	La méthode de Kroll	20
2.2.3	Les autres méthodes d'extraction	21
2.2.3.1	Le procédé FFC-Cambridge	21
2.2.3.2	Le procédé Armstrong	21
2.3	Les différentes utilisations du titane et du dioxyde de titane	22
2.3.1	Le titane	22
2.3.2	Le dioxyde de titane	22
2.4	Caractéristiques	23
-	Obtention du dioxyde de titane (TiO ₂) à partir de l'ilménite :	25
2.5	Propriétés	25
2.5.1	Biocompatibilité	25
2.5.1.1	L'hypersensibilité	26
2.5.2	Corrosion	27
2.5.3	Propriétés antibactériennes	28
2.5.3.1	Le dioxyde de titane	28
2.5.3.2	Le titane	30
2.5.4	Toxicité	30
2.5.4.1	Le Yellow Nail Syndrom	31
2.6	Coût	32
2.7	Données réglementaires	34
2.7.1	Le dioxyde de titane par ingestion orale	34
2.7.2	Le dioxyde de titane par inhalation	34
2.7.3	Le dioxyde de titane en cosmétologie	35
2.7.4	Le dioxyde de titane en odontologie	35
2.8	Impact environnemental	35
3	Titane et dioxyde de titane en odontologie	37
3.1	Implantologie	37
3.1.1	Historique	37
3.1.2	Titane pur, alliages et mousse de titane	37
3.1.2.1	Titane commercialement pur (cpTi)	37
3.1.2.2	Alliages et mousses de titane	39
3.1.3	Avantage	39
3.1.3.1	Propriétés physiques	39
3.1.3.2	Propriétés chimiques	39
3.1.3.3	Ostéointégration	40
3.1.3.4	Fabrication	40
3.1.4	Inconvénients	41
3.1.4.1	Défaillances	41

3.1.4.2	Allergies.....	42
3.1.4.3	Esthétique.....	43
3.1.5	Modifications de surface.....	43
3.1.5.1	Les traitements mécaniques.....	43
3.1.5.1.1	L'usinage.....	43
3.1.5.1.2	Le grenailage/sablage.....	44
3.1.5.2	Les traitements chimiques.....	45
3.1.5.2.1	Anodisation.....	45
3.1.5.2.2	Gravure à l'acide.....	45
3.1.5.3	Les revêtements.....	46
3.1.5.3.1	Projection de plasma.....	46
3.1.5.3.2	Revêtement de phosphate de calcium.....	47
3.1.5.4	Technique SLA.....	47
3.2	Chirurgie orale et maxillo-faciale.....	48
3.3	Prothèse.....	49
3.3.1	Prothèse fixée.....	50
3.3.2	Prothèse amovible.....	51
3.4	Dentisterie restauratrice endodontie.....	52
3.4.1	Dentisterie restauratrice.....	52
3.4.2	Endodontie.....	52
3.5	Parodontologie.....	53
3.6	Orthodontie.....	54
3.7	Prophylaxie.....	56
3.8	Instrumentation dentaire.....	56
4	Conclusion.....	57

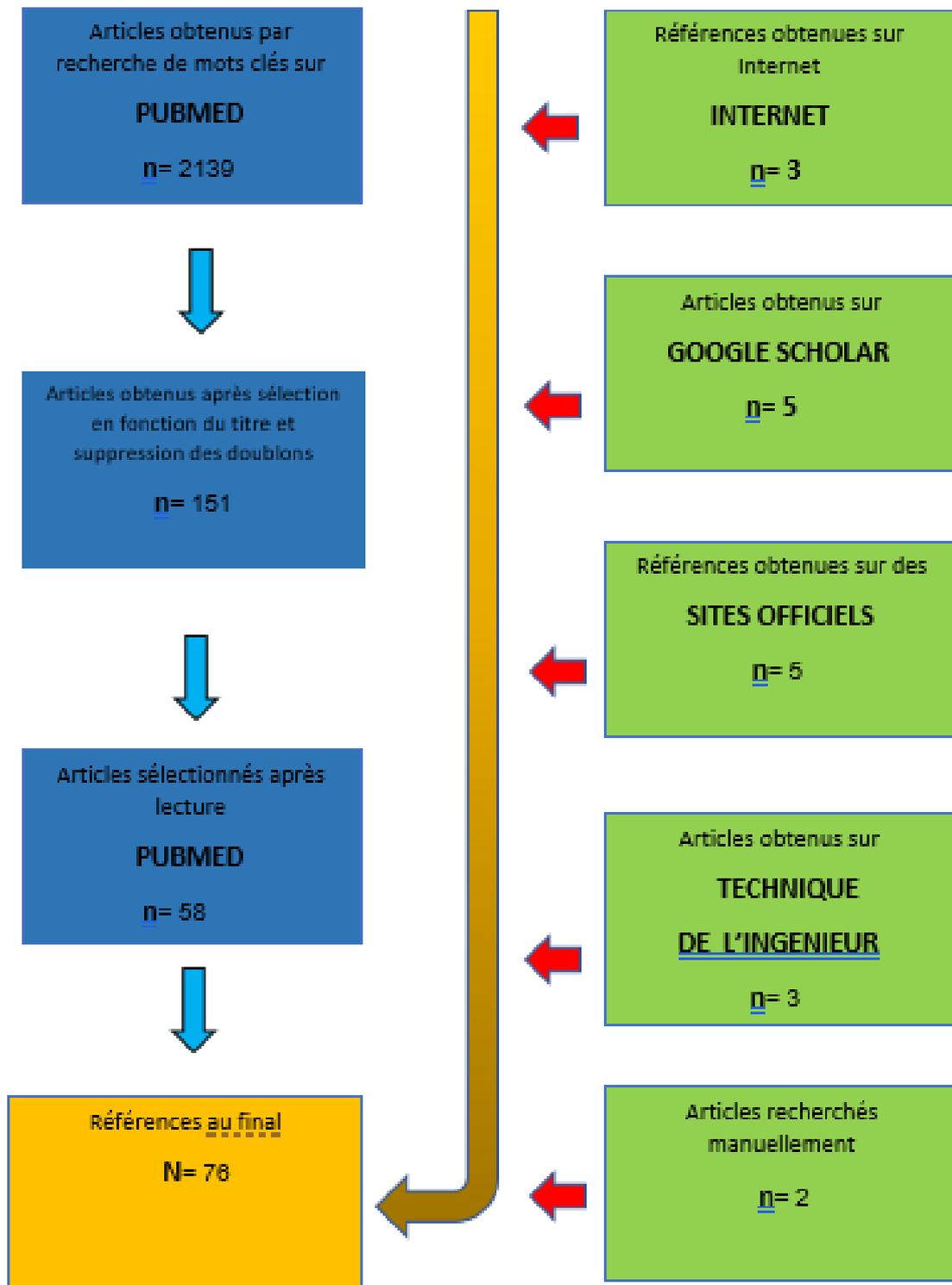
1 Introduction

Le titane est un matériau utilisé depuis quelques décennies. Son utilisation a été rendue possible après des années de recherche afin de déterminer comment l'extraire de manière non dangereuse et pouvoir le préparer de manière industrielle.

C'est plus récemment que le dioxyde de titane est considéré comme un matériau à part entière et non plus seulement la forme minérale permettant d'obtenir le titane sous forme de métal.

Ces deux matériaux ont de nombreuses propriétés qui ont conduit à leur utilisation dans notre quotidien. Ses avantages lui ont donc permis d'obtenir une place de choix dans de multiples domaines. Ceci amène cette réflexion : quelles sont les connaissances actuelles sur le titane et le dioxyde de titane ?

Les recherches d'articles ont été effectuées sur le moteur de recherche PUBMED avec des mots-clés tels que : « titanium and dentistry » « titanium dioxide and biocompatibility », « titanium and biocompatibility » « titanium deposit ». Des recherches complémentaires ont été menées sur : Technique de l'ingénieur, les sites officiels des autorités de sécurité sanitaire européennes et françaises. Ceci a permis d'établir un plan et d'affiner un peu plus les recherches.



Martin Klaproth, un chimiste allemand, trouve cette même substance dans des roches en provenance de Hongrie en 1794. Il prend conscience que cette substance est un métal associé à un ou plusieurs atomes d'oxygène. Il appelle ce composé titane en référence aux titans et à leur puissance. Klaproth et Gregor ont découvert l'oxyde de titane mais ne parviennent pas à en extraire le titane. [21]

Il faudra attendre le XX^e siècle, notamment 1910, pour qu'un chimiste américain Matthew Hunter parvienne à isoler le titane du dioxyde de titane en laboratoire en faisant réagir le tétrachlorure de titane avec le sodium. [21]

En 1937, un métallurgiste luxembourgeois nommé William Kroll, a travaillé à l'élaboration d'une nouvelle méthode de production du titane car la méthode développée par Hunter était jugée explosive et non adaptée à la commercialisation. [50]

2.1.2 Le dioxyde de titane

Le dioxyde de titane a été utilisé, dans un premier temps, en tant que précurseur du titane. Le dioxyde de titane est un composé inorganique.

C'est un nanomatériau. Un nanomatériau est un matériau d'origine naturelle ou manufacturé contenant des particules libres sous forme d'agrégat ou d'agglomérat et dont au moins 50% présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 et 100 nanomètres.

Il se présente sous forme de poudre blanche. Il est stable d'un point de vue thermique, inerte, ininflammable, insoluble dans l'eau, les solvants organiques, l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique dilué [10]. La poudre de TiO₂ est inodore, d'un poids moléculaire de 79,9 g/mol, d'un point d'ébullition de 2972°C, d'un point de fusion de 1843°C et d'une densité relative de 4,26 g/cm³ à 25°C. C'est un composé largement utilisé ces dernières années. Il a de multiples propriétés. Ces propriétés intéressent de nombreux secteurs. [61]

Le dioxyde de titane a été découvert au début des années 1900.

Le dioxyde de titane est utilisé dans plusieurs domaines :

- le bâtiment,
- l'industrie pharmaceutique,
- la santé,
- l'agroalimentaire. [21]

Le dioxyde de titane sous forme de nanomatériau se présente sous 3 formes cristallines [43,21] :

- anastase,
- brookite,
- rutile.

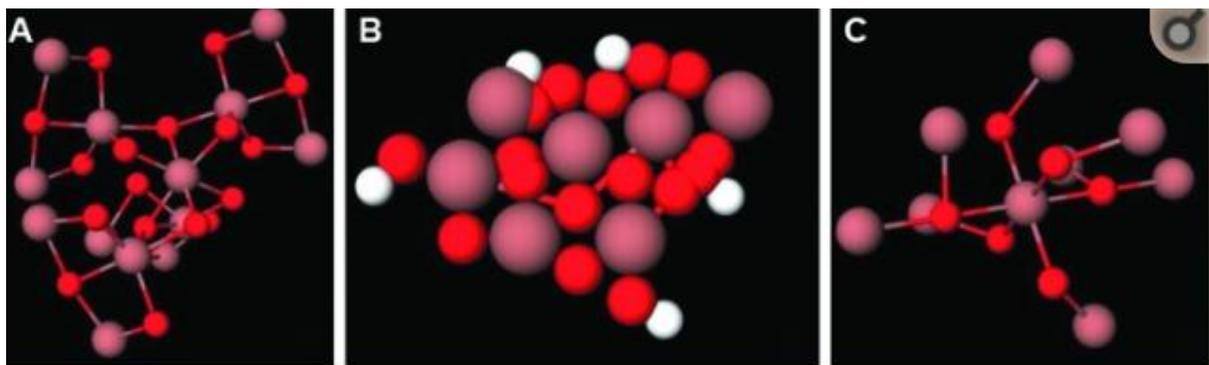


Figure 1 : représentation moléculaire des différentes cristallines A (anastase) B (brookite) C (rutile) [68]

L'anastase est la forme cristalline la plus réactive chimiquement. [21]

2.2 Les différentes méthodes d'extraction du titane

2.2.1 La méthode de Hunter

Le procédé d'extraction du métal par Matthew Hunter utilise du sodium (Na) ainsi que du tétrachlorure de titane (TiCl_4).

Le sodium va servir de réducteur pour le tétrachlorure de titane. Le Na chauffé est ajouté au TiCl_4 . Lorsque le mélange Na/ TiCl_4 atteint une certaine température, le

TiCl₄ donne chlorure de titane (TiCl₂). Enfin, à la fin de l'opération, la réduction du chlorure de titane en titane est obtenue. [44]

2.2.2 La méthode de Kroll

Le procédé d'extraction du métal par William Kroll permet une extraction du métal moins dangereuse. Elle peut être utilisée de manière industrielle, elle utilise du magnésium à la place du sodium.

La réaction est la suivante :

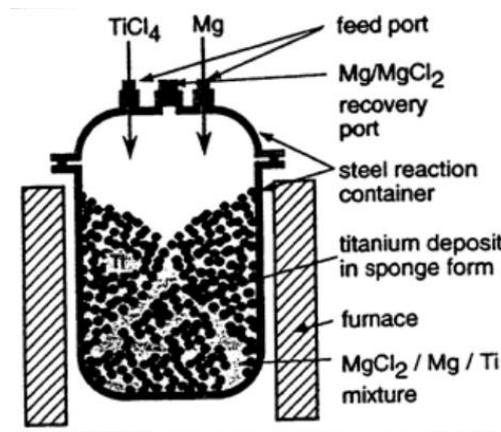
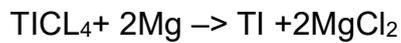


Figure 2 : schéma représentatif du procédé de Kroll [49]

Cette réaction est réalisée dans une cuve métallique.

Les minéraux de titane rutilé et ilménite sont carbochlorés pour éliminer l'oxygène, le fer et d'autres impuretés, produisant une vapeur de TiCl₄.

Cette dernière est ensuite réduite en titane métallique par le magnésium métallique.

Le titane (Ti) et un autre produit le chlorure de magnésium (MgCl₂) sont obtenus. Ce produit est éliminé par distillation sous vide. [11]

2.2.3 Les autres méthodes d'extraction

Les coûts de production industrielle du titane ont poussé au développement d'autres techniques ces dernières années. Ces méthodes sont des méthodes plus économiques que celles de Hunter et Kroll. Deux de ces techniques vont être développées.

2.2.3.1 Le procédé FFC-Cambridge

Le procédé FFC-Cambridge porte le nom de ses auteurs, Derek Fray, Tom Farthing et George Chenest de l'université de Cambridge. C'est une méthode de désoxydation électrochimique au sel fondu qui a été inventée au département de science des matériaux et de métallurgie de l'université de Cambridge il y a une vingtaine d'années.

Il s'agit d'une technologie générique qui permet la conversion directe des oxydes métalliques en métaux correspondants par polarisation cathodique de l'oxyde dans un électrolyte de sel fondu à base de chlorure de calcium. Le procédé est assez universel dans son application. Il permet de réduire le nombre d'étapes métallurgiques nécessaires à la fabrication du titane. Les étapes métallurgiques étant l'extraction, l'alliage et la mise en forme. Le résultat de ce procédé est la poudre de titane. L'obtention de titane métallique par électrochimie est une cible particulièrement intéressante en raison des inconvénients des méthodes d'extraction existantes. [18]

2.2.3.2 Le procédé Armstrong

Le procédé Armstrong est un procédé plus récent. Il permet d'obtenir du dioxyde de titane pur et du Ti-6Al-4V (un alliage de titane) par réduction à l'aide de tétrachlorure de titane. Le tétrachlorure de titane mélangé à d'autres halogénures (combinaison d'un halogène avec un autre élément) est réduit grâce au sodium.

Le procédé produit des particules de poudre ayant une morphologie unique. Sa morphologie permet une meilleure compressibilité et une meilleure capacité de compactage.

Le degré élevé d'imbrication entre les particules de poudre adjacentes offre des avantages distincts dans le compactage au rouleau, permettant le laminage direct de la poudre en feuille de titane. [5]

2.3 Les différentes utilisations du titane et du dioxyde de titane

2.3.1 Le titane

Le titane est aujourd'hui un matériau abondamment utilisé.

Il est en premier lieu utilisé dans l'industrie aéronautique. Cette utilisation importante dans cette industrie est due aux qualités du matériau. Parmi les qualités, il y a : la légèreté, la résistance à la corrosion, la solidité. [21]

L'usage du titane dans le domaine de la santé est important. C'est un matériau biologiquement toléré dès lors qu'il est implanté. Il rentre dans la composition des éléments destinés à substituer un os fracturé, une dent manquante. [21]

2.3.2 Le dioxyde de titane

Aujourd'hui le dioxyde de titane est davantage utilisé. Il trouve plus d'utilisations que le titane. [61]

Dans l'industrie du bâtiment, le dioxyde de titane est utilisé pour ses propriétés antibactériennes et ses capacités à résister aux conditions extérieures.

En ce qui concerne l'industrie automobile : il apporte une résistance à l'écaillage, il protège contre la corrosion, il est photo durable. Et il permet aussi de conserver la brillance dans le temps. [21]

Il se trouve dans de nombreux produits cosmétiques :

- des baumes,
- des lotions,

- des crèmes,
- des écrans solaires,
- des rouges à lèvres,
- des teintures capillaires,
- des traitement antirides,
- des crèmes protectrices pour bébés,
- des traitements anticellulite.

Dans de nombreux produits d'hygiène :

- savon,
- shampooing,
- déodorant,
- dentifrice.

Le dioxyde de titane s'applique à l'industrie alimentaire sous l'additif portant le sigle E171. C'est un colorant, opacifiant permettant de diminuer ou mélanger les couleurs indésirables. Il est donc utilisé dans les confiseries, les glaçages pâtisseries, les fromages, les garnitures. Par exemple, l'additif E171 est utile pour blanchir le lait, rehausser la couleur du cabillaud. Le dioxyde de titane permet cela sans changer le goût du produit qu'il soit cru ou cuit. Il est stable à la chaleur et n'est pas sensible à la transformation des aliments.

En matière de santé : il est utilisé en médecine, en odontologie, mais aussi dans des spécialités pharmaceutiques (vaccins, médicaments).

L'aspect odontologique est développé dans la seconde partie. [45,21]

2.4 Caractéristiques

Le titane n'est pas disponible dans la nature sous forme pure [61]. Ceci en raison de sa forte affinité pour l'oxygène, le carbone et l'azote [21]. Il existe un peu plus de 80 variétés de minerais de titane. Les principales formes exploitées de manière industrielle sont le rutil et l'ilménite.

Le rutile est une forme du dioxyde de titane retrouvée dans la nature. Il est composé de dioxyde de titane à 97%, le reste étant des impuretés métalliques telles que le fer ou le manganèse. Cette forme se trouve principalement en Norvège, en Australie et aux Etats-Unis. [24]

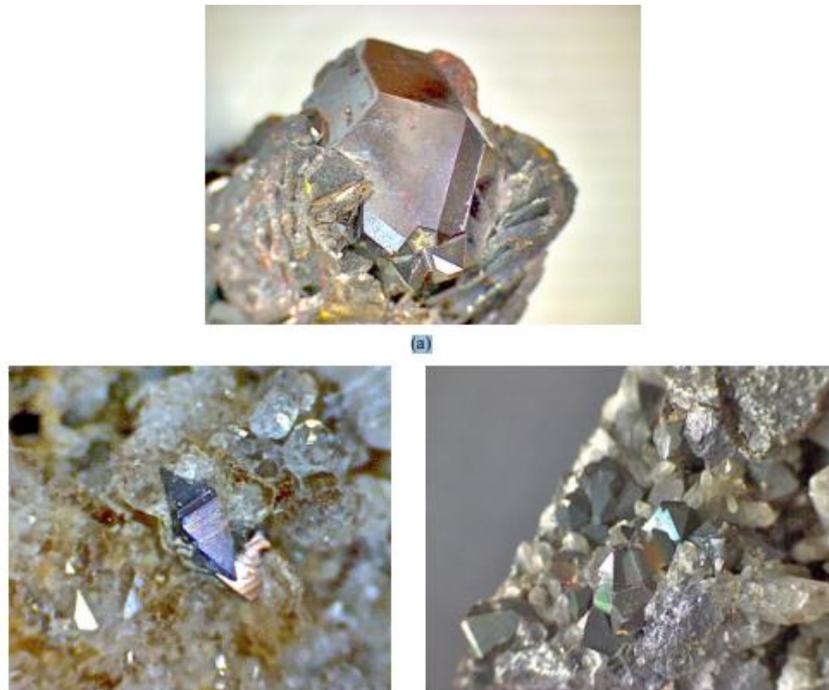


Figure 3 : photographie du rutile à l'état naturel [21]

L'ilménite est composé de titanate ainsi que d'oxyde de fer. L'ilménite contient seulement 30% de titane, c'est donc une forme impure. Mais il s'agit de la forme la plus répandue sur la terre. Elle se trouve au Kazakhstan, Russie, Ukraine, Afrique du Sud, Inde, Canada, Amérique du sud. La production de titane à partir de ce minerai avoisine les 50% dans le monde. [21]



Figure 4 : photographie de l'ilménite à l'état naturel [21]

- Obtention du dioxyde de titane (TiO_2) à partir de l'ilménite :

l'ilménite est la matière première du procédé au sulfate. La formule chimique de l'ilménite est FeTiO_3 . Dans un premier temps ce minerai est broyé et mélangé à de l'acide sulfurique (H_2SO_4) ce qui donne un mélange de sulfate. Ce mélange mené à 420-470 °K donne $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ et TiOSO_4 . Ensuite la réduction $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ et la séparation par cristallisation donne $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Le TiOSO_4 est hydrolysé, il donne le TiO_2 hydraté. Ce dernier est déshydraté pour donner le TiO_2 , le dioxyde de titane. L'ilménite est la source de dioxyde de titane aujourd'hui la plus importante en termes de quantité. Elle va être de plus en plus utilisée au détriment du rutile dont les réserves sont aujourd'hui plus faibles. [21]

En ce qui concerne le rutile le procédé d'extraction est celui de Kroll, le rutile étant déjà composé de 90% de dioxyde de titane à l'état naturel.

Une fois le dioxyde de titane obtenu, sous forme de poudre ou d'éponge, il peut être compacté, refusionné, raffiné. Ces opérations permettent d'obtenir au final des lingots de titane ou encore des feuilles de titane.

2.5 Propriétés

2.5.1 Biocompatibilité

La biocompatibilité est la capacité d'un matériau à remplir une fonction spécifique avec une réponse appropriée de l'hôte. Ce matériau, résorbable ou non, peut être implanté dans le corps humain pour remodeler, réparer, remplacer des fonctions ou des organes défectueux, ou même susciter leur autoréparation.

Le titane est non toxique et peu rejeté par l'organisme d'après la littérature [16]. Il est utilisé depuis de nombreuses années dans le domaine médical.

Le titane est compatible avec l'organisme humain [53]. Ce qui est entendu par compatible avec l'organisme humain, c'est qu'il n'entraîne pas de lésion ou de réaction délétère. Il n'est pas dangereux pour le milieu dans lequel il est intégré. Il résiste bien à la corrosion en raison de son caractère passif. La passivation est définie comme la création d'une couche externe au matériau formant une protection contre la corrosion.

Le titane peut provoquer des réactions d'hypersensibilité.

Le dioxyde de titane fait partie des molécules régulièrement côtoyées dans notre quotidien. Les différentes utilisations évoquées un peu plus tôt permettent d'affirmer qu'il y a deux types d'exposition au dioxyde de titane :

- la voie orale : ingestion des comprimés des médicaments, des pâtisseries,
- la voie cutanée : par application de crèmes et de cosmétiques entrant en contact direct avec la peau.

Le fait d'être exposé de manière générale à ce nanomatériau laisse penser qu'il est compatible avec notre organisme. Cependant, cela n'exclut pas le fait que ce dernier puisse causer des dommages corporels et sanitaires par accumulation. [16]

2.5.1.1 L'hypersensibilité

L'hypersensibilité au titane est dite de type IV, c'est-à-dire qu'elle entraîne une réaction 48 à 72 heures après l'exposition. Elle survient généralement après une exposition fréquente au matériau mis en cause.

Comme dit précédemment, l'exposition au dioxyde de titane et au titane survient quotidiennement de manière plus ou moins consciente.

Les montres, les bijoux et les cosmétiques entre autres sont des sources qui soumettent la population aux agents sensibilisants.

L'hypersensibilité au titane se manifesterait au travers de divers symptômes et effets indésirables. Ils peuvent être locaux ou plus généraux.

Les symptômes les plus courants sont :

- une fatigue chronique,
- une dépression,
- une fibromyalgie,
- une réaction lichénoïde (lésions lichénoïdes buccales, dermatite de contact). [53]

L'hypersensibilité serait causée par une succession de réactions [70] :

- 1) adsorption des nanoparticules de titane par les protéines sanguines,
- 2) formation de complexes protéines-nanoparticules,
- 3) phagocytose des complexes par les macrophages et les fibroblastes,
- 4) formation de dépôts dans les tissus locaux,
- 5) réactions d'hypersensibilité retardée.

2.5.2 Corrosion

Le titane résiste bien dans le milieu buccal. Sa couche de passivation peut être rompue. Dans des conditions orales et en combinaison avec des charges cycliques, il y a des phénomènes de corrosion.

Il y a plusieurs types de corrosion pour le titane [53] :

- la corrosion galvanique,
- la corrosion par contact,
- la corrosion par piqûre,
- la corrosion par fissure.

La corrosion galvanique se produit lorsque deux éléments métalliques différents sont reliés par un milieu aqueux, tandis que la corrosion par contact résulte de la rupture de la couche protectrice du titane. La corrosion par piqûre est associée à la rupture de la couche de passivité du titane. Enfin la corrosion par fissure est due à un état de surface irrégulier.

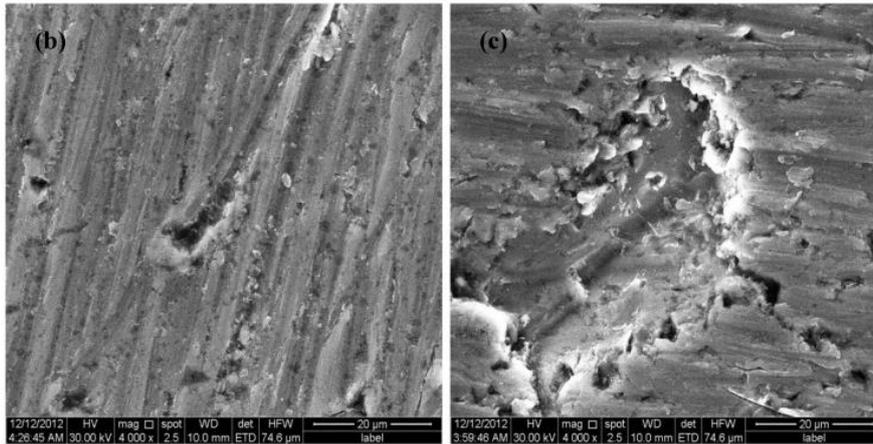


Figure 5 : illustration de la corrosion par piqûre [54]

Il y a une rupture de la continuité du titane. [54]

La corrosion est une caractéristique qui s'applique à un métal. Elle ne concerne donc pas le dioxyde de titane.

2.5.3 Propriétés antibactériennes

2.5.3.1 Le dioxyde de titane

Le dioxyde de titane est pourvu d'activité antibactérienne à large spectre. Cette activité est due au dommage mécanique et oxydatif qu'il cause au niveau des cellules bactériennes.

Le mécanisme étant comme suit : le dioxyde de titane, l'eau et l'oxygène réagissent et forment un oxygène actif (ROS). Les ROS impliquent la production d'un stress oxydatif par les bactéries. Cette production n'est possible qu'à partir du moment où la concentration en ROS dépasse les capacités du système de défense anti-oxydation des bactéries. La structure et la fonction des bactéries sont endommagées. Le stress mécanique quant à lui est le résultat du contact entre le dioxyde de titane et la bactérie. La membrane bactérienne finit par se déformer, le dioxyde de titane entre à l'intérieur de la cellule puis détruit la cellule de l'intérieur. Le TiO_2 agit sur l'ARN, sur l'ADN et il inactive les protéines de la cellule bactérienne. [62]

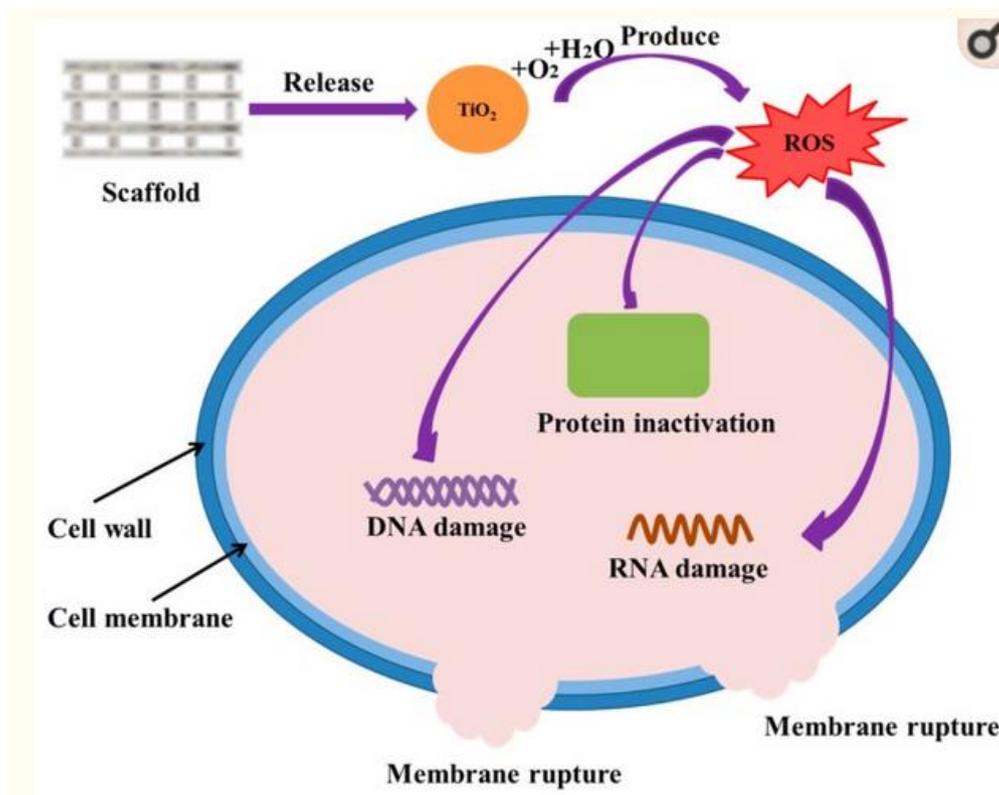


Figure 6 : illustration du mécanisme antibactérien [62]

L'efficacité antibactérienne du dioxyde de titane dépend de plusieurs facteurs :

- la cristallinité,
- le diamètre de nanotubes,
- la chimie et le procédé de fabrication.

D'un point de vue moléculaire, une température élevée favorise le passage de la forme anatase à la forme rutile. L'anatase est la structure cristalline ayant l'activité antibactérienne la plus élevée. En effet, c'est la forme qui produit le plus d'oxygène actif étant donné sa configuration. Ceci amène à conclure qu'une température élevée diminue les propriétés antibactériennes du dioxyde de titane.

Ces facteurs affectent les réponses aux souches de bactéries, comme *Streptococcus epidermidis* et *Streptococcus aureus* par exemple. [68]

Le dioxyde de titane possède un indice de réfraction élevé ce qui lui confère une propriété importante : la photocatalyse.

La photocatalyse joue un rôle important dans la destruction des agents pathogènes. Elle permet de décomposer puis tuer les bactéries sous l'effet de l'irradiation de la lumière.

Le dioxyde de titane est un nanomatériau qui permet la réduction de la croissance bactérienne. Il permet de ce fait de lutter contre les infections. [68]

2.5.3.2 Le titane

A ce jour il n'a pas été prouvé que le titane possède des qualités antibactériennes. Pourtant, il appartient au groupe des métaux qui ont la capacité de réduire la colonisation bactérienne. Les propriétés antibactériennes du titane lui sont davantage conférées par des agents chimiques additionnés ou des modifications de surface du matériau.

2.5.4 Toxicité

Le titane et le dioxyde de titane ont des utilisations multiples. Ces matériaux sont amenés à avoir encore une croissance importante et de plus en plus de poids dans les diverses industries. Comme pour tous les matériaux, leur emploi a nécessité des recherches approfondies dans le but de savoir s'ils n'étaient pas toxiques pour l'homme.

C'est dans cette disposition que des études ont été menées.

Le centre international de recherche sur le cancer a conclu, sur la base d'études épidémiologiques, qu'il n'y a pas de preuve que les poudres de dioxyde de titane soient cancérigènes pour l'homme mais il n'écarte pas non plus la possibilité de la cancérogénicité du dioxyde de titane. Cependant il a été démontré que les poussières de dioxyde de titane avaient provoqué chez les rats de laboratoire des tumeurs au niveau des voies respiratoires après avoir inhalé de manière prolongée ces poussières. Le dioxyde de titane passe dans la circulation systémique en traversant l'épithélium alvéolaire pulmonaire et ainsi, il se dissémine dans les autres organes. [72]

Toutefois, pour ce qui est du dioxyde de titane ingéré par l'alimentation et les prises médicamenteuses, une étude a conclu grâce à l'utilisation du vanadium, que la majeure partie du dioxyde de titane terminait dans les selles.

Le foie est considéré comme organe cible possible des effets néfastes après ingestion de dioxyde de titane par voie orale. [72]

Le dioxyde de titane appartient au groupe 2B des substances cancérigènes. L'étude de Hong et coll. a montré que l'exposition aux nanoparticules de dioxyde de titane provoquait une baisse de la fertilité ainsi qu'une inflammation testiculaire chez la souris. C'est pourquoi le dioxyde de titane est assimilé aux perturbateurs endocriniens. [28]

De plus, le dioxyde de titane agit comme un transporteur du bisphénol A, il augmente sa bioconcentration chez les poissons zèbres. Or le bisphénol A est un perturbateur endocrinien. [17]

Le titane métal est considéré comme étant inerte. Dans l'organisme le titane sous forme de métal est protégé de la corrosion grâce à la couche de passivation. Une fois celle-ci rompue, le titane libéré forme en milieu aqueux du dioxyde de titane. Il a donc les mêmes caractéristiques concernant la toxicité. [33]

2.5.4.1 Le Yellow Nail Syndrom

Le syndrome de l'ongle jaune est une maladie systémique qui semblerait être causée par la présence de molécules de titane dans les voies systémiques.

Ce syndrome a été caractérisé comme tel par Sammam et White. Ils ont observé chez un patient, en plus d'un syndrome de lymphœdème, une pousse plus lente des ongles, des ongles plus épais et présentant une coloration jaunâtre. [33]

Ce syndrome est principalement objectivé par :

- une coloration des ongles,
- une obstruction bronchique,
- un lymphœdème,
- un épanchement pleural récurrent,

- une toux intermittente,
- une inflammation du sinus maxillaire, une sinusite chronique.

En ce qui concerne les symptômes, ils ne sont pas tous présents au début de la maladie. Il semble que la coloration des ongles intervient à un stade avancé de la maladie. De même pour le lymphœdème tandis que la sinusite chronique intervient précocement dans l'évolution de la maladie.

Le titane a donc été jugé comme étant l'agent pathogène à l'origine du syndrome de l'ongle jaune, pour des patients présentant des implants dentaires ou pour des patients ayant une médication quotidienne contenant du dioxyde de titane. [33]

2.6 Coût

Le titane a vu son coût fluctuer au cours du temps du fait de ces utilisations dans de nombreux domaines comme vu précédemment.

Le graphique ci-dessous représente le cours du titane pur à 99,60% (l'éponge de titane) au cours de ces dix dernières années.

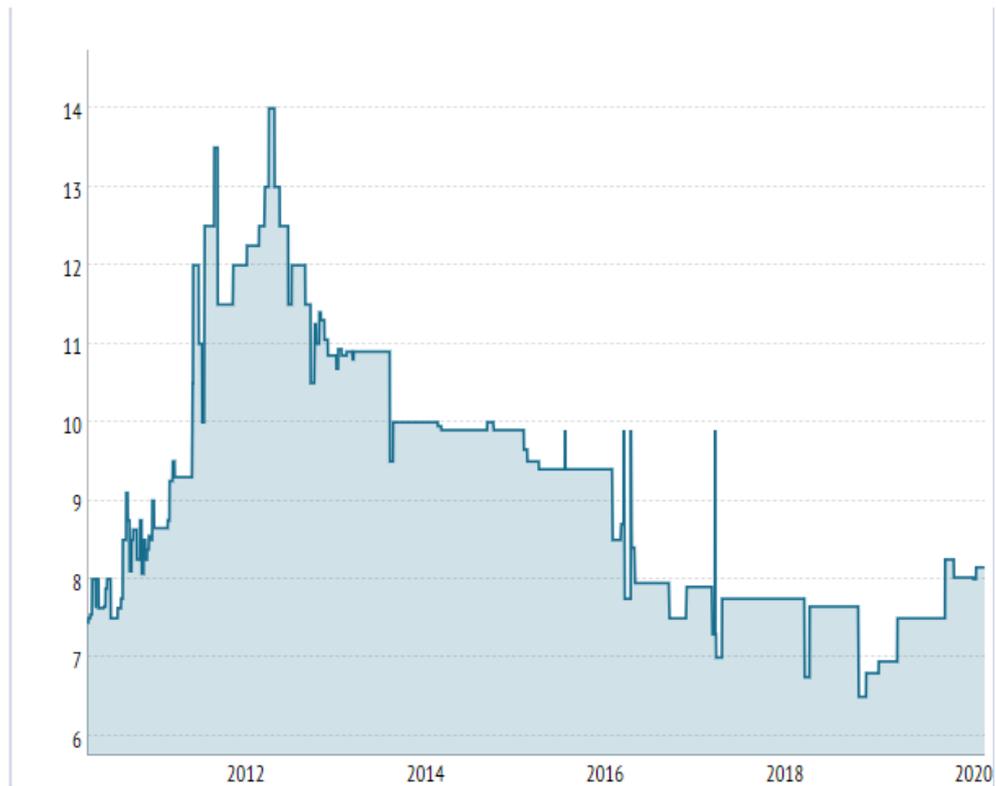


Figure 7 : représentation graphique du cours de l'éponge de titane de 2010 à 2020

Le cours du titane a été au maximum à 14 USD le kg en avril 2012 et au minimum à 6,5 USD le kg en octobre 2018. En mars 2020 le cours du titane 99,60% est à 8,15 USD le kg.



Figure 8 : représentation graphique du cours du titane métal de 2010 à 2020

Le cours du titane métal quant à lui a été au maximum à 13 USD le kg en mars 2012 et au minimum à 3 USD le kg en décembre 2016. En mars 2020 le cours du titane métal est à 4,3 USD le kg. [41,42]

2.7 Données réglementaires

[30,4,46,13]

2.7.1 Le dioxyde de titane par ingestion orale

En ce qui concerne l'utilisation du dioxyde de titane en tant qu'additif alimentaire, l'ANSES (agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail) a établi que l'utilisation du E171 est autorisée sans limite maximale mais avec le minimum de produit possible qui permet d'atteindre l'effet souhaité.

A ce jour, il n'y a pas encore de dose journalière admissible, d'où la nécessité de mener des études complémentaires.

Un arrêté a été pris en France en avril 2019 visant à interdire l'utilisation de l'additif E171 dans l'industrie alimentaire dès le 1^{er} janvier 2020. Cette interdiction a été prise dans le but de respecter le principe de précaution bien que la toxicité de l'additif n'a pas été prouvée.

L'agence a réaffirmé ses recommandations concernant les nanomatériaux, le dioxyde de titane étant inclus dans les nanomatériaux. Il faut limiter au maximum l'exposition aux nanomatériaux dans la mesure où des alternatives sont possibles. L'agence est « dans l'attente d'une meilleure caractérisation du danger et des risques du E171 ».

2.7.2 Le dioxyde de titane par inhalation

Au vu des études qui ont été menées montrant les effets cancérigènes du dioxyde de titane par inhalation sur les rats, l'ANSES a demandé à l'ECHA (agence européenne des produits chimiques), le classement du dioxyde de titane dans le groupe 2B des substances cancérigènes. Et ceci en dépit du fait que « le caractère

cancérogène reste débattu du fait de limites méthodologiques des études épidémiologiques disponibles ». Il est donc suspecté de cancérogénicité par inhalation chez l'homme.

2.7.3 Le dioxyde de titane en cosmétologie

Le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) recommande de limiter l'exposition à 0,1mg par m³ pour les nanoparticules de dioxyde de titane et 1,5 mg par m³ pour les particules fines.

L'ANSM (l'Agence National de Sécurité du Médicament) recommande aux usagers de ne pas appliquer ces produits sur des peaux lésées. Elle recommande aussi de ne pas utiliser de produit sous forme d'aérosols à proximité du visage afin de ne pas prendre le risque d'inhalation.

Ces recommandations concernent principalement l'utilisation du dioxyde de titane en tant que filtres ultraviolets. Cela s'applique principalement pour les crèmes solaires.

2.7.4 Le dioxyde de titane en odontologie

En ce qui concerne la réglementation du dioxyde de titane dans son utilisation en odontologie, la littérature n'en parle pas. L'utilisation du dioxyde de titane en odontologie n'amène pas à l'inhalation. Concernant l'ingestion, il est légitime de se demander si les débris de corrosion pourraient être ingérés.

2.8 Impact environnemental

Il est question dans ce paragraphe de savoir si l'utilisation importante du dioxyde de titane et du titane impacte notre environnement. Du fait de la gestion des déchets, les nanoparticules de dioxyde de titane finissent par se retrouver dans le cycle des eaux usées. Dans les stations d'épuration se trouvent deux compartiments : les eaux traitées et les effluents de boues. [67]

Les nanoparticules se retrouvent dans les biotopes aquatiques et terrestres. Une grande partie des effluents de boues sont répandus dans les champs agricoles par le biais des engrais. L'écoulement des eaux à travers ces sols pollue les couches profondes de la terre et engendre la pollution des masses d'eau. [67,36]

Une étude de Yeo et Nam a montré que les nanoparticules de dioxyde de titane se transféraient de la proie au consommateur sur une période de 17 jours. De plus, il y a aussi un transfert du titane qui se fait du sol vers les plantes et du sol vers le milieu aquatique. Toutefois, il semble ne pas y avoir d'effets toxiques augmentés dans le cas d'une culture comestible sur des terres contenant des minerais de titane : le risque est qualifié de faible. [75]

Une étude menée dans deux stations d'épuration norvégiennes montre que la majeure partie des déchets nanoparticulaires de dioxyde de titane provient des ménages et de sources ponctuelles telles que l'industrie. L'élimination de 70% de ces déchets peut se faire par des traitements physico-chimiques et mécaniques. [52]

Le dioxyde de titane est dans certains cas recyclé. Par exemple, en ce qui concerne les boues d'ilmenite, considérées comme dangereuses, elles peuvent en partie être utilisées en tant que liant dans le béton. Lorsqu'elles sont additionnées, elles n'altèrent pas les caractéristiques. C'est une manière de diminuer la quantité de boues dans les décharges.

Concernant le titane, les chutes massives ainsi que les copeaux sont recyclés. Ils sont majoritairement refusionnés afin d'être réutilisés. [12]

Ce qu'il faut retenir :

Le titane et son dérivé le dioxyde de titane sont utilisés dans de multiples domaines de la vie quotidienne étant données leurs nombreuses propriétés. L'utilisation de ces substances tend à être de plus en plus règlementée. A ce jour, le titane est considéré comme un élément à faible toxicité tandis que le dioxyde de titane fait l'objet de controverses.

3 Titane et dioxyde de titane en odontologie

3.1 Implantologie

Le titane est un des métaux les plus utilisés dans la pratique dentaire. Il trouve une application certaine en implantologie du fait de ses caractéristiques. [57]

3.1.1 Historique

Les premiers implants à base de titane ont commencé à être utilisés dans les années 1960 [9]. Avant cela les tentatives de remplacement de dents à l'aide d'implant employaient de l'or, du vanadium et d'autres matériaux. Ils sont appelés implant endosseux. Il s'agissait de tiges de titane qui étaient implantées directement dans l'os. L'usage du titane en implantologie est dû à Branemark, un chirurgien et chercheur suédois. Lors d'une expérience pour laquelle il utilise des caméscopes en titane, il observe que ce métal n'est pas rejeté par l'os. Il pratique la première implantation avec un implant en titane sur un patient âgé de 34 ans. Les implants sont utilisés, après plusieurs mois de cicatrisation, pour fixer des dents prothétiques. Cette découverte marque le début de l'utilisation du titane en implantologie dentaire. L'implant en titane est devenu depuis le «gold standard». [20,25]

3.1.2 Titane pur, alliages et mousse de titane

Le titane est utilisé soit seul, soit sous forme d'alliage avec d'autres métaux. Les alliages ont pour but d'améliorer les propriétés du titane.

3.1.2.1 Titane commercialement pur (cpTi)

C'est avec ce titane dit « commercialement pur » qu'une grande partie des implants dentaires est fabriquée. Il y a 4 grades, la répartition dans les grades dépend de la pureté du matériau et de sa composition. Ce qui diffère principalement, c'est le pourcentage de fer et de carbone.

Pour les 4 grades : le pourcentage de carbone s'élève à 0,10%, le pourcentage d'hydrogène est de 0,015% et celui de l'azote est de 0,03%. [15]

Pour ce qui est de la différence entre les 4 grades, les pourcentages s'élèvent à :

- pour le grade 1 :
 - 0,18% d'oxygène,
 - 0,02% de fer ;
- pour le grade 2 :
 - 0,25% d'oxygène,
 - 0,03% de fer ;
- pour le grade 3 :
 - 0,35% d'oxygène,
 - 0,03% de fer ;
- pour le grade 4 :
 - 0,40% d'oxygène,
 - 0,05% de fer.

Pour les implants dentaires, l'usage du grade 4 est prépondérant du fait de sa résistance plus élevée. [15]

Le titane existe sous différentes formes cristallines au nombre de deux : les formes alpha (α) et beta (β). Ces formes vont varier en fonction de la température [14] :

- la forme alpha (α) : elle a pour structure de base l'hexagone. Elle est stable jusqu'à la température de 882°C. Cette structure est fermée et compacte ;
- la forme beta (β) : elle a pour structure de base le cube. « Cette structure cubique est centrée sur le corps ». Dès lors que la température de 883°C est atteinte, la forme cristalline obtenue est la forme β .

Lorsqu'un métal est allié au titane, il modifie la température de stabilité de l'une ou l'autre phase cristalline. Il modifie aussi la structure microscopique et de ce fait les propriétés physiques et/ou chimiques du titane. C'est ainsi que les propriétés du titane peuvent être améliorées.

3.1.2.2 Alliages et mousses de titane

Les éléments ajoutés au titane pour former un alliage dépendent des propriétés à améliorer. Dans le cadre de l'implantologie, il est intéressant de trouver une combinaison permettant de meilleures propriétés chimiques ou mécaniques sans pour autant altérer les bonnes propriétés du titane.

L'alliage le plus utilisé en implantologie dentaire est le Ti6Al4V [57]. C'est un alliage composé de titane, d'aluminium à hauteur de 6% et de 4% de vanadium. L'aluminium est un stabilisateur de la phase alpha tandis que le vanadium stabilise la phase beta. D'un point de vue mécanique, le Ti6Al4V résiste mieux à la traction, à la fatigue et a une dureté plus élevée. [15,26]

Des chercheurs ont mis au point un nouveau type d'implant. Cet implant est fait en mousse de titane. Le fait d'avoir cette forme de mousse permet à l'implant d'être poreux et d'imiter les trabécules osseuses. Pour la fabrication de cette mousse de titane, la poudre de titane est combinée à un polymère. Puis un agent moussant est incorporé : il permet au polymère de prendre du volume sous l'effet de la température. L'agent moussant permet de créer la texture « mousse ». Un deuxième traitement thermique avec une température élevée va provoquer le retrait du polymère de la matière en laissant des « vides » dans la matière. La mousse de titane résulte de ce traitement. [3]

3.1.3 Avantage

3.1.3.1 Propriétés physiques

Le titane a pour avantage d'être flexible dans une moindre mesure. Cette caractéristique permet aux implants en titane d'absorber une partie des contraintes qui sont principalement dues à la mastication. La flexibilité est compatible avec les propriétés mécaniques de l'os. [22]

3.1.3.2 Propriétés chimiques

La passivation est l'aptitude d'un matériau à se créer une couche protectrice afin de remédier aux agressions susceptibles de l'endommager. [53]

Le titane fait partie des métaux qui ont la capacité de former une couche passive à sa surface. En effet, la passivation du titane ne peut avoir lieu qu'en présence d'oxygène. Dans le milieu physiologique qu'est la cavité buccale, l'oxygène est présent. [53]

Cette couche est composée d'oxydes de titane : le TiO, le TiO₂ et le Ti₂O₃. Elle contient majoritairement du dioxyde de titane (TiO₂) car c'est la forme la plus stable. Cette couche a une faible solubilité. Elle agit comme une couverture qui protège de la corrosion. Le titane possède donc une grande résistance à la corrosion, même dans le milieu buccal, grâce à la passivation. C'est pourquoi il est utilisé comme matériau de choix en implantologie. [3]

3.1.3.3 Ostéointégration

Le titane est un matériau qui possède des capacités d'ostéointégration. Cependant, celle-ci est lente [51]. Elle peut être largement améliorée par des substances bioactives qui vont promouvoir le développement osseux. La raison d'être de ces substances bioactives vient du fait que la liaison entre l'os et l'implant est une liaison physique. De ce fait, renforcer la liaison physique en additionnant la liaison chimique contribue à augmenter l'intégration de l'implant dans l'os. [22]

Afin de maximiser et d'augmenter les chances de liaison chimique plusieurs facteurs de croissance ont été testés. Le principal problème restant à résoudre provient du fait que la libération de ces substances bioactives n'est pas progressive, c'est-à-dire que la libération des substances se fait lors de l'implantation.

3.1.3.4 Fabrication

Le titane est un matériau qui permet des mises en forme différentes, des stries plus ou moins espacées, des têtes différentes. C'est pourquoi, il existe plusieurs types d'implants dentaires en fonction des différentes marques. [15]

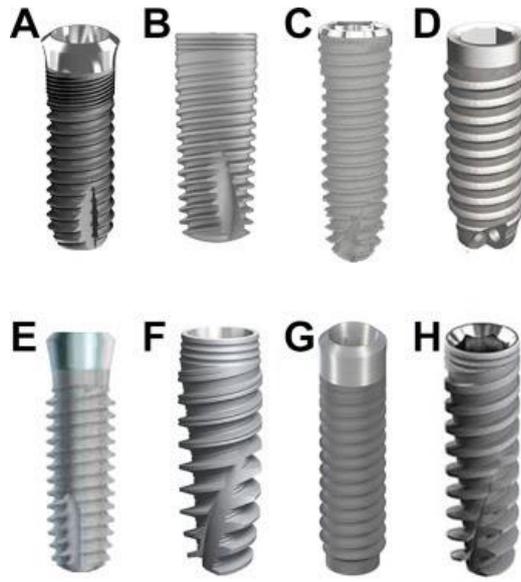


Figure 9 : image de différentes formes d'implants commercialisées

- A. ETK, implant Aesthetica™.
- B. MIS, implant C1™.
- C. TBR, implant Infinity™.
- D. Anthogyr, implant Axiom™.
- E. Zimmer, implant Swiss plus™.
- F. Nobel Biocare, implant Active™.
- G. Straumann, implant Standard plus™.
- H. ADIN, implant Touareg™. [25]

3.1.4 Inconvénients

3.1.4.1 Défaillances

Les implants en titane sont fréquemment utilisés de nos jours afin de combler l'espace vide laissé par une dent extraite. L'implant permet surtout d'apporter une solution fixe en bouche qui ne nécessite pas d'être enlevée par le patient.

Cependant, dans certains cas des échecs se produisent. Les principales causes de ces échecs sont :

- les infections,
- les surcharges occlusales,
- le tabagisme,
- le non respect des règles de base en implantologie,

- la mauvaise hygiène bucco-dentaire. [6,74,23]

Lorsque le lien entre l'implant et les structures adjacentes est insuffisant, il peut se produire un envahissement de la surface de l'implant par les micro-organismes. Cette invasion bactérienne contribue à l'inflammation locale liée à l'implant : c'est la péri-implantite. [26]

De plus, lorsque l'implant n'est pas mis en charge, l'os supportant l'implant n'est pas stimulé par la mastication. A terme il s'affaiblit, ce qui conduit à sa perte. De la même manière un os qui est sursollicité du fait du bruxisme ou alors du fait d'une mauvaise gestion des rapports occlusaux par le praticien, se détruit, et entraîne la perte de l'implant. [6]

Bien que le titane soit un matériau résistant bien à la corrosion, il peut être corrodé. En effet, les ions fluorures, se trouvant dans les substances contenant du fluor tels que les gels fluorés, attaquent la couche passive de l'implant en titane. Une fois cette couche endommagée le titane est plus sensible à la corrosion. Les produits issus de la corrosion de l'implant finissent par créer une inflammation locale et une péri-implantite. C'est pourquoi l'utilisation des gels fluorés en présence d'implant dentaire est déconseillée. [47]

Rappelons aussi que les implants les plus utilisés contiennent 0,05% de fer (§ 3.1.2.1).

3.1.4.2 Allergies

Comme expliqué dans le paragraphe présentant l'hypersensibilité, des allergies et des réactions immunitaires peuvent être provoquées par la présence d'implants en titane.

Les réactions observées sont :

- des lésions hyperplasiques des tissus mous,
- des érythèmes buccaux,
- un œdème dans la région orofaciale,
- des lésions eczémateuses. [23]

Dans ce cas, l'implant doit être retiré. Une solution alternative doit être proposée aux patients. C'est la raison pour laquelle de nouveaux matériaux destinés à l'implantologie émergent : le zircone, la céramique, le polyétheréthercétone, entre autres.

3.1.4.3 Esthétique

Un des inconvénients majeurs de l'utilisation du titane en implantologie concerne l'esthétique. La mise en place d'implants dans les secteurs antérieurs présente un risque esthétique. Ce risque est d'autant plus important lorsque le patient possède un parodonte de type fin. L'implant en titane étant de couleur grise, il peut donner un aspect cendré à la gencive fine : c'est la métallose, qui est le résultat de la libération des débris de corrosion dans les tissus environnants. [16,38]

Pour cet inconvénient, des solutions sont en train d'être étudiées. En effet, une étude concerne la coloration de la surface par anodisation. A un voltage utilisé correspond une couleur. Une étude réalisée *in vitro* a montré que l'oxydation avait encore des résultats inférieurs à l'autre alternative qu'est le zircone même si les colorations offrent un résultat esthétique satisfaisant. [71]

3.1.5 Modifications de surface

3.1.5.1 Les traitements mécaniques

3.1.5.1.1 L'usinage

L'usinage est la technique utilisée pour produire les implants. C'est l'implant obtenu avant toute modification de surface. Il a donc une surface dépourvue de rugosités, il est lisse.

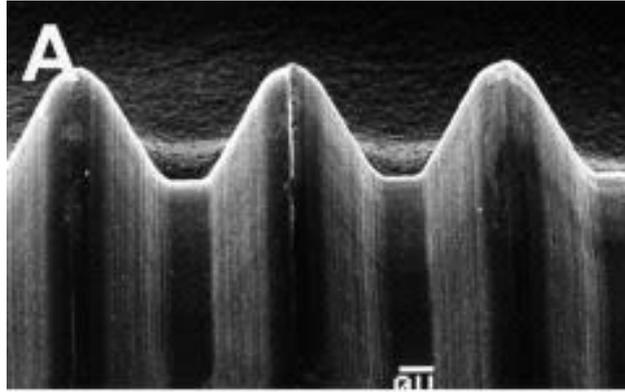


Figure 10 : image d'une surface implantaire usinée [25]

3.1.5.1.2 Le grenailage/sablage

Le grenailage, aussi nommé sablage, a pour but de sabler les surfaces de titane. Il est réalisé à l'aide de particules dures. Ces particules ont pour rôle d'abraser la surface du titane. Cette opération peut être effectuée avec des particules de céramique, d'alumine, de titane et d'hydroxyapatite. [56,66]

Le sablage augmente la surface extérieure de l'implant et donc les possibilités d'ostéo-intégration.

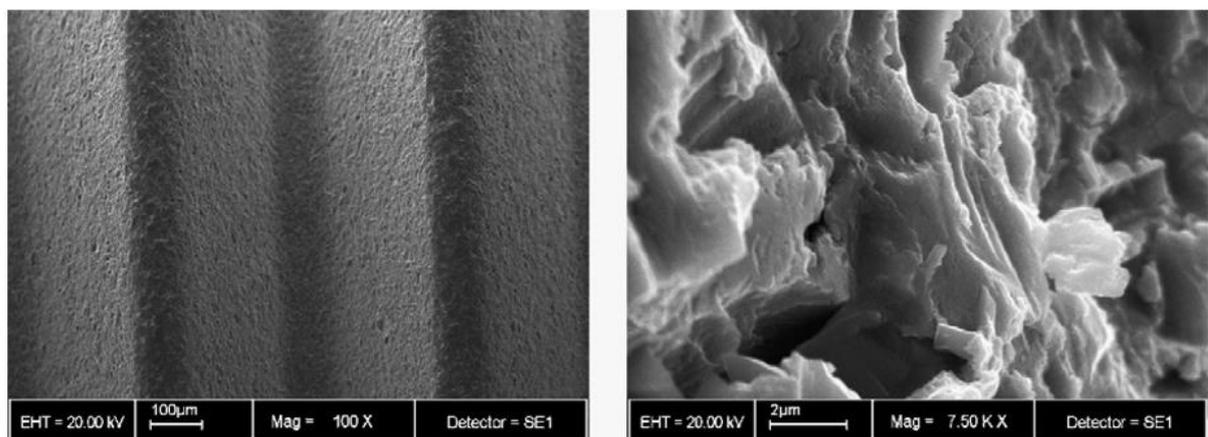


Figure 11 : image par microscopie électronique à balayage d'une surface de titane sablée à l'oxyde de titane [39]

Cette technique favorise une meilleure accroche de l'implant d'un point de vue mécanique et une bonne intégration osseuse primaire. [69]

3.1.5.2 Les traitements chimiques

3.1.5.2.1 Anodisation

L'anodisation consiste à oxyder de manière électrochimique les surfaces de titane à l'aide d'acides puissants. C'est une oxydation galvanostatique ou potentiostatique.

Différents acides peuvent être utilisés :

- l'acide sulfurique,
- l'acide phosphorique,
- l'acide nitrique,
- l'acide fluorhydrique.

Consécutivement à cette opération, il va se former sous forme d'anastase ou de nanotube de dioxyde de titane. Le résultat donne une couche poreuse uniforme.

Ce traitement permet d'améliorer l'ostéointégration en favorisant la rétention des caillots sanguins. [6,66]

3.1.5.2.2 Gravure à l'acide

La gravure à l'acide utilise les mêmes acides forts que la technique de l'anodisation. Néanmoins, la gravure à l'acide est une technique soustractive, c'est à dire qu'il n'y a pas de couche qui se forme en surface. L'acide utilisé va attaquer la surface de l'implant en titane. Il va se former des pores allant de 0,5 à 2 μm .

Une variante de cette technique utilise deux acides pour augmenter encore l'ostéointégration. Elle consiste à chauffer à 100°C un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide phosphorique. L'implant dentaire est immergé dans ce mélange pour obtenir la gravure. [66]

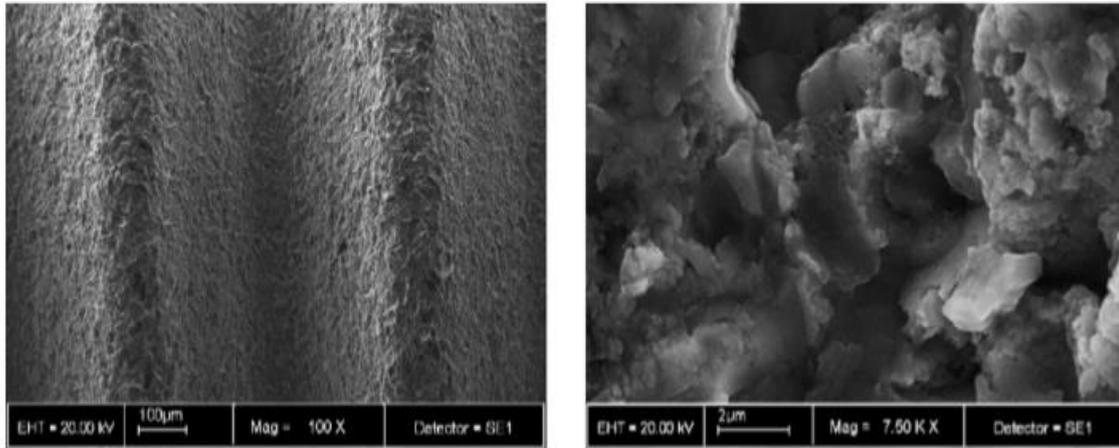


Figure 12 : image d'une surface implantaire gravée à l'acide fluorhydrique par microscopie électronique à balayage [39]

3.1.5.3 Les revêtements

3.1.5.3.1 Projection de plasma

La projection de plasma est une opération qui a lieu dans une torche de plasma à haute température. C'est à l'intérieur de cette torche que le titane sous forme de poudre est projeté sur la surface implantaire. Avec la température, les particules de poudre projetées se condensent et se fondent les unes aux autres. A la fin de l'opération, une couche uniforme mesurant entre 30 et 50 µm est obtenue. L'épaisseur contribue à l'uniformité de la couche. [56,66]

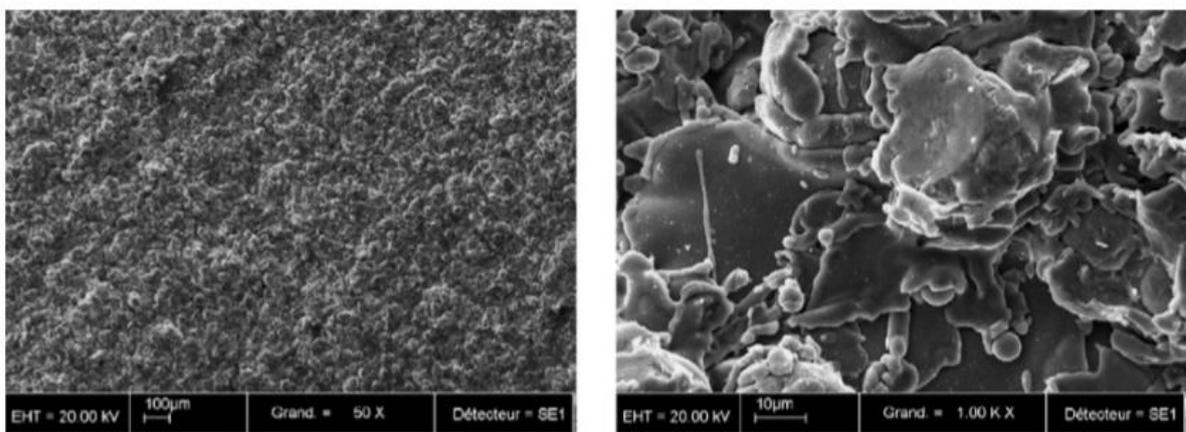


Figure 13 : image d'une surface implantaire modifiée par projection de plasma [39]

3.1.5.3.2 Revêtement de phosphate de calcium

Le revêtement de phosphate de calcium sur les surfaces de titane peut se réaliser de deux manières différentes.

La première méthode consiste en l'établissement d'un courant entre une cathode en titane et une anode en platine, le tout dans une solution acide de phosphate de calcium. Après un traitement hydrothermique, l'électrodéposition de phosphate de calcium sur la surface de titane est obtenue.

La deuxième méthode nécessite de traiter préalablement la surface de titane. Ensuite le titane est immergé dans un liquide corporel, à température et pH physiologique. Cette opération permet au phosphate de calcium de précipiter puis croître à la surface du titane. [39]

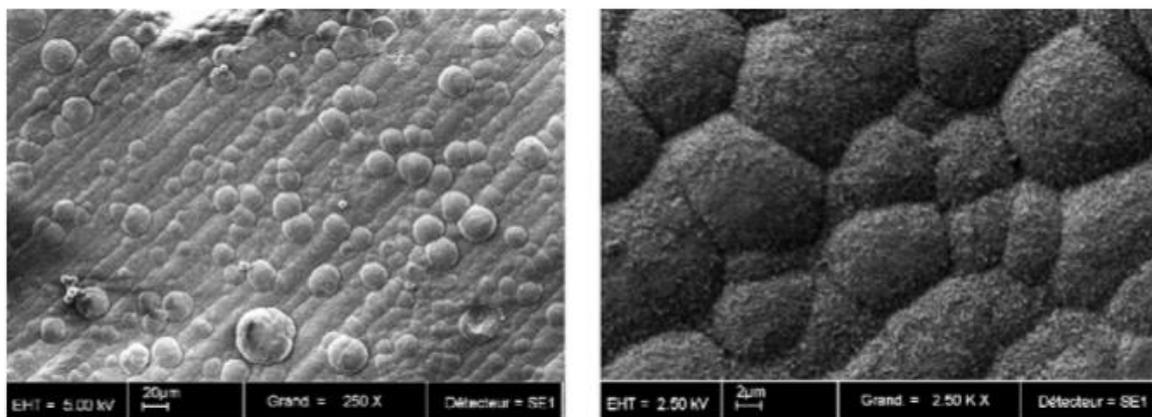


Figure 14 : image du revêtement du titane au phosphate de calcium par microscopie électronique à balayage [39]

3.1.5.4 Technique SLA

La technique SLA repose sur la succession de deux méthodes : le sablage et la gravure à l'acide. L'acronyme signifie « Sand blasted with Large grit and Acid etched ». Dans un premier temps la surface de l'implant est sablée avec des grains de gros diamètre. Ensuite l'implant est plongé dans un acide faible (l'acide chlorhydrique par exemple) puis dans un acide puissant. [6,56,66]

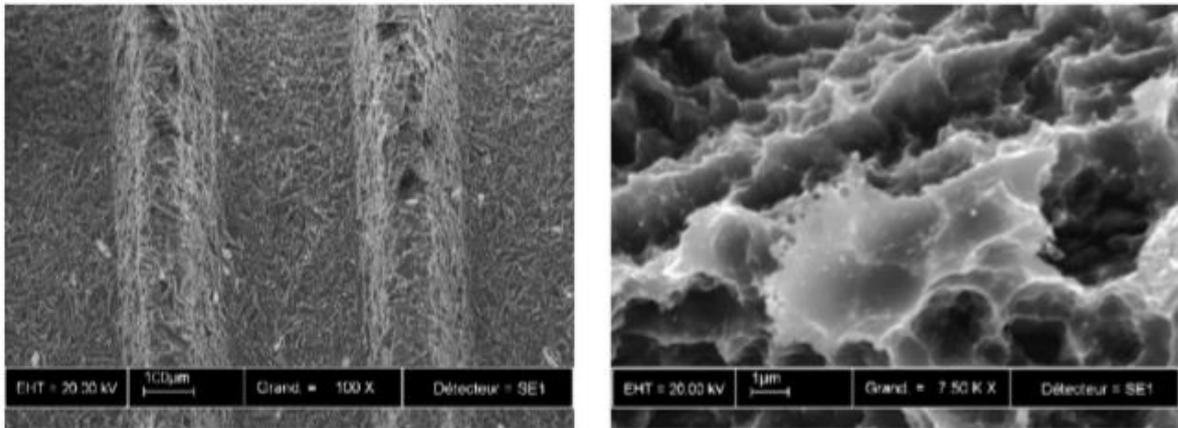


Figure 15 : image d'un implant à surface SLA au microscope électronique à balayage [39]

3.2 Chirurgie orale et maxillo-faciale

En chirurgie orale et maxillo-faciale, le titane trouve sa place dans la classe des matériaux d'ostéosynthèse. En effet les matériaux dont le but est de permettre une cicatrisation osseuse sont principalement à base de titane.

En cas de fractures osseuses au niveau des os maxillaires, trois traitements différents à base de titane sont possibles :

- les vis et mini-vis en titane,
- les plaques et mini-plaques de titane,
- les treillis de titane.

Les plaques et mini-plaques de titane permettent :

- d'éviter le blocage maxillo-mandibulaire,
- d'avoir une meilleure hygiène bucco-dentaire,
- le rétablissement de la dimension verticale du visage.

Cependant elles présentent des inconvénients :

- la sensibilité thermique,
- le desserrement des vis qui maintiennent les plaques.

Il est à noter que des vis relâchées durant la période de guérison conduisent au retrait des plaques de titane. [31]

Les treillis de titane sont indiqués pour l'ostéosynthèse dans de nombreux cas :

- les fractures comminutives,
- la reconstruction mandibulaire,
- l'augmentation de l'atrophie de la mandibule et du maxillaire,
- la chirurgie orthognathique.

Ils améliorent la guérison fonctionnelle grâce à leur nature semi-rigide et sont plus malléables. Ils ont de plus l'avantage de ne pas causer d'incapacité fonctionnelle et de morbidité aux patients. [31]

Le retrait des dispositifs en titane n'est pas systématique. Toutefois lorsque le dispositif reste en place plus d'un an, il est nécessaire de contrôler régulièrement. [65]

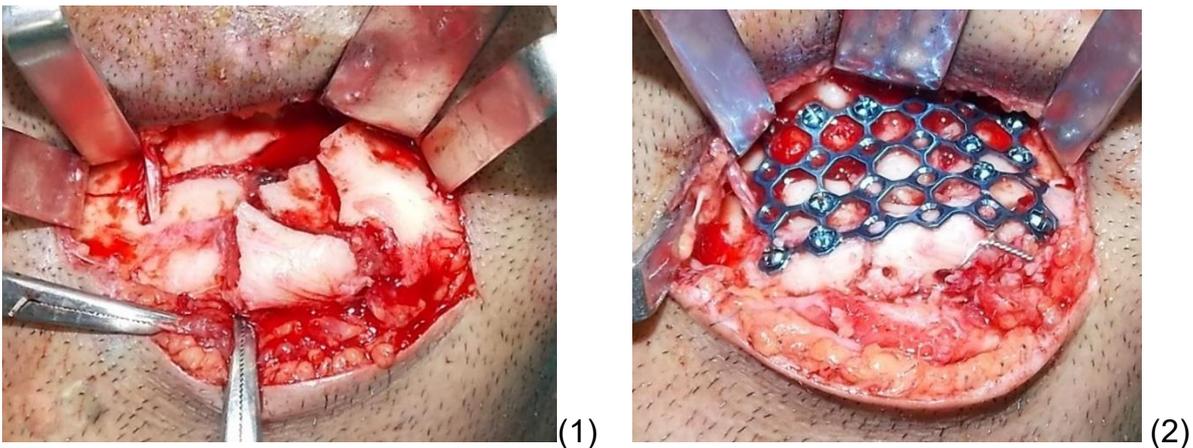


Figure 16 : photographie d'une fracture comminutive en préopératoire (1) en post-opératoire avec le treillis de titane (2) [31]

3.3 Prothèse

L'utilisation du titane en prothèse est beaucoup moins importante qu'en implantologie. Ceci est dû au fait qu'il existe déjà de nombreux matériaux disponibles plus facile à produire en ce qui concerne les réhabilitations prothétiques.

3.3.1 Prothèse fixée

En prothèse fixée, le titane n'est pas fréquemment utilisé. Pour la réalisation d'une couronne par exemple la technique de la cire perdue ne peut pas être appliquée. Les équipements nécessaires à la coulée du titane sont disponibles mais bien plus coûteux que le nécessaire à la coulée des métaux traditionnellement employés en prothèse.

Les alliages sont préférés au titane commercialement pur et principalement le Ti6Al4V. L'utilisation des alliages permet :

- d'éviter les réactions superflues avec le titane fondu,
- de compenser les réactions de retrait du titane.

Il existe plusieurs systèmes différents pour la coulée du titane :

- la coulée par pression sous vide avec deux chambres distinctes pour la coulée et la fusion,
- la coulée par pression sous vide avec une seule chambre pour la coulée et la fusion,
- la coulée par centrifugation. [26]

En raison de la réalisation plus complexe et plus coûteuse pour la coulée du titane, des alternatives ont été trouvées afin de fabriquer des armatures et des couronnes en titane.

Le titane utilisé pour les armatures est le titane de grade 2. Hormis la coulée, les armatures peuvent être constituées de cylindres préfabriqués ou de petits composants coulés, assemblés par soudure au moyen de laser. Avec les dernières technologies, l'utilisation de logiciels s'est développée.

L'utilisation de la conception et fabrication assistée par ordinateur est de plus en plus courante. Il en est de même pour la discipline de prothèse dentaire. Deux cas sont possibles.

Dans le premier cas, le prothésiste va monter le *wax-up*, c'est-à-dire un modèle en cire préfigurant l'armature. Puis le logiciel informatique va effectuer un balayage afin d'obtenir la modélisation en 3 dimensions du modèle en cire. S'en suit la fabrication

assistée par ordinateur qui va permettre l'usinage de l'armature au moyen d'un bloc de titane. Dans le second cas, toute la réalisation est effectuée au moyen d'un ordinateur, de la conception en trois dimensions de l'armature à la fabrication. [26]

3.3.2 Prothèse amovible

En prothèse amovible, le titane est utilisé pour les stellites et les crochets. Le titane étant un matériau flexible, il est avantageux à utiliser pour les crochets de rétention des prothèses amovibles partielles. Le rôle du crochet sur la prothèse est de permettre la rétention. Cette dernière n'est possible que si le crochet se termine au niveau d'une contre-dépouille. Plus la portion de crochet sous la contre-dépouille sera grande plus la rétention de la prothèse sera importante. Avec les crochets métalliques, seul le tiers externe du crochet est sous la ligne de plus grand contour. Avec les crochets en titane, la portion sous la ligne de plus grand contour peut être plus importante [22]. Le titane est aussi un matériau léger. Pour le stellite, c'est un avantage. L'inconvénient majeur du titane était l'adhésion entre le titane et les résines acryliques [48]. C'est pourquoi divers procédés ont été mis au point pour pallier ce problème. Parmi ces procédés il y a :

- le revêtement de silice,
- le laser,
- la gravure électrochimique,
- la gravure chimique,
- l'érosion par étincelles,
- le sablage,
- l'application de primer métalliques. [37]

D'autres inconvénients sont mis en évidence : l'usure du titane, la déformation des crochets, la décoloration du titane, l'accumulation de plaque dentaire à la surface.

3.4 Dentisterie restauratrice endodontie

3.4.1 Dentisterie restauratrice

Des études ont montré que le fait d'ajouter des nanoparticules de dioxyde de titane dans les composites dentaires permettrait d'améliorer les propriétés mécaniques notamment : le module d'élasticité, la micro-dureté, la résistance à la flexion [27,58]. De plus, l'ajout de ces nanoparticules de titane n'altère pas les capacités de liaison avec la dentine et l'émail du composite.

Le composite ainsi modifié aurait la capacité de réduire les déminéralisations de l'émail ainsi que la survenue de caries récurrentes.

Les ciments verres ionomères (CVI) sont des matériaux servant habituellement pour les reconstitutions dentaires. Ils ont pour principal avantage de libérer des ions fluorures qui vont permettre la reminéralisation des tissus dentaires.

L'incorporation de 3% et de 5% dioxyde de titane dans la composition des CVI a montré une amélioration de plusieurs propriétés :

- la résistance à la compression,
- la dureté,
- la résistance à la flexion,
- la résistance à la fracture,
- l'activité antibactérienne. [19]

Le dioxyde de titane trouve aussi une application dans le domaine de l'esthétique dentaire. En effet, ses capacités de photocatalyseur sont utilisées dans les techniques d'éclaircissement dentaire par lumière visible. [34]

3.4.2 Endodontie

En endodontie, le titane est utilisé pour la fabrication des instruments qui ont pour but de travailler les canaux. Avant l'utilisation du titane, les instruments étaient majoritairement en acier. Le titane est allié au nickel dans les instruments : cet alliage est appelé nitinol (nickel-titane). Le nitinol a de nombreuses propriétés avantageuses. Parmi lesquelles : l'élasticité et la mémoire de forme. [22]

En ce qui concerne l'élasticité, cette propriété est utile aux limes de cathétérisme et d'élargissement, que ce soit pour une instrumentation manuelle ou mécanique des canaux. L'élasticité va permettre à la lime de passer les courbures plus facilement sans pour autant créer de fausse route ou de butée dans la lumière canalaire. Cela permet aussi d'éviter la casse d'instrument consécutive à l'application d'une contrainte trop importante.

Les propriétés de cet alliage proviennent de la forme cristalline qui peut changer en fonction de la pression et de la température.

L'agrégat de trioxyde minéral (MTA) est un matériau largement utilisé en endodontie. Il trouve son intérêt dans l'apexification des dents immatures, le comblement des perforations, les chirurgies apicales, les apexogénèses. Au regard de ces différentes utilisations, divers composants ont été ajoutés afin d'améliorer ses propriétés. Parmi ces composants testés : le dioxyde de titane.

Tableau 2 : tableau de comparatif des caractéristiques du MTA sans et avec ajout de TiO₂ [58]

Material	Setting time (h)	Working time (h)	Compressive strength (MPa)	Push-out bond strength (MPa)
MTA	4± 1.4	5±1.8	44.27±9.16	17.86±2.96
MTA+TiO ₂	6± 0.9	8±3.4	101.56±11.63	30.63±3.52

Ce tableau montre que l'ajout de dioxyde de titane dans le MTA a amélioré la résistance à la compression et à l'arrachement. Cependant il a augmenté le temps de travail et le temps de prise. Ce qui reste un inconvénient majeur dans le cadre de l'application clinique. D'autres études doivent être menées avant une éventuelle application clinique. [58]

3.5 Parodontologie

Le titane en implantologie trouve son utilisation dans la régénération osseuse guidée. [60]

L'utilisation d'une membrane en parodontologie doit répondre à quelques critères principaux :

- le maintien de l'espace tridimensionnel,
- la résistance aux forces masticatoires,
- la biocompatibilité,
- une bonne intégration tissulaire,
- une facilité d'application.

Plusieurs formes de matériaux à base de titane pour ces applications existent dont :

- les mailles,
- les coiffes hémisphériques,
- des membranes en forme de dôme.

Les mailles de titane ont de bonnes propriétés mécaniques. Elles sont assez rigides, plastiques, élastiques et stables. Ces quatre propriétés permettent à la membrane de maintenir l'espace sans compresser les tissus mous, tout en gardant le greffon à l'intérieur du défaut osseux. Toutefois, le problème posé par la rigidité de la membrane, est l'irritation des tissus mous pouvant conduire à une exposition de la membrane. Cet inconvénient dépend de l'épaisseur de la membrane.

Une autre propriété caractéristique des mailles de titane est leur macro-porosité. Cette porosité permettrait de laisser passer les nutriments à travers la membrane. Toutefois, les membranes de titane ne sont pas résorbables et cette porosité la rend difficile à extraire à la fin du traitement. [55]

Ces avantages en font un matériau prometteur pour son utilisation lors des chirurgies parodontales.

3.6 Orthodontie

Le titane est utilisé en orthodontie toujours sous la forme de nitinol, cet alliage composé de nickel et de titane. Son avantage en orthodontie vient principalement de sa capacité de mémoire de forme. Le praticien peut ainsi donner la forme qu'il souhaite à son arc, puis fixer l'arc aux verrous («brackets»). L'arc a mémorisé la forme et va faire tout faire pour retrouver sa forme initiale. Cela va exercer des contraintes sur les dents par l'intermédiaire des «brackets». Les contraintes sont à la fois fortes pour permettre le mouvement et pas trop importantes afin d'éviter les résorptions dentaires. [22]

En ce qui concerne le collage des «brackets», il est connu que l'appareillage multi-attache a tendance à être rétenteur de plaque et donc cariogène. Le potentiel cariogène est amplifié par la présence de l'adhésif et du composite tout deux utilisés pour coller les «brackets». Cette constatation a mené à l'idée de mettre en place des matériaux qui pourrait aider à réduire les effets secondaires au traitement orthodontique.

L'adhésif Transbond XT ® contient des nanoparticules de dioxyde de titane. Etant donné ses propriétés carioprotectrices, il pourrait être utilisé en tant qu'adhésif pour le collage des «brackets». [27]

Les minivis utiles au traitement orthodontique peuvent être en titane, elles sont également appelées dispositif d'ancrage temporaire. Les minivis de titane ont pour inconvénient de se desserrer, se casser. Les avantages de ces dernières sont :

- un bon contrôle de l'ancrage,
- une chirurgie plus facile,
- une manipulation plus simple,
- un retrait aisé,
- une flexibilité dans le choix de l'emplacement,
- des coûts médicaux réduits. [73]

Elles sont utilisées dans de nombreux cas :

- les déformations orofaciales,
- la gestion de l'espace,
- l'intrusion,
- l'extrusion,
- la rétraction des dents antérieures,
- la correction de l'occlusion croisée. [59]

3.7 Prophylaxie

En prophylaxie, les nanoparticules de dioxyde de titane sont utilisées à des fins esthétiques, notamment pour le dentifrice [32].

Les vernis fluorés ont montré leur capacité à protéger les dents de la déminéralisation. Des études ont été menées afin de savoir si l'ajout de titane dans les vernis fluorés pouvait jouer un rôle positif. Le tétrafluorure de titane contenu dans les vernis fluorés forme un film protecteur capable de résister aux attaques acides et qui pourrait aussi servir de réservoir pour les ions fluor. Il permet donc de réduire la déminéralisation de surface et de subsurface *in vivo* et *in situ*. [2,1]

3.8 Instrumentation dentaire

Le nitrure de titane est utilisé en tant que revêtement. Les instruments chirurgicaux en acier inoxydable ont pour inconvénient la contamination métallique. C'est le cas des biopsies par exemple.

Ce revêtement est très résistant à l'usure, à la corrosion et confère à l'instrument la couleur dorée.

Le nitrure de titane ainsi que l'oxyde de titane sont des barrières possibles contre la libération d'ions métallique. [64,76]

Il existe des curettes en titane et des inserts ultrasoniques avec des pointes en titane par exemple. [7,63]

Ce qu'il faut retenir :

Le titane trouve une place non négligeable dans les différentes disciplines dentaires, que ce soit pur ou en alliage. Ses principales qualités nécessaires à l'odontologie sont la flexibilité et la résistance à la corrosion.

Le dioxyde de titane est présent dans les composites dentaires, les CVI et dans la couche de passivation à la surface implantaire. C'est cette présence qui peut porter à questionnement.

4 Conclusion

Le titane est un matériau dont l'utilisation étendue n'est plus à démontrer

Cependant, il est utilisé en odontologie depuis une cinquantaine d'années seulement, mais beaucoup plus depuis moins longtemps. De ce fait les études à court terme n'ont pas permis de mettre en évidence une toxicité non acceptable à son utilisation. Le dioxyde de titane est peu rejeté, par l'organisme, ce qui amène à penser qu'il pourrait peut-être s'accumuler dans l'organisme. Est-ce que le dioxyde de titane devient toxique pour l'organisme une fois qu'une quantité seuil est atteinte ? Actuellement, il n'y a pas encore de preuve permettant de répondre à ce questionnement.

Etant donné le peu de recul, son utilisation nécessite une vigilance sanitaire.

Tout professionnel de santé et donc le chirurgien-dentiste est tenu au devoir de pharmacovigilance.

Bibliographie

1. Alexandria AK, Nassur C, Nóbrega CBC, Branco-de-Almeida LS, dos Santos KRN, Vieira AR, et al. Effect of TiF 4 varnish on microbiological changes and caries prevention: in situ and in vivo models. *Clin Oral Investig*. 2019; 23(6):2583-2591
2. Alexandria AK, Nassur C, Nóbrega CBC, Valença AMG, Rosalen PL, Maia LC. In situ effect of titanium tetrafluoride varnish on enamel demineralization. *Braz Oral Res*. 2017;31:86
3. Ananth H, Kundapur V, Mohammed HS, Anand M, Amarnath GS, Mankar S. A review on biomaterials in dental implantology. *International Journal of Biomedical Science*. 2015;11(3):113-20
4. ANSES. Avis de l'Anses Saisine n° 2019-SA-0036 [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2019SA0036.pdf>
5. Araci K, Mangabhai D, Akhtar K. Production of titanium by the Armstrong Process®. In: *Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. 2015:149-162
6. Asensio G, Vázquez-Lasa B, Rojo L. Achievements in the Topographic Design of Commercial Titanium Dental Implants: Towards Anti-Peri-Implantitis Surfaces. *J Clin Med*. 2019;8(11):1982
7. Aspriello SD, Piemontese M, Levrini L, Sauro S. Ultramorphology of the root surface subsequent to hand-ultrasonic simultaneous instrumentation during non-surgical periodontal treatments. An in vitro study. *J Appl Oral Sci*. 2011;19(1):74-81
8. Blanchart P. Dioxyde de titane Propriétés et applications. Editions T.I.; 10 2019; [Consulté le 14 Avril 2020]. Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/ceramiques-42578210/dioxyde-de-titane-n4813/>
9. Block MS. Dental Implants: The Last 100 Years. *J Oral Maxillofac Surg*. 2018. 2018;76(1):11-26
10. Chellappa M, Anjaneyulu U, Manivasagam G, Vijayalakshmi U. Preparation and evaluation of the cytotoxic nature of TiO₂ nanoparticles by direct contact method. *Int J Nanomedicine*. 2015;10 Suppl 1:31-41
11. Chen G, Fray D, Farthing T. The kroll. *Nature*. 2000;407(6802):361-4
12. Combres Y. Métallurgie et recyclage du titane et de ses alliages. *Tech Ing*

- Métallurgie Extr [Internet]. Editions T.I.; 2016;[Consulté le 15 Mars 2020]
Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/elaboration-et-recyclage-des-metaux-de-transition-42649210/metallurgie-et-recyclage-du-titane-et-de-ses-alliages-m2355/>
13. Commission Européenne. Réponse donnée par M. Andriukaitis au nom de la Commission Européenne. 2019 [Internet] [Consulté le 19 Février 2020]. Disponible sur: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-9-2019-003009-ASW_FR.html
 14. Cordeiro JM, Barão VAR. Is there scientific evidence favoring the substitution of commercially pure titanium with titanium alloys for the manufacture of dental implants? *Mater Sci Eng C*. 2017;71:1201-15
 15. Duraccio D, Mussano F, Faga MG. Biomaterials for dental implants: current and future trends. *Journal of Materials Science*. 2015;50:4779–4812
 16. Dux KE. Implantable Materials Update. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*. 2019;36(4):535-542
 17. Fang Q, Shi Q, Guo Y, Hua J, Wang X, Zhou B. Enhanced Bioconcentration of Bisphenol A in the Presence of Nano-TiO₂ Can Lead to Adverse Reproductive Outcomes in Zebrafish. *Environ Sci Technol*. 2016 19;50(2):1005-1013
 18. Fenn AJ, Cooley G, Fray D, Smith L. Exploiting the FFC Cambridge process. *Adv Mater Process*. 2004 Feb.
 19. Garcia-Contreras R, Scougall-Vilchis RJ, Contreras-Bulnes R, Sakagami H, Morales-Luckie RA, Nakajima H. Mechanical, antibacterial and bond strength properties of nano-titanium-enriched glass ionomer cement. *J Appl Oral Sci*. 2015;23(3):321-8
 20. Gaviria L, Salcido JP, Guda T, Ong JL. Current trends in dental implants. *J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg*. 2014;40(2):50–60
 21. Gázquez MJ, Bolívar JP, Garcia-Tenorio R, Vaca F. A Review of the Production Cycle of Titanium Dioxide Pigment. *Mater Sci Appl*. 2014;5(7):18
 22. Gosavi S, Gosavi S, Alla R. Titanium: A miracle metal in dentistry. *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*. 2013;27(1):42-46
 23. Goutam M, Giriya pura C, Mishra S, Gupta S. Titanium allergy: A literature review. *Indian Journal of Dermatology*. 2014;59(6):630
 24. Guidoin MF, Guidoin RG. Materials selection for the design and development of

- the housing for a totally implantable artificial heart: Superiority of titanium and its alloys. *ITBM-RBM*. 2004;25(3):126-138
25. Guillaume B. Les implants dentaires : revue. *Morphologie*. 2016;100(331):189-198
 26. Hanawa T. Titanium-tissue interface reaction and its control with surface treatment. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019;7:170.
 27. Heravi F, Ramezani M, Poosti M, Hosseini M, Shajiei A, Ahrari F. In Vitro Cytotoxicity Assessment of an Orthodontic Composite Containing Titanium-dioxide Nano-particles. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects*. 2013;7(4):192-8
 28. Hong F, Wang Y, Zhou Y, Zhang Q, Ge Y, Chen M, et al. Exposure to TiO₂ Nanoparticles Induces Immunological Dysfunction in Mouse Testitis. *J Agric Food Chem*. 2016;64(1):346-355
 29. Jorge JRP, Barão VA, Delben JA, Faverani LP, Queiroz TP, Assunção WG. Titanium in Dentistry: Historical development, state of the art and future perspectives. *Journal of Indian Prosthodontist Society*. 2013;13(2):71-7
 30. Journal officiel de la commission européenne. Recommandation de la commission du 18 Octobre 2011 relative à la définition des nanomatériaux. 2018;[Internet] [Consulté le 10 Mars 2020] Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-FR/TXT/?uri=CELEX:32011H0696&from=FR>
 31. Kaur N, Kaur T, Kaur J, Kaur Y, Kapila S, Sandhu A. Efficacy of Titanium Mesh Osteosynthesis in Maxillofacial Fractures. *J Maxillofac Oral Surg*. 2018;17(4):417-424
 32. Kim DH, Kundu J, Chae IG, Lee JK, Heo JS, Chun KS. Titanium dioxide nanoparticles induce COX-2 expression through ROS generation in human periodontal ligament cells. *J Toxicol Sci*. 2019;44(5):335-345
 33. Kim KT, Eo MY, Nguyen TTH, Kim SM. General review of titanium toxicity. *Int J Implant Dent*. 2018;17(4):417-424
 34. Kishi A, Otsuki M, Sadr A, Ikeda M, Tagami J. Effect of light units on tooth bleaching with visible-light activating titanium dioxide photocatalyst. *Dent Mater J*. 2011;30(5):723-9.
 35. Koizumi H, Ishii T, Okazaki T, Kaketani M, Matsumura H, Yoneyama T. Castability and mechanical properties of Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy in dental casting. *J Oral Sci*. 2018;60(2):285-292
 36. Kong H, Wu F, Jiang X, Wang T, Hu M, Chen J, et al. Nano-TiO₂ impairs

- digestive enzyme activities of marine mussels under ocean acidification. *Chemosphere*. 2019;237:124561
37. Korkmaz FM, Aycan S. Effect of fiber laser irradiation on the shear bond strength between acrylic resin and titanium. *Scanning*. 2019;2019:1-11
 38. Kubasiewicz-Ross P, Dominiak M, Gedrange T, Botzenhart UU. Zirconium: The material of the future in modern implantology. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. 2017;26(3):533-537
 39. Le Guéhennec L, Soueidan A, Layrolle P, Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental Materials*. 2007;23(7); 844-54
 40. Le puit des sciences. Tableau périodique des éléments [Internet] [Consulté le 19 Février 2020]. Disponible sur: <http://lepuitdesciences-com.over-blog.com/2015/04/le-tableau-periodique-des-elements-chimiques.html>
 41. Les Echos, Investir [Internet] [Consulté le 19 Février 2020]. Disponible sur: <https://investir.lesechos.fr/cours/matiere-premiere-titane-metal,wmpcb,tit,tit,opid.html>
 42. Les Echos. Investir [Internet] [Consulté le 19 Février 2020]. Disponible sur: <https://investir.lesechos.fr/cours/matiere-premiere-titane-9960pc,wmpcb,tit,tit,opid.html>
 43. López-Huerta F, Cervantes B, González O, Hernández-Torres J, García-González L, Vega R, et al. Biocompatibility and surface properties of TiO₂ thin films deposited by DC magnetron sputtering. *Materials (Basel)*. 2014;7(6):4105-4117
 44. Ma M, Wang D, Wang W, Hu X, Jin X, Chen GZ. Extraction of titanium from different titania precursors by the FFC Cambridge process. *J Alloys Compd*. 2006;420(1-2):37-45
 45. Ministère de la Transition écologique. Le dioxyde de titane en 10 points. Ministère de la transition écologique et solidaire [Internet]. 2018. Disponible sur: https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Dioxyde de Titane en 10 points_0.pdf
 46. Ministère de l'économie. Dioxyde de titane : l'additif E171 sera interdit dans les denrées alimentaires à partir du 1er janvier 2020 [Internet]. 2019. Disponible sur: https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/dgccrf/presse/communiqu/2019/CP-Dioxyde-titane-E171.pdf

47. Noubissi S, Scarano A, Gupta S. A literature review study on atomic ions dissolution of titanium and its alloys in implant dentistry. *Materials (Basel)*. 2019;12(3):368
48. Ohkubo C, Sato Y, Nishiyama Y, Suzuki Y. Titanium removable denture based on a one-metal rehabilitation concept. *Dental Materials Journal*. 2017;36(5):517-523
49. Okabe TH, Waseda Y. Producing titanium through an electronically mediated reaction. *JOM*. 1997;49:28-32
50. Oosthuizen SJ. Titanium: the innovators' metal - Historical case studies tracing titanium process and product innovation. *J South African Inst Min Metall*. 2011;111(11)
51. Park IS, Yang EJ, Bae TS. Effect of cyclic precalcification of nanotubular TiO₂ layer on the bioactivity of titanium implant. *Biomed Res Int*. 2013;2013:293627
52. Polesel F, Farkas J, Kjos M, Almeida Carvalho P, Flores-Alsina X, Gernaey K V., et al. Occurrence, characterisation and fate of (nano)particulate Ti and Ag in two Norwegian wastewater treatment plants. *Water Res*. 2018;141:19-31
53. Přikrylová J, Procházková J, Podzimek Š. Side Effects of Dental Metal Implants: Impact on Human Health (Metal as a Risk Factor of Implantologic Treatment). *BioMed Research International*. 2019;2019:2519205
54. Qu Q, Wang L, Chen Y, Li L, He Y, Ding Z. Corrosion behavior of titanium in artificial saliva by lactic acid. *Materials (Basel)*. 2014;7(8): 5528–5542
55. Rakhmatia YD, Ayukawa Y, Furuhashi A, Koyano K. Current barrier membranes: Titanium mesh and other membranes for guided bone regeneration in dental applications. *Journal of Prosthodontic Research*. 2013;57(1):3-14
56. Richard C. Implants dentaires : corrosion et traitements de surface. *Tech l'ingénieur*. 2017; [Consulté le 10 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/corrosion-et-vieillessement-cas-industriels-42372210/implants-dentaires-corrosion-et-traitements-de-surface-cor145/>
57. Saghiri MA, Asatourian A, Garcia-Godoy F, Sheibani N. The role of angiogenesis in implant dentistry part I: Review of titanium alloys, surface characteristics and treatments. *Medicina Oral Patologia Oral y Cirugia Bucal*. 2016;21(4):514-525

58. Samiei M, Janani M, Asl-Aminabadi N, Ghasemi N, Divband B, Shirazi S, et al. Effect of the TiO₂ nanoparticles on the selected physical properties of mineral trioxide aggregate. *J Clin Exp Dent*. 2017;9(2):191-195
59. Scribante A, Montasser MA, Radwan ES, Bernardinelli L, Alcozer R, Gandini P, et al. Reliability of orthodontic miniscrews: Bending and maximum load of different Ti-6Al-4V titanium and stainless steel Temporary Anchorage Devices (TADs). *Materials (Basel)*. 2018;11(7):226-229
60. Seiler M, Kämmerer PW, Peetz M, Hartmann AG. Customized titanium lattice structure in three-dimensional alveolar defect: An initial case letter. *J Oral Implantol*. 2018;44(3):219-224
61. Shi H, Magaye R, Castranova V, Zhao J. Titanium dioxide nanoparticles: A review of current toxicological data. *Particle and Fibre Toxicology*. 2013;10:15
62. Shuai C, Shuai C, Feng P, Gao C, Peng S, Yang Y. Antibacterial capability, physicochemical properties, and biocompatibility of nTiO₂ incorporated polymeric scaffolds. *Polymers (Basel)*. 2018;10(3):328
63. Sisera M, Hofer DJ, Sener B, Attin T, Schmidlin PR. In vitro evaluation of three curettes with edge retention technology after extended use. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*. 2009;119(12):1200-8
64. Steele JG, McCabe JF, Barnes IE. Properties of a titanium nitride coating for dental instruments. *J Dent*. 1991;19(4):226-229
65. Sukegawa S, Masui M, Sukegawa-Takahashi Y, Nakano K, Takabatake K, Kawai H, et al. Maxillofacial Trauma Surgery Patients With Titanium Osteosynthesis Miniplates. *J Craniofac Surg*. 2020;31(5):1338-1342
66. Suzuki K, Takano T, Takemoto S, Ueda T, Yoshinari M, Sakurai K. Influence of grade and surface topography of commercially pure titanium on fatigue properties. *Dent Mater J*. 2018;37(2):308-316
67. Vijayaraj V, Liné C, Cadarsi S, Salvagnac C, Baqué D, Elger A, et al. Transfer and Ecotoxicity of Titanium Dioxide Nanoparticles in Terrestrial and Aquatic Ecosystems: A Microcosm Study. *Environ Sci Technol*. 2018;52(21):12757-12764
68. Vimbela G V., Ngo SM, Frazee C, Yang L, Stout DA. Antibacterial properties and toxicity from metallic nanomaterials. *International Journal of Nanomedicine*. 2017;12: 3941-3965
69. Wang G, Wan Y, Liu Z. Construction of complex structures containing micro-

- pits and nano-pits on the surface of titanium for cytocompatibility improvement. *Materials (Basel)*. 2019;12(17):2820
70. Wang J, Wang L, Fan Y. Adverse biological effect of TiO₂ and hydroxyapatite nanoparticles used in bone repair and replacement. *International Journal of Molecular Sciences*. 2016;17(6):798
 71. Wang T, Wang L, Lu Q, Fan Z. Changes in the esthetic, physical, and biological properties of a titanium alloy abutment treated by anodic oxidation. *J Prosthet Dent*. 2019;121(1):156-165
 72. Winkler HC, Notter T, Meyer U, Naegeli H. Critical review of the safety assessment of titanium dioxide additives in food. *Journal of Nanobiotechnology*. 2018;16(1):51
 73. Wu J, Bai YX, Wang BK. Biomechanical and histomorphometric characterizations of osseointegration during mini-screw healing in rabbit tibiae. *Angle Orthod*. 2009;79(3):558-563
 74. Yang J, Shao SY, Chen WQ, Chen C, Zhang SM, Qiu J. Cigarette Smoke Extract Exposure: Effects on the Interactions between Titanium Surface and Osteoblasts. *Biomed Res Int*. 2019;2019:8759568
 75. Yeo MK, Nam DH. Influence of different types of nanomaterials on their bioaccumulation in a paddy microcosm: A comparison of TiO₂ nanoparticles and nanotubes. *Environ Pollut*. 2013;178:166-172
 76. Zorn G, Migonney V, Castner DG. Grafting titanium nitride surfaces with sodium styrene sulfonate thin films. *Biointerphases*. 2014;9(3):031001

Titre de la thèse en français : Dioxyde de titane et titane en odontologie : état actuel des connaissances

BILE BOOTO LONGOLO Maëlys.- p. (65) : ill. (18) ; réf. (76).

Domaines : Matériaux

Mots clés Rameau: titane, dioxyde de titane, titane-alliage, odontostomatologie

Mots clés FMeSH: titane, odontologie, revue de littérature

Résumé de la thèse :

Le titane et le dioxyde de titane sont des éléments utilisés dans de nombreux domaines dans le quotidien, aussi bien en matière de santé, d'alimentation que dans les industries aéronautiques et cosmétiques.

Le dioxyde de titane est utilisé sous forme de poudre principalement dans l'alimentation et les cosmétiques. En odontologie, ses propriétés antibactériennes sont mises à profit dans les matériaux de reconstitution dentaire.

La particularité du titane est sa résistance à la corrosion. Sa résistance à la corrosion est permise par la création d'une couche de passivation à base de dioxyde de titane.

En conclusion, le titane et le dioxyde de titane voient leur utilisation s'étendre de plus en plus, que ce soit en odontologie ou de manière générale.

JURY :

Président : **Professeur Etienne DEVEAUX**

Asseseurs : **Docteur Laurent NAWROCKI**

Docteur Xavier COUTEL

Docteur Bernice LOVI