



**HAL**  
open science

## Alternatives au cobalt en prothèse amovible

Gautier Copeau

► **To cite this version:**

Gautier Copeau. Alternatives au cobalt en prothèse amovible. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. <dumas-04661987>

**HAL Id: dumas-04661987**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04661987v1>**

Submitted on 25 Jul 2024

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.



HAL Authorization

**UNIVERSITE de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE**  
**UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE**  
**D'ODONTOLOGIE**

Année : 2024

N°

**THESE**

en vue de l'Obtention du

**DIPLOME D'ETAT**

de

**DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Par

**M.COPEAU Gautier**

Né(e) le : 03/05/1994

Alternatives au cobalt en prothèse amovible

Présentée et soutenue publiquement le : 14.05.2024

**JURY**

**Président(e)** : Monsieur le professeur MILLET Pierre

**Assesseurs** : Madame le docteur MAILLET Christina

Madame le docteur JOURDAIN Marie Laure

Monsieur le docteur DRIAU Jean-Paul

**UNIVERSITE DE REIMS**

**CHAMPAGNE-ARDENNE**

**PRESIDENT DE L'UNIVERSITE**

Monsieur Christophe CLÉMENT

**1<sup>ER</sup> VICE-PRESIDENT**

Monsieur Vincent VUIBLET

**VICE-PRESIDENT (C.A.)**

Madame Dominique ROUX

**VICES-PRESIDENTS (C.A.C)**

**VICE-PRESIDENT (C.F.V.U.)**

Madame Emmanuelle LECLERCQ

**DIRECTEUR GENERAL DES SERVICES**

Madame Laure CASTIN

**UNIVERSITE DE REIMS**

**UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE**

**D'ODONTOLOGIE**

**DIRECTEUR**

Monsieur Pierre MILLET

**DIRECTEUR-ADJOINT**

Monsieur Julien BRAUX

**DIRECTRICE-ADJOINTE**

Madame Marie-Paule GELLÉ

**DIRECTRICE-ADJOINTE**

Madame Marie-Laure JOURDAIN

**CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS**

Madame Sylvie GILLET

**CONSERVATEUR**

Madame Emmanuelle KREMER

# **CORPS PROFESSORAL DE**

## **L'U.F.R. D'ODONTOLOGIE DE REIMS**

### **Sous-Section (56.01) ODONTOLOGIE PÉDIATRIQUE ET ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE**

#### **\* Département Odontologie pédiatrique**

##### **Chef de département : Professeur M.P. GELLÉ**

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Assistante Universitaire Associée

**M.P. GELLÉ**  
**I. LOPEZ**  
**F. SIU PAREDES**  
**T. CLEMENT**  
**C. GUIDEZ**  
**A. DUPONT**

#### **\* Département Orthopédie dento-faciale**

##### **Chef de département : Docteur A. MAILLOUX**

Maître de Conférences des Universités Associé - Praticien Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Attaché d'enseignement  
Attachée d'enseignement  
Attachée d'enseignement  
Attachée d'enseignement

**L. BAILLEUL**  
**M. TERRACINA**  
**A.M. AAJAJI**  
**M. ANDRE**  
**A. MAILLOUX**  
**S. SAMAIN MATTEI**

### **Sous-Section (56.02) PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ, ODONTOLOGIE LÉGALE**

#### **\* Département prévention, épidémiologie, économie de la santé, odontologie légale**

##### **Chef de département : Docteur S. MOUSSA BADRAN**

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Attaché d'enseignement  
Attaché d'enseignement

**S. MOUSSA-BADRAN**  
**J. BAILLY**  
**J. CAMIAT**  
**R. COFFINET**  
**F. SARRAJ**

### **Sous-Section (57.01) CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE**

#### **\* Département Chirurgie orale**

##### **Chef de département : Docteur S. LAURENCE**

Professeur des Universités Emérite

**B. LEFEVRE**

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Attaché d'enseignement  
**MENARD**  
Attachée d'enseignement

**C. BRETAUDEAU**  
**H. HAFIAN**  
**S. LAURENCE**  
**B. DELVAL**  
**R. MLINAREVIC**  
**G. EXARTIER-**  
  
**C. MALAQUIN**

### \* Département Parodontologie

#### **Chef de département : Professeur J. BRAUX**

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités Associé – Praticien Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier

**J. BRAUX**  
**M.L. JOURDAIN**  
**J. SERGHERAERT**  
**L. PIERRARD**  
**G. BOUCHER**

### \* Département Biologie orale

#### **Chefs de département : Professeur S. LORIMIER, Professeur C. MAUPRIVEZ**

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier  
Professeur des Universités - Praticien Hospitalier  
Professeur des Universités - Biologie cellulaire (CNU 65)  
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités Associé

**S. LORIMIER**  
**C. MAUPRIVEZ**  
**H. KERDJOUJ**  
**S. DERRUAU**  
**F. LEMAIRE**

### **Sous-Section (58.01) DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTION-DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATERIAUX**

### \* Département Dentisterie restauratrice – Endodontie

#### **Chef de département : Docteur C. ÖZCAN**

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier  
Assistante Universitaire Associée  
Assistante Universitaire Associée  
Attachée d'enseignement  
Attachée d'enseignement  
Attachée d'enseignement  
Attachée d'enseignement  
Attaché d'enseignement

**Y. JOSSET**  
**J.H. TUBIANA**  
**C. ÖZCAN**  
**F. CHAINOT**  
**P. VAUCHELET**  
**K. CAMPANO ROZAS**  
**C. RABHI**  
**E. DEMOTIER**  
**E. GROBLI**  
**J. GUERISSE**  
**M. LEGROS**  
**M. MARTEAU**

### \* Département Prothèses

### **Chef de département : Docteur E. SCHITTLY-MEDARD**

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

#### **MEDARD**

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier

Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier

Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier

Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier

Assistante Universitaire Associée

Attaché d'enseignement

**C. MÉDARD**

**E. SCHITTLY-**

**C. MAILLET**

**R. BADRAN**

**D. BUREAU**

**J.P. DRIAU**

**A.S. JAVONENA**

**M. KOLODZIEJCZAK**

**A. MAHIEU**

### **\* Département Fonction-dysfonction, imagerie, biomatériaux**

#### **Chef de département : Docteur J. LECLERE**

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier

Maître de Conférences des Universités Associé – Praticien Hospitalier

Chef de Clinique Universitaire - Assistant Hospitalier

Assistante Universitaire Associée

Attachée d'enseignement

**P. MILLET**

**J. LECLERE**

**R. BASTON**

**S. MAROSO**

**E. PREAUBERT**

#### **ANGLAIS**

Professeur Agrégé

**M. CANTENER**

#### **INFORMATIQUE**

Professeur Certifié

**D. EUDES**

**CORPS PROFESSORAL  
U.F.R. DE MÉDECINE DE REIMS**

**ANATOMIE PATHOLOGIE GENERALE**

Mme le Dr BOULAGNON

**BIOCHIMIE**

M. le Professeur RAMONT

**MICROBIOLOGIE**

M. le Professeur DE CHAMPS DE ST LEGER  
M. le Professeur ANDREOLETTI

**ONCOLOGIE**

Monsieur Pierre MILLET

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier dans la sous-section  
DENTISTERIERESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTION-  
DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATERIAUX, Département Fonction-Dysfonction,  
Imagerie, Biomatériaux

Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne

Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches

Officier des Palmes Académiques

Directeur de l'U.F.R. d'Odontologie de Reims

Merci pour le professionnalisme, le sens du détail, le pragmatisme ainsi que la mansuétude dont vous avez toujours fait preuve. Je pense que je vous ne remercierais jamais assez d'avoir modifié le statut du TP d'histologie.

Madame Christina MAILLET

Maître de Conférences des Universités Associé - Praticien Hospitalier dans la sous-section  
DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTION  
DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATERIAUX, Département de Prothèses

Merci pour le sérieux et le goût du travail bien fait que vous m'avez transmis.  
Votre rigueur et votre sens aiguë de l'esthétique m'a poussé à devenir un meilleur étudiant et  
j'espère un meilleur praticien.

Madame Marie-Laure JOURDAIN

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier dans la sous-section de  
CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE, Département  
Parodontologie

Directrice Adjointe de l'U.F.R. d'Odontologie de Reims

Docteur de l'Université de Reims Champagne Ardenne

Merci pour tout le savoir que vous m'avez transmis ainsi que pour le temps  
accordé en clinique. Ce fut un plaisir d'apprendre à travailler avec vous.

Monsieur Jean-Paul DRIAU

Chef de Clinique Universitaire - Assistante Hospitalière dans la sous-section DENTISTERIE  
RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTION-DYSFONCTION,  
IMAGERIE, BIOMATERIAUX, Département Prothèses  
Docteur de l'Université de Reims

Avant d'être enseignant et membre de ce jury tu as été et tu restes un ami, tu as toujours été partant pour m'aider dans tous les domaines. Je souhaite sincèrement que cette dynamique continue.

A mes parents, merci pour votre gentillesse, votre patience et le soutien inconditionnel que vous m'avez toujours accordé.

A Juliette, grâce à toi cela fait plus de sept ans que je n'ai pas ressenti l'ennui, merci pour ton soutien, ta spontanéité et ta vivacité d'esprit. Tu es mon rayon de soleil.

A Paul et Ariane, merci pour toutes ces années d'amitiés et toutes les anecdotes que cela implique. Merci également pour tous les coups de main que vous m'avez donnés. J'ai hâte que nous puissions de nouveau refaire le monde devant un nanard avec du pinard.

A Gwendal, merci pour tous ces moments de joie et tout le soutien que tu m'as apporté. J'ai hâte de devenir lyonnais pour qu'on puisse se revoir plus souvent et sans être à la merci de la SNCF et de sa fiabilité légendaire !

A Léa je suis très heureux que nous soyons amis, c'est toujours un plaisir de travailler avec toi, qui aurait cru que l'on puisse forger une amitié aussi solide en loupant son troisième articulateur de la journée en salle à plâtre 20 minutes avant la fermeture.

A Gaël tu es le premier ami que je me sois fait dans cette fac merci pour ta bonne humeur, ton humour décapant c'est toujours un plaisir de te revoir.

A Axel je suis très heureux d'avoir travaillé avec toi, tu es toujours de bonne compagnie, franc et fiable. J'ai hâte de pouvoir de nouveau me mesurer à toi aux échecs.

A Gautier notre année de travail ensemble fut enrichissante, merci pour toutes les astuces que tu m'as données. Le petit déjeuner du lapin d'odontologie pédiatrique était toujours un succès je continuerais cette tradition.

A Marion ce fut un plaisir de travailler avec toi, nos virées à l'EHPAD étaient folkloriques et les bières post-boulot aussi.

A Aurélien et Emma merci pour toutes ces soirées mémorables et l'amour de la musculation qui ne m'a pas quitté malgré les apparences.

**Les opinions exprimées dans cette thèse n'engagent que leur auteur  
et en aucun cas l'U.F.R. d'Odontologie de REIMS.**

## Liste des abréviations

ANSM	Agence Nationale de Sécurité du Médicament
CCAM	Classification Commune des Actes médicaux
CER	Comité d'évaluation des Risques
CLP	Classification, Labelling and Packaging
CFAO	Conception et Fabrication Assisté par Ordinateur
CMR	Cancérigène, Mutagène, Toxique pour la reproduction
DM	Dispositifs Médicaux
ECHA	Agence Européenne des Produits Chimiques
HN	Hors Nomenclature
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
PMMA	Poly Méthacrylate de méthyle
PEEK	Poly-éther-éther-cétone
PEKK	Poly-éther-cétone-cétone
REACH	Enregistrement, Evaluation, Autorisation et Restriction des substances Chimiques
RDC	République démocratique du Congo
RNV3P	Réseau national de vigilance et de prévention des maladies professionnelles
USGS	United State Geological Survey

## Introduction

En 2017 l'union européenne a mis à jour sa liste des substances CMR. L'entrée du cobalt dans cette liste a pour conséquences d'en restreindre les usages notamment dans les dispositifs médicaux. Or le cobalt avait une place prédominante en odontologie prothétique. Le cobalt ne pouvant plus être employé comme auparavant dans les dispositifs médicaux à partir de mai 2025 trouver des alternatives est indispensable et urgent. Les alternatives au cobalt en prothèse fixée étant déjà nombreuses il semble plus pertinent de se concentrer sur les alternatives en prothèse amovible.

La prothèse amovible en odontologie est mal rémunérée depuis la convention de 2017 entre la sécurité sociale et la profession. En effet les prothèses à base résine sont en reste à charge zéro et les prothèses à châssis métalliques sont en reste à charge modéré. Dans tous les cas leurs prix sont plafonnés ce qui n'est pas le cas du prix des autres biens et services nécessaires à leur confection (énergie, main d'œuvre, matières premières). De plus la réalisation de prothèses amovibles peut sembler chronophage, requiert une maîtrise de l'anatomie et des outils d'empreintes, ce qui peut provoquer un désamour chez certains praticiens envers cette discipline.

A la lueur des progrès réalisés ces dernières années aussi bien au niveau des biomatériaux que des techniques de conception et fabrication assisté par ordinateur (CFAO) est-il possible de respecter les tarifs français, la législation européenne et les données acquises de la science ?

C'est à ce compromis entre les besoins du patient, ses souhaits et ses possibilités qui constitue la base de tout plan de traitement en odontologie que nous tenterons de répondre.

Dans ce travail nous présenterons le cobalt, ses usages ainsi que les problématiques liées à son exploitation. Ensuite nous étudierons les causes du changement de réglementations. Et enfin nous présenterons les différentes alternatives crédibles en prenant en compte l'aspect économique et l'aspect biomécanique.

## 1. Le cobalt définition, utilisations aspects économiques et éthiques

### 1.1.Qu'est-ce que le cobalt ?

Le cobalt est l'élément 27 du tableau de classification périodique des éléments. Il possède des propriétés ferromagnétiques, son point de fusion est de 1495°C, sa conductivité électrique est de  $17,2 \cdot 10^6 \text{ S.m}^{-1}$  et il présente une résistance importante à l'usure à la chaleur et à la corrosion.

Le cobalt a été successivement utilisé dans les peintures comme pigment, dans les aimants, dans l'aérospatiale, la construction ainsi que dans les batteries (cathode dans les batteries Lithium ion et les batteries à hydrures métalliques de Nickel).

Le cobalt existe dans la nature que ce soit dans l'air ou dans l'eau. L'atome de cobalt est l'un des éléments centraux de la vitamine B12.

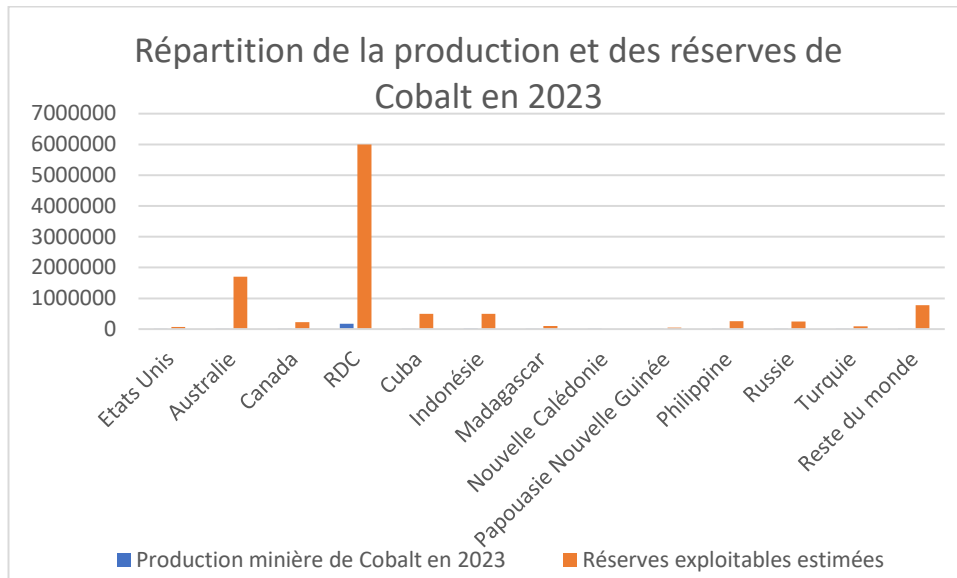
### 1.2.Production, réserve et besoin en cobalt dans le monde

Sur terre, le cobalt est majoritairement extrait en RDC (République Démocratique du Congo), les principaux pays ayant extrait du cobalt sont les Etats-Unis, le Canada, l'Australie, Cuba, l'Indonésie, Madagascar, la Nouvelle Calédonie, la Papouasie Nouvelle Guinée, les Philippines, la Russie et la Turquie (1).

**Tableau I :** Exploitation minière du cobalt par pays et réserve en 2023, d'après (1)

<b>Pays</b>	<b>Production minière de Cobalt en 2023 en tonnes</b>	<b>Réserves exploitables estimées en tonnes</b>
Etats-Unis	500	69.000
Australie	4.600	1.700.000
Canada	2.100	230.000
RDC	170.000	6.000.000
Cuba	3.200	500.000
Indonésie	17.000	500.000
Madagascar	4.000	100.000
Nouvelle Calédonie	3.000	Non communiqué
Papouasie Nouvelle Guinée	2.900	49.000
Philippine	3.800	260.000
Russie	8.800	250.000
Turquie	2.800	91.000
Reste du monde	6.600	780.000

Total	230.000	11.000.000
-------	---------	------------



**Figure 1 :** Graphique représentant la production et les réserves exploitables de cobalt en 2023, d'après (1)

Le cobalt est extrait en coproduit avec le minerai de cuivre ou le minerai du nickel, il est ensuite raffiné et transformé suivant les usages souhaités.

L'USGS (United State Geological Survey) estime les ressources terrestres en cobalt identifiées à 25 millions de tonnes, il estime aussi qu'il y aurait jusqu'à 120 millions de tonnes de cobalt au fond des océans atlantique, pacifique et indien (1). L'USGS estime également qu'en 2023 aux états unis 25% du Cobalt consommé a été recyclé (1). Et enfin il estime que la substitution du cobalt par d'autres matériaux provoque suivant le produit concerné soit en une perte de performance soit en une augmentation du coût(1).

Le cobalt est certes extrait majoritairement en RDC mais il est majoritairement raffiné en Chine (environ 65% du cobalt sur le marché est raffiné en chine)(2).

Dans *2018 Minerals Yearbook U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey COBALT [ADVANCE RELEASE]* Shedd et al (2018) estime que la consommation globale de cobalt va augmenter de 9.5% par an entre 2018 et 2025 rien que pour pourvoir au

besoin pour les véhicules électriques(3). Le secteur des batteries en lui-même voit sa consommation de cobalt augmenter de 13.5% par an(3).

Dans « *Will global cobalt supply meet demand? The geological, mineral processing, production and geographic risk profile of cobalt* » Savinova estime qu'il y aura suffisamment de cobalt disponible sur le marché jusqu'en 2040 si la croissance de la demande se maintient(2).

Au niveau géopolitique l'instabilité en RDC qui est le principal extracteur de cobalt est considérée comme inquiétante car le cobalt est considéré comme un métal stratégique. Dans *How critical mineral supply security affects China NEVs industry? Based on a prediction for chromium and cobalt in 2030* de Yu (2023) l'auteur insiste sur les faits que la Chine doit diversifier ses fournisseurs de cobalt et envisager des partenariats avec des pays comme l'Australie et Cuba car stables politiquement(4).

Au niveau européen, il existe des gisements de cobalt dans les régions ukrainiennes récemment annexées par la Russie. La Russie est également productrice de cobalt (elle était le troisième producteur en 2023). Cependant la guerre en Ukraine n'a eu que de faibles répercussions sur le cours de cobalt (en comparaison avec les autres métaux stratégiques). En effet le cours du cobalt n'a augmenté que de 2% depuis la guerre en Ukraine tandis que les cours du nickel et du lithium ont augmenté de 36% et 14.97% (5).

En regardant dans le passé, il y a déjà eu des épisodes de tensions au niveau de l'approvisionnement mondial en Cobalt. En 1991 les trois producteurs principaux de cobalt (à l'époque le Zaïre, la Zambie et l'URSS) subissaient des troubles politiques menant à une fièvre du cobalt (6). A l'heure actuelle 70% des réserves de cobalt se situent dans des pays corrompus et/ou instables (7).

### 1.3.L'exploitation du cobalt en RDC historique, situation actuelle et enjeux géopolitiques liés

Au niveau de l'extraction du minerai de cobalt, nous nous intéresserons à l'exemple de la RDC ce pays étant le premier producteur et possédant les plus grandes réserves de cobalt.

Historiquement, l'extraction du cobalt et l'industrie minière en RDC sont liées au passé colonial de ce pays. L'industrie minière congolaise a été initiée par la Belgique en 1914 dans la

région du Katanga (actuellement la région Lualaba, Haut Katanga et Haut Lomami) à la suite de la découverte d'importants gisements de cuivre (8). L'état belge met en place un tissu industriel complet dans cette région avec non seulement des mines mais aussi des usines métallurgiques, des industries auxiliaires et des infrastructures sociales (écoles et hôpitaux) (9). À la suite de la décolonisation, les guerres civiles et le régime autocratique corrompu provoqueront la lente chute de l'industrie minière nationale congolaise. Entre 1988 et 1993 la production chute de 90%, son bénéfice net en 2006 était estimé à 12 millions de dollars soit 1% de sa dette (9). Au milieu des années 2000 l'industrie minière se privatise grâce aux investissements étrangers (notamment chinois), la production de cobalt du pays s'envole passant de 20000 tonnes en 2005 à 100000 tonnes en 2020 (8).

Au niveau géographique, les ressources en cobalt se concentrent dans la région du Katanga proche de la frontière Zambienne au niveau de la « ceinture du cuivre » africaine.

Politiquement la région du Katanga est instable, cette région qui fut la plus riche de RDC, a dès l'indépendance tenté de faire sécession du reste du pays. Les indépendantistes Katangais ont en 1978 et 1979 essayé de prendre le pouvoir sur cette région minière avec pour base arrière l'Angola communiste. Les enjeux de ce conflit et le cadre de la guerre froide mèneront le camp occidental à appuyer Mobutu, les dégâts matériels et humains liés à ce conflit contribueront amplement à la déliquescence de l'industrie nationale minière congolaise (8).

À la suite de la chute de Mobutu en 1997 le pays entre dans une période trouble avec de nombreux conflits dans lesquels participent les pays voisins. Lors de la première guerre du Congo qui mènera au départ de Mobutu, Laurent Kabila prendra le pouvoir grâce au soutien du Rwanda et de l'Ouganda. Lorsque celui-ci souhaitera s'émanciper de ses anciens alliés cela conduira à la seconde guerre du Congo en 1998 avec le Zimbabwe soutenant M. Kabila et le Rwanda et l'Ouganda soutenant des groupes rebelles à l'est du Congo (qui est également une région minière mais ne contenant pas de Cobalt) (8). De nos jours il se trouve encore des groupes rebelles, et/ou paramilitaires faisant régner la terreur dans cette région dont l'origine remonte à ce conflit.

La période de guerre suivant la chute de Mobutu, l'avènement du nouveau code minier en 2002 et les relations étroites entre la Chine et M. Kabila expliquent la frilosité des investisseurs occidentaux ainsi que l'hégémonie chinoise dans la résurrection de l'industrie minière en RDC au cours des années 2000 (8).

Dans *The impact of geopolitical relations on the evolution of cobalt trade network from the perspective of industrial chain* de Yaoqi et al (2023) l'auteur met en évidence que même si l'impact des événements géopolitiques sur le marché du cobalt est difficilement prévisible, les conflits affectent principalement les étapes de transformation du cobalt (6). Mais encore en modélisant les différentes relations entre les pays sous formes de schéma de coopération et de conflits on remarque que les réseaux de coopérations sont plus étendus que les réseaux de conflits et que l'influence du contexte géopolitique sur le marché du cobalt diminue depuis 2017 (6).

Aujourd'hui il est difficile de prévoir l'accès aux ressources en cobalt pour les occidentaux. En effets depuis quelques années l'influence des anciennes puissances coloniales en Afrique diminue chaque jour. Par exemple les forces armées françaises ont été expulsées du Mali, de Centrafrique et du Niger puis remplacées par des groupes de mercenaires à la solde de la Russie. Ce changement de paradigme est inquiétant pour l'accès aux ressources minières en général. Cependant la Chine étant le principal raffineur de minerais de cobalt, au vu de l'état des relations entre la Chine et la Russie et de la diversification des sources de cobalt chinoises le principal risque pesant sur l'approvisionnement en Cobalt semble plus relever du conflit commercial entre la chine et l'occident que d'une potentielle ingérence Russe sur les sites d'extraction en RDC.

#### 1.4.Le cobalt est-il recyclable ?

Dans la partie précédente, il a été mis en évidence que la majorité du cobalt est de nos jours employée dans les batteries lithium ion cet usage augmentant avec la transition énergétique en cours. Techniquement le cobalt est séparable des autres composants d'une batterie usagée, à l'heure actuelle les différentes techniques de séparations permettent d'extraire jusqu'à plus de 90% du cobalt composant la batterie. Ce cobalt extrait est ensuite purifié par électrolyse. Il existe deux voies pour séparer le cobalt des autres métaux, la première est la pyrométallurgie et la seconde est l'hydrométallurgie.

Dans *Resynthesizing of lithium cobalt oxide from spent lithium-ion batteries using an environmentally benign and economically viable recycling process* de Sandeep (2020) la comparaison entre différentes méthodes d'extractions par acide est réalisée (10). Cette étude conclut que l'acide oxalique est le meilleur compromis au niveau efficacité, impact

environnemental et viabilité économique (10). Avec cette méthode l'auteur a obtenu un taux de pureté du cobalt recyclé de 90,13 % permettant d'envisager sa réutilisation dans des batteries neuves (10).

L'union européenne a légiféré imposant des seuils minimums de composants recyclés dans les batteries ainsi que des seuils de performance pour le recyclage du cobalt (11). A partir de 2031, les batteries neuves devront contenir 16% de cobalt recyclé, à partir de 2036 elles devront contenir 26% de cobalt recyclé (11). Les taux d'efficacités des méthodes de recyclages devront être de 90% en 2027 et de 95% en 2031 (11).

### ***1.5. L'exploitation du cobalt est-elle éthique ?***

Dans le sous chapitre précédent, nous avons mis en évidence que le plus gros producteur de cobalt est la RDC. L'industrie minière représente d'ailleurs le premier secteur économique de ce pays. Des problèmes liés à cette industrie ont été rapportés comprenant notamment du travail des enfants, ainsi qu'une pollution environnementale (2).

Par exemple dans *List of Goods Produced by Child Labor or Forced Labor* le ministère du travail américain a classé le cobalt comme un des biens issus du travail des enfants (12).

Dans son rapport de 2014 intitulé *République Démocratique du Congo. « Voilà pourquoi on meurt » Les atteintes aux droits humains en République Démocratique du Congo alimentent le commerce mondial du cobalt* Amnesty international rapporte de nombreux cas de travail d'enfants (13). Les mines officielles ne semblent pas exploiter ouvertement des enfants, le problème semble lié à l'essor des mines artisanales qui fleurissent aux abords des mines officielles. Les enfants récoltent et trient également des déchets miniers aux abords des mines afin de chercher du minerai à revendre (13). Il a également été rapporté que les mineurs et autres personnes manipulant du minerai ne disposaient d'aucun équipement de protection, que les mines n'étaient pas ventilées provoquant l'accumulation de poussières de cobalt (13).

De nombreux problèmes respiratoires ont été recensés chez les travailleurs miniers, mais la nature non officielle de ces mines implique qu'il n'y aucune structure de santé dans les environs

et aucun suivi médical des mineurs (13). Les mines artisanales ne respectent aucune norme et les accidents mortels y sont fréquents (13).

De plus il a été rapporté que les enfants mineurs étaient exposés à des risques importants de violence, d'extorsion de la part des gardes privés des sociétés minières voire parfois des forces de l'ordre. Par exemple une enfant interrogée dans le rapport d'Amnesty déclare avoir vu des gardes privés jeter son amie dans une citerne de gasoil car elle n'avait pas d'argent pour payer un pot de vin (13). Mais encore des cas d'exploitations financières ont été mis en évidence de petits négociants véreux changent les cours d'achat du cobalt dans leurs échoppes (13).

Dans *Distributional impact of corporate extraction and (un)authorised clandestine mining at and around large-scale copper- and cobalt-mining sites in DR Congo* de Katz-Lavigne (2020), il est mis en évidence la corruption et le racket permanent qui règnent sur les sites miniers et à leurs abords (14).

L'étude *Incidence of congenital malformations and proximity to mining in Lubumbashi, DR Congo* de Kayembe-Kitenge et al (2019) rapporte que les personnes naissant près d'une mine sont plus susceptibles d'avoir des malformations. L'auteur suppose un lien avec la pollution aux métaux lourds(dont le cobalt) (15).

Cependant l'auteur a réalisé une autre étude intitulée *Metal mining and birth defects: a case-control study in Lubumbashi, Democratic Republic of the Congo* en collaboration avec Van Brusselen en 2020. Cette nouvelle étude traite de la relation entre le fait d'avoir un père qui travaille à la mine et le fait de naître malformé (16). L'étude n'arrive pas à démontrer de lien de causalité entre les deux faits précédemment cités, l'auteur invoque la faible taille de l'échantillon, l'absence d'infrastructures médicales (seules les malformations visibles sont détectées) et la précarité des conditions pour remplir les questionnaires (16).

## 1.6.En résumé

Dans cette partie il a été mis en évidence que le cobalt est un élément utilisé dans de nombreux domaines, dont la demande a explosé avec la transition énergétique. Le Cobalt est majoritairement extrait en RDC engendrant des problèmes sanitaires et des problèmes éthiques. Il est majoritairement raffiné en Chine avant d'être utilisé pour construire principalement des

batteries lithium ion. Le cobalt est en partie recyclable même si les techniques actuelles ne permettent de récupérer 100% du cobalt employé dans les batteries.

## 2. Pourquoi l'interdiction du cobalt dans les dispositifs médicaux

### 2.1. Réglementations concernant les dispositifs médicaux et les substances chimiques.

Le cobalt a été classé cancérigène 1B, mutagène 2 et toxique pour la reproduction 1B dans le règlement délégué 2020/217 de la commission européenne.

*Tableau II : Significations des catégories CMR, d'après l'ANSM*

<b>Termes</b>	<b>Significations</b>
1A	Danger avéré
1B	Danger présumé
2	Danger suspecté

Ce règlement n'interdit pas totalement l'usage du cobalt dans les dispositifs médicaux néanmoins il exige de justifier de l'absence d'alternative si le cobalt représente plus de 0.1% de fraction massique du dispositif. Si l'absence d'alternatives est justifiée il faudra également signaler la présence de cobalt dans le dispositif médical (DM) ainsi que fournir une notice expliquant les risques encourus (17).

Il existe une entité L'ECHA (Agence Européenne des Produits Chimiques) qui est une agence européenne chargée d'évaluer les informations fournies par les industriels sur la dangerosité des produits chimiques (18). Dans cette entité est présent comité d'évaluation des risques (CER), c'est ce comité qui a classé le cobalt métallique en substance CMR.

L'union européenne a également mis en place un règlement concernant la classification, l'étiquetage et l'emballage des produits chimiques. Il s'agit du règlement 1272/2008 communément appelé règlement Classification Labelling and Packaging (CLP)(18). Dans ce règlement, l'annexe VI classe les produits jugés dangereux et à l'intérieur de cette annexe est présente la classification CMR (cancérigène, mutagène, toxique pour la reproduction) (18).

Le REACH (Enregistrement, Evaluation, Autorisation et Restriction des substances chimiques) est un règlement européen (règlement n°1907/2006) en vigueur depuis 2007 (19).

Il a pour but d'évaluer, contrôler et recenser l'ensemble des substances chimiques fabriquées, importées et mises sur le marché européen (19). Depuis le 31 mai 2018, il est illégal d'importer ou de fabriquer des quantités supérieures à une tonne par an de matériau non classé par ce règlement. Cela découle du principe « pas de données, pas de marché » (19).

Dans ce règlement les substances ayant une classification CMR 1A et 1B peuvent être inscrites sur la liste des substances extrêmement préoccupantes. Le cobalt n'est pas encore dans cette liste.

Ce règlement comporte plusieurs annexes les plus importantes sont l'annexe XIV qui soumet l'import et l'utilisation d'une substance à l'accord de la commission européenne et l'annexe XVII qui soumet à restriction ou prohibe l'import et l'utilisation d'une substance (19).

Les prothèses dentaires sont des dispositifs médicaux sur mesure elles étaient donc soumises en plus à la directive 93/42/CEE du Conseil du 14 juin 1993 relatives aux dispositifs médicaux jusqu'au 26 mai 2021 (20).

Cette loi définissait le dispositif sur mesure : *« tout dispositif fabriqué spécifiquement suivant la prescription d'un praticien qualifié indiquant, sous la responsabilité de ce dernier, les caractéristiques de conception spécifique et destiné à n'être utilisé que pour un patient déterminé »*(20).

La directive 93/42/CEE précédemment citée a été remplacée par le règlement européen 2017/745 (21). Néanmoins les certificats de conformité aux anciennes normes restent valables jusqu'au 27 mai 2025 (21). Cette loi européenne a été transcrite dans le droit français par l'Ordonnance n° 2022-582 du 20 avril 2022 portant adaptation du droit français au règlement (UE) 2017/745 du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2017 relatif aux dispositifs médicaux (22).

## 2.2. Les causes du changement de réglementations du cobalt.

### 2.2.1. Des risques pour les travailleurs exposés au cobalt.

L'INRS (Institut national de recherche et de sécurité) liste 4 maladies professionnelles pouvant être liées à la manipulation du cobalt (dans son décret du 15 juillet 1980 mis à jour le 7 mars 2000) (23).

**Tableau III :** *Affections professionnelles provoquées par le cobalt et ses composés, d'après (24)*

Désignation des maladies	Délai de prises en charges	Liste indicative des travaux susceptibles de provoquer ces maladies
Lésions eczématiformes récidivant après nouvelle exposition au risque ou confirmées par un test épicutané positif spécifique.	15 jours	Préparation, emploi et manipulation du cobalt et de ses composés.
Rhinite récidivant en cas de nouvelle exposition au risque ou confirmée par test spécifique.	7 jours	
Asthme ou dyspnée asthmatiforme objectivé(e) par exploration fonctionnelle respiratoire récidivant en cas de nouvelle exposition au risque ou confirmé(e) par test spécifique.	7 jours	
Insuffisance respiratoire chronique obstructive secondaire à la maladie asthmatique	1 an	

Il existe donc dans les pathologies liées au cobalt, qui sont principalement des maladies de peau, des maladies pulmonaires et des tumeurs (25).

Dans *Analyse temporelle des expositions et des pathologies professionnelles françaises liées au cobalt et aux poussières de métaux durs, de la fin des années 1990 à 2020* Robert et al (2020), l'auteur analyse les bases de données fournies par la base de données RNV3P (Réseau national de vigilance et de prévention des maladies professionnelles) pour en extraire les pathologie liées au travail dans laquelle une exposition au cobalt était connue avec une imputabilité moyenne à forte (25).

Plusieurs secteurs d'activités sont fortement représentés dans la déclaration de ce genre de pathologies en premier le secteur de l'industrie manufacturière, ensuite la construction et en troisième le secteur de la santé (parmi le secteur de la santé le dentaire est majoritairement représenté) (25).

L'auteur met également en évidence le fait que le type de pathologie est intrinsèquement lié au secteur d'activité et donc au type d'exposition des travailleurs (contact dermatologique, inhalation de poussières) (25). Par exemple les pathologies cutanées ont une prévalence supérieures dans le secteur de la construction tandis que dans le secteur manufacturier ce sont les pathologies pulmonaires et tumorales qui prédominent (25).

Dans le domaine de la dentisterie ce sont les pathologies pulmonaires qui prédominent, un lien avec l'inhalation de poussière lors des fabrications, polissages et réglages des DM en Cobalt semble envisageable.

Cependant il a été mis en évidence que les personnels exposés au cobalt étaient également exposés à d'autres substances susceptibles de causer des pathologies comme par exemple le nickel, le chrome ou l'amiante (25).

L'usage du cobalt nécessite donc des mesures de protections pour les travailleurs qui y sont très régulièrement exposés mais qu'en est-il des patients qui ont un DM contenant du cobalt ?

## 2.2.2. Les événements indésirables liés au cobalt dans les dispositifs médicaux

### 2.2.2.1. En odontologie

Dans *Biocompatibility of dental casting alloys: a review* par Wataha(2000) il est mis en évidence que la biocompatibilité d'un alliage est intrinsèquement lié à la corrosion en bouche (26). En effet plus la corrosion est intense plus la quantité d'ions relâchés par l'alliage va être importante. En revanche dans le cadre d'une prothèse amovible l'ensemble des ions relâchés par l'alliage ne va pas directement atterrir à l'intérieur du corps humain, une partie est susceptible de passer la barrière épithéliale au niveau de la gencive et dans le cas des éléments sous forme de vapeurs (par exemple le mercure des amalgames) d'atterrir dans les poumons (26).

Cette distribution inégale des ions va entraîner des conséquences : en effet suivant le système affecté la toxicité est différente aussi bien au niveau des effets qu'au niveau des doses. Il existe également une différence dans l'élimination, une substance entrée dans l'organisme par voie orale sera éliminée bien plus rapidement par l'organisme qu'une substance qui aurait été injectée directement dans le sang (26).

Dans le cadre de prothèse amovible à châssis contenant du cobalt, il a été mesuré la présence de cobalt dans la salive et dans l'enduit lingual des patients (27). Les quantités mesurées étaient les plus élevées deux jours après l'insertion de la prothèse pour décroître ensuite. Cette décroissance est liée à la formation d'une couche de passivation limitant la corrosion et donc la libération d'ions métalliques. Certains patients ne présentaient pas cette décroissance, il a été mis en évidence que ces patients présentaient des parafonctions limitant ainsi la formation d'une couche de passivation (27).

Même s'il existe une libération d'ions aucune intoxication systémique liée aux alliages dentaires n'a été rapportée jusqu'à l'an 2000 (26). Le constat est différent au niveau local, les tissus en contact direct avec un dispositif prothétique vont eux accumuler ces ions métalliques.

Dans *Cytological response of palatal epithelium to TiN-coated CoCr alloy denture* de Sokołowski et al (2012) il a été mis en évidence que toutes les prothèses à plaque palatine perturbaient la kératinisation des cellules sous-jacentes et que les prothèses en Cr-Co provoquaient plus de perturbation que les prothèses en résine (28).

En 2022 Grosogeat a publié une étude *Toxicological Risks of the Cobalt-Chromium Alloys in Dentistry: A Systematic Review*. Cette revue met en évidence quelques rares cas de réactions allergiques, de sensibilisations ou d'irritations liées à des DM contenant du cobalt en odontologie. Les événements indésirables sont majoritairement reliés à des patients déjà allergiques au Cr ou au Co (29). Cette étude conclut que même si les alliages à base de cobalt présentent une meilleure tolérance que les alliages à base de nickel, il reste toujours moins biocompatible que les alliages à base Titane (29).

#### 2.2.2.2. *Dans les autres dispositifs médicaux*

Les alliages de chromes cobalt sont aussi utilisés dans certaines prothèses de hanche. Parmi ces prothèses de hanche, celles qui sont qualifiées de prothèse de hanche à couple de frottement métal métal ont parfois provoquées des effets indésirables.

Selon l'*American academy of orthopaedic surgeons*, plus de 1 million de prothèses de hanche de type métal contre métal ont été mises en fonction entre 1996 et 2012 (30).

En 2014 l'ANSM a changé ses recommandations pour restreindre les indications de ce type de prothèse (31). Depuis 2014 ces prothèses sont interdites aux femmes en âge de procréer ainsi que chez les patients allergiques aux métaux, les têtes fémorales de faible diamètre et à faible teneur en carbone et les têtes fémorales de grands diamètres sont non recommandés (ce type de DM a disparu du marché français). Ce type de prothèse est également déconseillé aux patients de plus de 70 ans. Et enfin les patients porteurs de ce type de prothèse doivent être suivis régulièrement pour des analyses radiologiques et sanguines (31).

Il a été rapporté des intoxications au cobalt locales et/ou systémiques chez des patients porteurs de prothèse de hanche à couple métal-métal.

La métallose est une complication rare de l'arthroplastie (chirurgie de l'articulation consistant à retirer l'os et/ou le cartilage endommagé autour d'une articulation et d'y ajouter le plus souvent une prothèse), elle est issue de la friction ou de la réaction chimique entre les surfaces de contact d'une prothèse articulaire en métal (32). Des particules de métal dissoutes dans les fluides corporels peuvent alors s'accumuler dans la zone ou se répandre dans l'organisme, la concentration de métal dans le sang augmente donc provoquant des symptômes variés (32).

Le traitement principal de cette pathologie est l'ablation de la prothèse causale et une nouvelle arthroplastie (32).

Pour repérer les éventuelles complications l'examen radiologique et la mesure du taux de cobalt sanguin sont complémentaires et indispensables. Dans *Les prothèses de hanche au cobalt sont-elles dangereuses ?* Mistretta (2016) affirme que les taux de cobalt relevés chez des patients ayant une usure anormale de leurs prothèses de hanche sont supérieurs à 4.5µg/L de moyenne, elle cite également l'exemple de 7 patients ayant une ostéolyse sévère avec un taux de cobalt moyen à 147µg/L. Sur ces 7 patients 5 étaient asymptomatiques et 6 ne présentaient pas d'anomalie à la radiographie (30).

Il réaffirme également « *Le consensus européen de 2012 indique des risques d'ostéolyse, de nécrose tissulaire et d'effets à long terme sur la santé à partir de 20µg/L, à partir de ce seuil il est nécessaire d'envisager une réintervention/reprise chirurgicale sur la prothèse* » (30).

Les manifestations cliniques d'une intoxication systémique au cobalt peuvent inclure une atteinte hématopoïétique, une myocardopathie réversible, une lésion aiguë des cellules tubulaires rénales, une neuropathie périphérique ou un cancer (33). Il existe également un risque de création de pseudo-tumeur autour de la prothèse(33). Une équipe italienne a même recensé un cas d'intoxication au cobalt présentant la symptomatologie d'une sarcoïdose(33).

Pratt dans *No increased risk of cancer associated with metal-on-metal or ceramic-on-ceramic procedures compared to other bearing surfaces in patients with total hip arthroplasty: A nationwide linked registry cohort analysis of 167,837 patients* (2022) compare les risques de cancer entre la population standard et la population ayant une prothèse de hanche (métal contre métal et céramique contre céramique) en Australie(34). Il a été conclu

que les patients présentaient une incidence de cancer supérieure à la population générale mais qu'aucun des types de prothèses ne présentait un risque accru(34).

En résumé ces prothèses présentent des risques locaux et systémiques assez documentés pour que les autorités sanitaires restreignent les indications, de plus les affaires de prothèses de hanches au cobalt défectueuses de Johnson & Johnson ont subi un traitement médiatique important. Toutes ces raisons ont donné au cobalt un statut de matériel controversé.

### 2.2.3. Le fonctionnement de ECHA et la classification CMR du cobalt

Le comité ECR de l'ECHA recueille les informations sur les substances. Selon leur site des essais in vivo doivent être envisagés uniquement si l'ensemble des informations disponibles est insuffisant pour classer une substance. Les informations à prendre en compte avant d'envisager des essais in vivo sont des données obtenues à partir d'essais (conformes ou non au guide des bonnes pratiques), des données humaines historiques, des données issues de méthodes in vitro et des références croisées (utilisation d'informations pertinentes provenant de substances ou de mélanges afin de prévoir les propriétés dangereuses des substances ou des mélanges cibles examinés)(35).

L'ECR reconnaît que dans le cadre de la santé humaine aucune étude in vitro ou prévisionnelle de type (Q)SAR ne peut remplacer les études toxicologiques à long terme(35). En cas de données contradictoires ou inexploitable l'ECR utilisera une méthode tenant à base de jugement d'expert et d'autres sources de données(35).

## 2.3. En résumé

Le Cobalt est un matériau controversé depuis le scandale des prothèses de hanches défectueuses survenu au début des années 2010, il existe également un risque d'intoxication pour les travailleurs exposés au cobalt sans mesures de précautions adéquates. En odontologie les risques liés au cobalt sont plus limités, on rapporte certes des irritations, des intolérances, des allergies et on mesure une concentration de cobalt plus importante dans les tissus en contact avec les prothèses à base de cobalt. Mais en aucun cas il n'est mentionné des pathologies aussi intenses et délétères que celles rapportées avec les prothèses de hanche. Plusieurs facteurs expliquant ces différences sont envisageables. Primo la localisation des dispositifs médicaux dentaires est différente : hormis les implants dentaires, les prothèses dentaires sont dans la

cavité buccale et non directement dans l'os comme les prothèses de hanches. Cette différence de localisation explique que les prothèses dentaires sont soumises à des contraintes beaucoup moins importantes aussi bien au niveau mécanique, qu'au niveau inflammatoire. Dans la cavité buccale une partie des ions relâchés par le cobalt est éliminée par la salive. Secundo les dispositifs médicaux dentaires sont de volumes et de masses inférieures aux prothèses de hanches, la surface disponible pour les échanges ioniques est donc inférieure. Il est possible que la quantité de littérature médicale liée aux prothèses de hanche à couple métal-métal ainsi que les rapports sur pathologies des travailleurs exposés au cobalt aient influencé le comité d'évaluation des risques de l'ECHA en 2017. Il est impossible de réaliser une prothèse dentaire en Cr-Co en respectant la fraction massique de 0.1% prévue dans la loi, et une argumentation économique en faveur du maintien du Cr-Co n'aura aucune valeur devant les tribunaux. Il est donc nécessaire de trouver des alternatives aux alliages Cr-Co.

### 3. Les utilisations et alternatives au cobalt en odontologie.

Le cobalt est utilisé dans le cadre de la prothèse définitive. Dans le domaine de la prothèse fixée les alternatives aux alliages de cobalt sont déjà connues et maîtrisées (céramiques diverses et polymères hautes performances). Cette partie se concentrera donc sur le domaine de la prothèse amovible.

Pour les alternatives les matériaux candidats seront évalués sur leurs aspects mécaniques et économiques.

#### 3.1. Utilisation en prothèse amovible

En prothèse amovible le cobalt est utilisé sous formes d'alliage avec du chrome.

- Pour réaliser les châssis et les crochets pour les prothèses amovibles partielles définitives.
- Pour les plaques palatines et armatures de certaines prothèses amovibles complètes.

#### 3.2. Les propriétés mécaniques et les tests associés

Afin de comparer les différents matériaux, nous allons comparer les caractéristiques mécaniques de ceux-ci. Cette partie décrira les propriétés et les tests utilisés pour les mesurer.

### 3.2.1. Contrainte et déformation

« La contrainte est l'intensité avec laquelle les atomes du matériau sont comprimés ou écartés entre eux. Dans le cadre d'une traction simple c'est la force qui agit par unité de surface du matériau »(36).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{La contrainte se mesure en Pascal (Pa)}$$

« La déformation est l'indicateur des proportions d'atteinte des liaisons interatomiques et de la structure macroscopique du matériau. Dans le cas d'une traction simple, c'est le rapport de l'allongement à la longueur initiale »(36).

$$\varepsilon = \frac{(L-L_0)}{L_0} \quad \text{La déformation n'a pas d'unité.}$$

Avec ces deux paramètres on peut établir un diagramme contrainte déformation lors des différents tests.

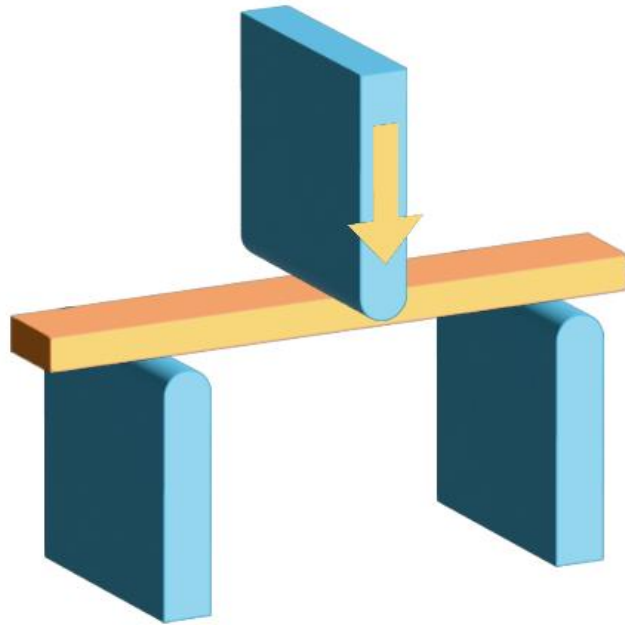
### 3.2.2. La densité

Le Petit Robert définit la densité comme le rapport entre la masse d'un corps et celle d'un même volume d'eau.

$$d = \frac{m}{m_0}$$

### 3.2.3. Résistance à la flexion

La flexion est la courbure obtenue d'une barrette en appui sur ses deux extrémités après l'application d'une force croissante en son centre jusqu'à la rupture(37). Elle se mesure en MPa.



*Figure 2 : Test de flexion trois points, (figure de courtoisie P.Millet)*

Lors du test la partie supérieure de l'éprouvette est en compression et la partie inférieure en traction. (36).

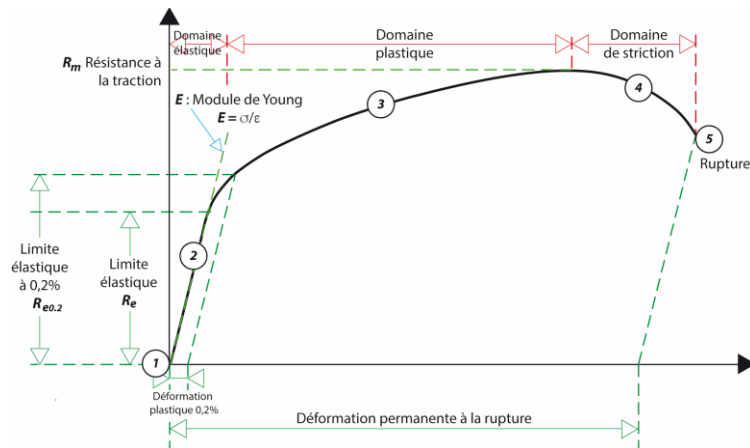
#### 3.2.4. Résistance à la traction

*La résistance à la traction se mesure en appliquant une force de traction sur échantillon de dimension standardisée jusqu'à la rupture, en suivant en processus de mise en charge à déformation constante (36).*



**Figure 3 :** Machines d'essai bicolonne et monocolonne pour test de traction simple  
(figure de courtoisie P. MILLET)

En enregistrant la force appliquée par la machine et la déformation subie par le matériau il est possible de réaliser un diagramme contrainte/déformation.



**Figure 4 :** Exemple de courbe contrainte/déformation (figure de courtoisie P. MILLET)

Sur la figure 4 il y a le domaine de déformation élastique (déformation réversible) et le domaine de déformation plastique (déformation irréversible), la jonction entre ces deux domaines est qualifiée de limite d'élasticité  $R_e$  (contrainte à partir de laquelle on entre en déformation plastique).

La résistance est la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de rompre. Cette donnée est influencée par la forme de l'éprouvette (échantillon test), des éventuels défauts ainsi que de l'intensité des liaisons atomiques.

### 3.2.5. Module de Young ou module d'élasticité

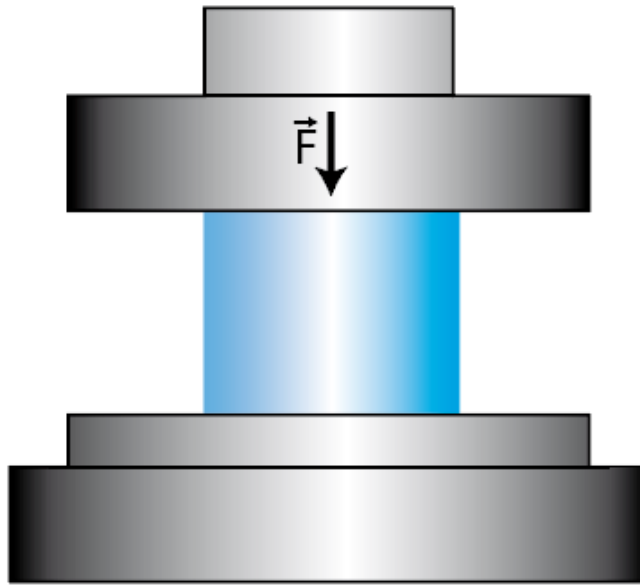
Le module de Young est une constante qui relie la contrainte de traction et la déformation, plus il est élevé moins le matériau est souple (37).

C'est la pente de la courbe de déformation élastique sur un diagramme contrainte/déformation.

Le module de Young est l'indicateur principal de la rigidité d'un matériau.

### 3.2.6. Résistance à la compression

L'essai de compression consiste à placer un échantillon de forme cylindrique entre deux plateaux d'une presse, chaque plateau transmettant une force axiale équivalente en direction de l'échantillon.(37)



*Figure 5 : Test de compression simple, P.MILLET*

### 3.2.7. Résistance à la fatigue

La fatigue est une sollicitation mécanique alternée, généralement périodique (pas exclusivement) et d'une amplitude faible (36).

Les essais de fatigue simple consistent à imposer à des échantillons standardisés (de forme cylindrique ou rectangulaire) des cycles d'efforts périodiques sinusoïdaux. Ces cycles d'efforts peuvent être par charges axiales ou par flexion rotative (36).

## 3.3. Alternatives métalliques

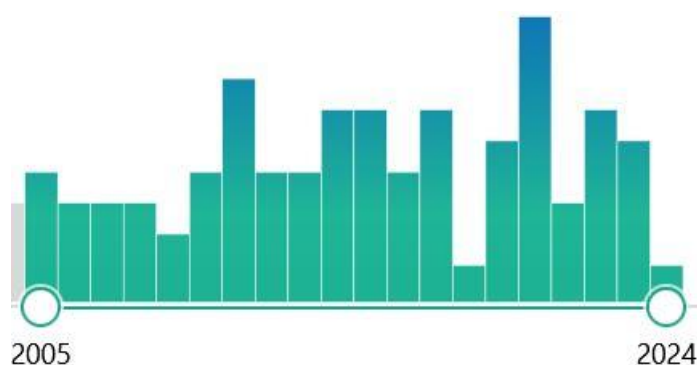
Les principales alternatives métalliques sont les alliages à base de nickel chrome et les alliages de titanes.

Au vu de la biocompatibilité du nickel les alliages à base de nickel ne sont pas envisageables comme alternative au cobalt. Les alliages à base de nickel présentent une plus faible résistance à la corrosion et à l'acidité (par rapport aux alliages chrome cobalt), en bouche ils pourraient libérer du nickel (38) qui est allergisant et plus susceptible d'induire une réponse du système immunitaire que le cobalt lui-même.

Les alliages à base de titane sont la meilleure alternative métallique envisageable pour remplacer les alliages à base de cobalt. En effet le titane présente la meilleure biocompatibilité par rapport au cobalt et au nickel (29).

### 3.3.1. Le titane et ses alliages

Dans le cadre de ce travail, plusieurs recherches sur pubmed ont été réalisées. En cherchant avec les termes mesH « titanium » and « dental » and « removable denture » ont trouve 662 résultats, l'article le plus ancien datant de 1966. Pour affiner la recherche, il a été décidé de restreindre les articles concernant les prothèses implanto-portée et les prothèses fixées. Ce qui nous donne la recherche « titanium » and « dental » and « removable denture » not « implant » not « fixed » avec 145 résultats. En se concentrant sur les articles publiés ces 20 dernières années il reste 69 articles. Parmi ces articles, il y a une revue systématique exploitable intitulée *A systematic review of digital removable partial dentures. Part II: CAD/CAM framework, artificial teeth, and denture base.*



**Figure 6 :** Graphique des publications obtenues sur PubMed avec recherche restreinte.

Le titane et ses alliages sont couramment utilisés dans les biomatériaux.

*Tableau IV : Les différents alliages de cobalt utilisés dans les biomatériaux, d'après(39)*

Code	Ti	Al	V	Ta	Nb	Mo	Zr	O	N	C	H	Fe	Ni	Co	Cu
UNS R50250 Ti Gr1	Bal	-	-	-	-	-	-	max 0.18	max 0.03	max 0.08	Max 0.015	Max 0.20	-	-	-
UNS R50400 Ti Gr2	Bal	-	-	-	-	-	-	Max 0.25	Max 0.03	Max 0.08	Max 0.015	Max 0.30	-	-	-
UNS R50550 Ti Gr3	Bal	-	-	-	-	-	-	Max 0.35	Max 0.05	Max 0.08	Max 0.015	Max 0.30	-	-	-
UNS R50700 Ti Gr4	Bal	-	-	-	-	-	-	Max 0.4	Max 0.05	Max 0.08	Max 0.015	Max 0.5	-	-	-
UNS R56401 TA6V	Bal	5.50- 6.50	3.50- 4.50	-	-	-	-	Max 0.13	Max 0.05	Max 0.08	Max 0.012	Max 0.25	-	-	-
UNS R58130 F1713	Bal	-	-	-	12.5- 14.0	-	12.5- 14.0	Max 0.15	Max 0.05	Max 0.08	Max 0.012	Max 0.25	-	-	-
UNS R56700 Ti6-7	Bal	5.50- 6.50	-	Max 0.50	6.50- 7.50	-	-	Max 0.20	Max 0.05	Max 0.08	Max 0.009	Max 0.25	-	-	-
UNS R58120 F1813	Bal	-	-	-	-	10.0- 13.0	5.0- 7.0	0.008- 0.28	Max 0.05	Max 0.05	Max 0.02	1.5- 2.5	-	-	-
NiTi	Bal	-	-	-	Max 0.025	-	-	Max 0.05	-	Max 0.07	Max 0.005	Max 0.05	54.5- 57.0	Max 0.05	Max 0.01

Dans les différentes études odontologiques trois matériaux à base de titane ressortent très fréquemment il s'agit du titane commercialement pur, de l'alliage Ti-6Al-4V ou UNS R56401 (dans les études les plus anciennes) et de l'alliage Ti6Al7Nb ou UNS R56700 (le successeur du Ti-6Al-4V).

Nous nous intéresserons donc à ces trois matériaux.

### *3.3.1.1. Au niveau économique*

Du point de vue économique le titane semble de plus en plus crédible. Un laboratoire de prothèses (Prothalia) s'est mis à réaliser des châssis en alliage de titane par micro-fusion laser vendus au même prix que les châssis en chrome cobalt, ainsi que des chapes de couronnes céramo-métalliques en titane.

Est-ce que les prothèses en titane réalisées par micro-fusion laser sont de qualité équivalente que celle réalisées par coulée ?

### *3.3.1.2. Au niveau mécanique*

Le principal problème rencontré lors d'une fabrication par micro fusion laser est un état de surface de la pièce beaucoup plus rugueux car les particules de matière utilisée lors de cette méthode sont supérieures à 50µm (40).

Il existe une méthode de fabrication dite hybride qui consiste à faire de la micro-fusion laser et à fraiser la pièce prothétique simultanément. Il existe des machines de C.F.A.O hybride (LUMEX Avance, Matsuura, Fukui, Japan).

En comparant des crochets Akers fabriqués par coulée et par méthode hybride les crochets du second groupe ont présenté un état de surface plus lisse ainsi qu'une perte de rétention plus régulière et plus légère lors des tests d'insertion, désinsertion que celle des crochets coulés (41).

Un article paru dans *l'information dentaire* d'avril 2024 intitulé **Châssis de prothèses amovibles Cobalt-Chrome ou Titane** met en évidence que les crochets réalisés par micro-fusion laser sont plus précisément réalisés que les crochets coulés et que les crochets en Ti6Al4V par micro fusion laser présentaient la même force de rétention final que les crochets Cr-Co par méthode coulée.(42)

Les alliages à base de titane et le titane commercialement pur présentent une résistance à la corrosion supérieure aux alliages de cobalt de ce fait la quantité d'ions libérée dans le milieu buccal est inférieure.

De plus les allergies au titane sont perçues comme rares, le risque d'allergie au titane est estimé à environ 0.6% (43). Néanmoins les allergies au titane sont difficilement diagnostiquées car les tests ne sont pas standardisés et les symptômes d'une allergie au titane varient d'un patient à l'autre (44).

Les allergies aux métaux les plus communément rencontrées sont l'allergie au nickel, au cobalt, au chrome et au palladium (45).

L'alliage Ti6Al7Nb a été synthétisé en 1977 et utilisé comme cliniquement comme alternative au Ti-6Al-4V depuis 1986 (39).

L'alliage Ti6Al7Nb est moins cher, le niobium présente une meilleure biocompatibilité que le vanadium. Techniquement une couche de passivation VO<sub>2</sub> se forme à la surface de l'alliage Ti-6Al-4V, cette couche est thermodynamiquement instable et peut donc conduire à un relargage de Vanadium dans le corps humain (39).

De plus l'alliage Ti6Al7Nb présente un module de résistance à la traction finale, une limite d'élasticité et une résistance à la fracture supérieure au Ti-6Al-4V (39).

L'alliage Ti6Al7Nb est également plus simple à travailler, il peut être coulé, forgé, usiné. Il est également possible d'utiliser la fusion sélective au laser ou la fusion par faisceau d'électron pour manufacturer cet alliage (39).

Le titane commercialement pur peut être classé en différents grades.

*Tableau V : Les différents grades de titane commercialement purs et leurs caractéristiques d'après (46)*

Substance	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité en traction (0.2%)	Elongation à la fracture (%)	Dureté(VHN)
Grade I cpTi	290-410	200	30	120
Grade II cpTi	390-540	250	22	0
Grade III cpTi	460-590	320	18	170
Grade IV cpTi	540-740	390	16	200
Co-Cr	1277	500-650	4-10	300-400

Lors de la coulée d'un châssis en titane commercialement pur, une déformation du titane a lieu. Néanmoins cette déformation est de même ordre que celle des alliages couramment utilisés en dentisterie (47).

Une étude de 2004 évalue la tendance à la déformation de l'alliage de Titane Ti6Al7Nb comme supérieure à celle des alliages de Chrome-Cobalt, néanmoins avec l'emploi d'un design recouvrant le palais cette déformation est négligeable et cliniquement acceptable (48).

Même si la coulée du titane induit un risque de porosité plus grande les crochets en alliage de titane Ti-6Al-4V ou en titane Cp avec une contre dépouille de 0.75mm sont moins susceptibles de subir une fracture ou une perte de rétention au cours du temps (par rapport à des crochets en Cr-CO) (49).

Par contre si les crochets sont réalisés avec une contre dépouille de 0.25 mm la perte de rétention sera similaire qu'il soit en alliage de titane, en titane commercialement pur ou en Chrome-Cobalt (49).

Une autre étude simulant le vieillissement de crochet en titane commercialement pur et de crochets en différents alliages de Chrome-Cobalt avec des contre dépouilles de 0.25mm et 0.5mm sur 5 ans a été prise en compte. Il a été conclu que même si les crochets en titane possédaient initialement une force de rétention inférieure à celles des crochets en chrome-

cobalt, les crochets en titane commercialement pur avec une contre dépouille de 0.5mm était une alternative envisageable cliniquement (50).

Concernant l'alliage Ti-6Al-4V des réserves quant à une possible cytotoxicité ont été émises, le vanadium a été remplacé par du niobium pour aboutir à l'alliage Ti6Al7Nb (48).

Les prothèses à châssis en titane ont un état de surface plus rugueux que celle en alliage de cobalt, il est possible que cette rugosité soit due à la température de fusion du titane. Néanmoins cette rugosité reste inférieure au seuil d'affinité pour la plaque dentaire (46).

Les châssis en titane ont un potentiel de réparation et de modification intéressant. Par la faible conductivité thermique du titane, il est possible d'utiliser la soudure laser afin de réparer ou modifier le châssis en titane. Mais encore il est aussi également possible de fabriquer les pièces du châssis séparément en titane de différents grades et de les assembler ensuite par soudure laser (51).

Une étude réalisée par l'université de Zurich a comparé le ressenti des patients entre deux appareils amovibles à châssis métallique, le premier en Co-Cr et le second en alliage de Titane Ti6Al7Nb. Les patients ont réagi aux deux types de prothèse de la même manière et l'alliage de titane Ti6Al7Nb a été estimé équivalent à l'alliage Co-Cr (52).

### 3.3.1.3. *Compatibilité avec les autres métaux/alliages*

Existe-t-il un risque de corrosion galvanique avec une prothèse amovible à châssis en titane ou en alliage de titane ?

La corrosion galvanique ou bimétallisme est un type de corrosion rapide qui peut survenir lorsqu'un métal actif (qui jouera le rôle d'anode) entre en contact électrique via une solution (par exemple la salive) avec un métal plus noble (qui jouera le rôle de cathode).

Sur le papier ce genre de corrosion serait possible avec le titane cependant en bouche une couche d'oxydation va se former autour du titane et empêcher le mouvement des ions métalliques et des électrons (39). En fonction du pH et des alliages présents le titane peut se comporter comme une anode ou une cathode.

Dans une étude qui analyse la corrosion galvanique de plusieurs couples d'alliages dans de la salive artificielle, il a été déterminé que les alliages de titanes entre eux, le titane et les

alliages précieux ainsi que le titane et le chrome cobalt ne provoquaient pas de corrosion galvanique (53).

Il est donc possible de poser un appareil amovible à châssis en titane ou alliage de titane chez un patient possédant des restaurations, que ce soit en alliage précieux, ou en chrome cobalt sans provoquer de corrosion galvanique.

#### 3.3.1.4. *Aspects négatifs de l'usage du titane*

Les point négatifs d'une prothèse amovible à châssis en titane sont une possible décoloration de la base de la prothèse si le patient utilise des produits d'hygiène fortement alcalins pour et une plus forte affinité de la plaque dentaire pour la prothèse ce qui nécessite une hygiène renforcée de la part du patient (45).

Il a été rapporté une usure sévère des dents prothétiques en titane cependant après étude sur simulateur il a été rapporté que les alliages Ti-6Al4V et Ti-6Al-7Nb présentaient une résistance à l'usure supérieure au titane commercialement pur (51).

Il a également été mis en évidence des problèmes de séparation entre le châssis en titane et la résine poly méthacrylate de méthyle des appareils amovibles, ces problèmes sont de nos jours résolus grâce à l'amélioration des systèmes de collages et de primers.

La fréquence de ces incidents est désormais la même sur les châssis en titane, en chrome cobalt ou en alliage précieux (51).

Globalement les problèmes liés au titane dans les châssis de prothèses amovibles sont résolus ou en cours de résolution et aucun échec catastrophique lié au titane n'a été rapporté (54).

De plus les prothèses amovibles en titane sont d'un poids inférieur à celles en chrome cobalt et équivalent ou inférieur à celles en résine (54). Cette différence de poids en faveur du titane est un facteur de confort pour le patient.

**Tableau VI :** *Masse atomique et poids des différents métaux d'après(46)*

Eléments	Masse Atomique	Densité en g/cm <sup>3</sup>
Titane commercialement pur	47.90	4.50

Or	196.96	19.32
Cobalt	58.93	8.89
Chrome	51.99	7.14
Nickel	58.69	8.91

### 3.4. Alternatives non métalliques au cobalt.

Il existe dans cette catégorie des matériaux synthétiques tels que les Polyetherethercétone (PEEK), les polyethercétonecétone (PEKK) qui font partie des polymères d'arylcétone (PAEK)(55).

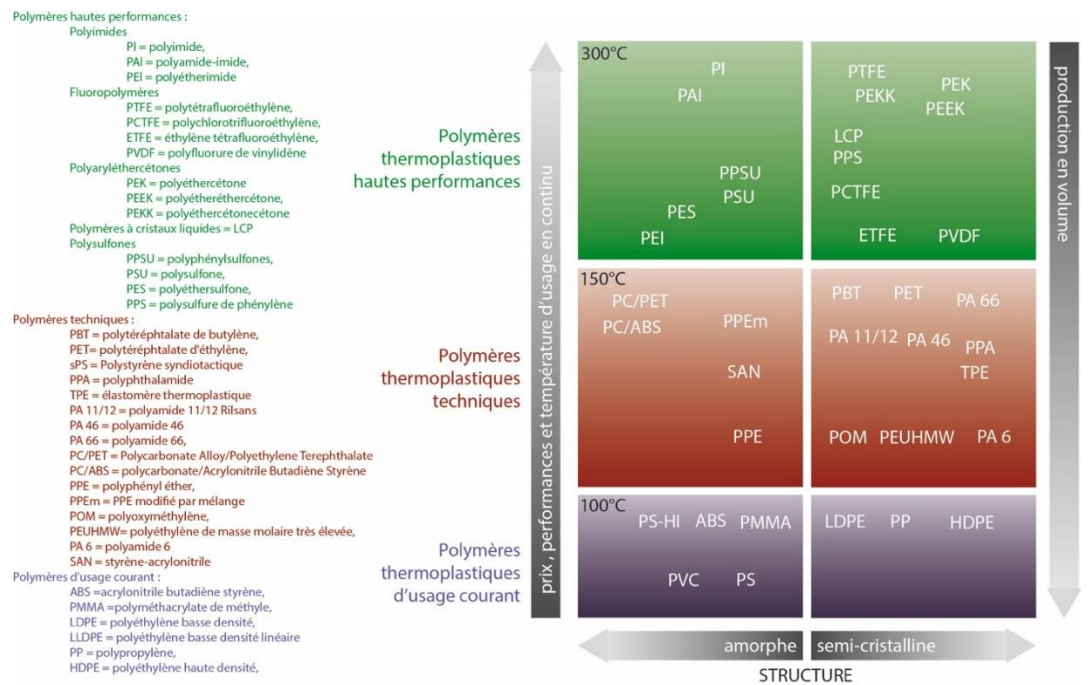


Figure 7 : Les polymères (courtoisie P.MILLET)

Tableau VII : Les différentes familles de polymères, d'après(56).

Code	Nom français	Nom anglais
PEKK	Polyéther-cétone-cétone	(Polyetherketoneketone)
PEEK	Polyéther-éther-cétone	(Polyetheretherketone)
PAEK	Polyaryléthercétone	(Polyaryletherketone)
PPS	Polysulfure de phénylène	(Poly(p-phenylene sulfide))
LCP	Polymère à cristaux liquide	(Liquid crystal polymer)
PAI	Polyamide-imide	(polyamide-imide)
PES	Polyéthersulfone	(polyethersulfone)
PEI	Polyétherimide	(Polyetherimide)
PCM	Polymères et matériaux composites	(polymer and Composite Materials)

PMMA	Polyméthacrylate de méthyle	(polymethyl methacrylate)
PC	Polycarbonate	(Polycarbonate)
PA	Polyamide	(Polyamide)
PVC	Polychlorure de Vinyle	Polyvinyl chloride

Ces matériaux présentent des forces de rétention inférieures à celles des alliages des cobalt mais une meilleure élasticité et une plus grande résistance à la déformation irréversible. Ces matériaux sont plus stables dans le temps (57).

Au niveau financier ces matériaux sont plus chers que les alliages de chrome cobalt.

*Tableau VIII : Différence entre PEEK et PEKK d'après(55)*

<b>PEEK</b>	<b>PEKK</b>
Contient deux groupes éther et un groupe cétone	Contient deux groupes cétone et un groupe éther
Température d'extrusion plus élevée presque 400°C	Température d'extrusion entre 340°C et 360°C
Température de transition vitreuse 143°C	Température de transition vitreuse 159°C
Module d'élasticité inférieure a celui du PEKK	Module d'élasticité supérieur au PEEK
Requiert un traitement de surface	Ne requiert pas de traitement de surface

Les données acquises de la science tendent à indiquer les prothèses amovibles à châssis non métalliques au patient présentant une classe III de Kennedy, avec de nombreuses dents restantes, récemment opérés et/ou allergique au métaux et/ou à la résine (58).

### 3.4.1. Le Polyéther-éther-cétone (PEEK)

Afin d'obtenir des informations sur le PEEK une recherche Pubmed a été réalisée. En utilisant les termes meSH « PEEK » AND « Dental » AND « removable denture » Pubmed nous présente 63 résultats. En excluant les études sur les prothèses implanto-portées le nombre d'articles passe à 43.

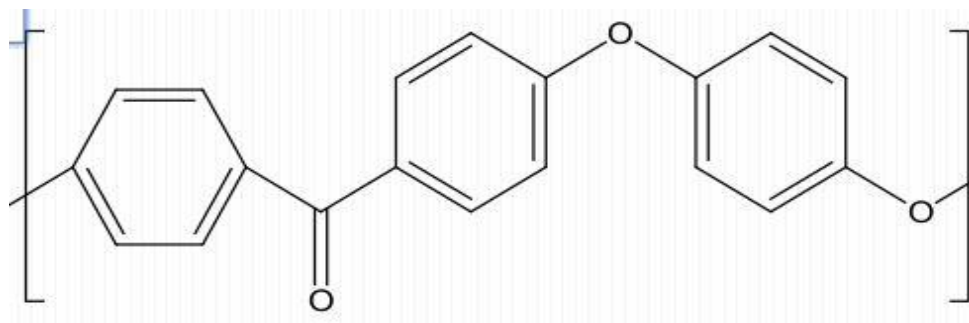
#### 3.4.1.1. Définition

Le polyéther-éther-cétone est un polymère de haute performance caractérisé par ses propriétés exceptionnelles en termes de résistance mécanique, de stabilité thermique et de résistance chimique, il appartient à la famille des polyaryléthercétone. Ce polymère thermoplastique se distingue par sa capacité à maintenir ses propriétés structurelles et

dimensionnelles dans des conditions environnementales extrêmes, telles que des températures élevées ou des environnements corrosifs (59).

Le PEEK est fabriqué à partir de 4,4'-difluorobenzophénone mélangé avec du disodium d'hydroquinone à une température de 300°C (55).

C'est un polymère thermoplastique semi-cristallin, polycyclique et aromatique.



*Figure 8 :* Schéma moléculaire du PEEK réalisé via ChemdoodleTrial.

#### 3.4.1.2. Caractéristiques techniques :

*Tableau IX :* Caractéristique technique du PEEK, d'après (59)

	<b>PEEK</b>
Module d'élasticité (GPa)	4.1
Résistance à la tension (MPa)	100
Résistance à la flexion (MPa)	165
Résistance à la pression (MPa)	135
Allongement à la rupture (%)	40
Température de fusion	340
Absorption d'eau au bout de 24H (%)	0.5
Densité (g/mL)	1.3

Le PEEK a une densité inférieure aux alliages métalliques ce qui permet d'obtenir des prothèses amovibles beaucoup plus légères donc plus confortables pour le patient.

La forte résistance à la chaleur du PEEK permet d'envisager le passage à l'autoclave des dispositifs prothétiques.

Il existe différents types de PEEK destinés à l'odontologie sur le marché.

**Tableau X :** Propriétés mécaniques et chimiques des trois types de PEEK et du PEKK commercialisés en odontologie, d'après(59)

Industriels	Marques	Teintes	Résistance traction	Résistance flexion	Module élasticité	Absorption	Solubilité	Densité
Bredent	BioHPP®(pressée) BreCAM.BioHPP®(CFAO)	B	-	180 MPa	4.6 GPa	6.5µg/cm <sup>3</sup>	0.1µg/cm <sup>3</sup>	1.4 g.cm <sup>3</sup>
Cendres+Métaux	Pektkton®(pressée) Pektkton®(CFAO)	I	115MPa	200 MPa	5 GPa	8.7µg/cm <sup>3</sup>	0.2µg/cm <sup>3</sup>	1.4 g.cm <sup>3</sup>
Evonik	VESTAKEEP®PEEK(CFAO)	N B D G	110 MPa	175 MPa	4.8 GPa	0.4%	-	1.3 à 1.5 g.cm <sup>3</sup>
Juvora	PEEK-OPTIMA™(CFAO)	D	108 MPa	170 MPa	4.2 GPa	-	-	1.3 g.cm <sup>3</sup>

Selon Pordeus les prothèses en PEEK sont esthétiquement mieux acceptés par les patients qui seraient donc moins susceptibles de revenir pour des réglages (60).

Le PEEK a des propriétés mécaniques supérieures au PMMA (poly-méthacrylate de méthyle), il possède notamment un module de Young plus élevé (61).

Le PEEK peut être modifié et voir certaines de ses capacités améliorées. C'est le cas du BioHPP® (biocompatible high-performance polymer) qui est un PEEK avec adjonction de charge de céramique (à hauteur de 20%), ces charges sont d'une taille comprise entre 0.3 et 0.5µm et sont dans une matrice résineuse. Ce matériel est fabriqué par Bredent en Allemagne (55).

Le BioHPP® possède une forte résistance à l'usure, est facile à polir et possède une faible affinité pour la plaque dentaire (55).

#### 3.4.1.3. Utilisation en prothèse amovible

Selon les données fabriquant l'épaisseur minimale d'un châssis PEEK doit être de 2mm et la largeur minimale doit être de 8 mm, les châssis en PEEK seront toujours plus épais que les châssis en Co-Cr. En regard de ces données la réalisation d'une barre linguale sur un châssis mandibulaire est inenvisageable pour un châssis en PEEK (56).

Il est donc envisageable de réaliser des châssis en PEEK néanmoins les règles d'élaboration des châssis doivent être adaptées.

Par exemple les crochets en PEEK présentent des forces de rétention inférieures à celles des crochets réalisés en alliages métalliques (62), ils doivent donc être épaissis (63) et leur tracé doit être réalisé différemment (en utilisant le design Sheffield)(64).

Néanmoins les crochets en PEEK ont une rétention supérieure aux crochets acétal à design équivalent (65).

Le design Sheffield consiste à dessiner le crochet afin qu'il soit simultanément sous et au-dessus de la ligne de plus grand contour afin de participer à la rétention et la sustentation de la prothèse (64).



*Figure 9 : Crochet en PEEK (figure de courtoisie C.MAILLET).*

Une hypothèse déclarant que ce type de design pour les crochets pourrait accentuer la quantité de plaque dentaire a été émise par El- Segai et al dans *Retention and fatigue resistance of PEEK and acetal thermoplastic resin clasps* (65).

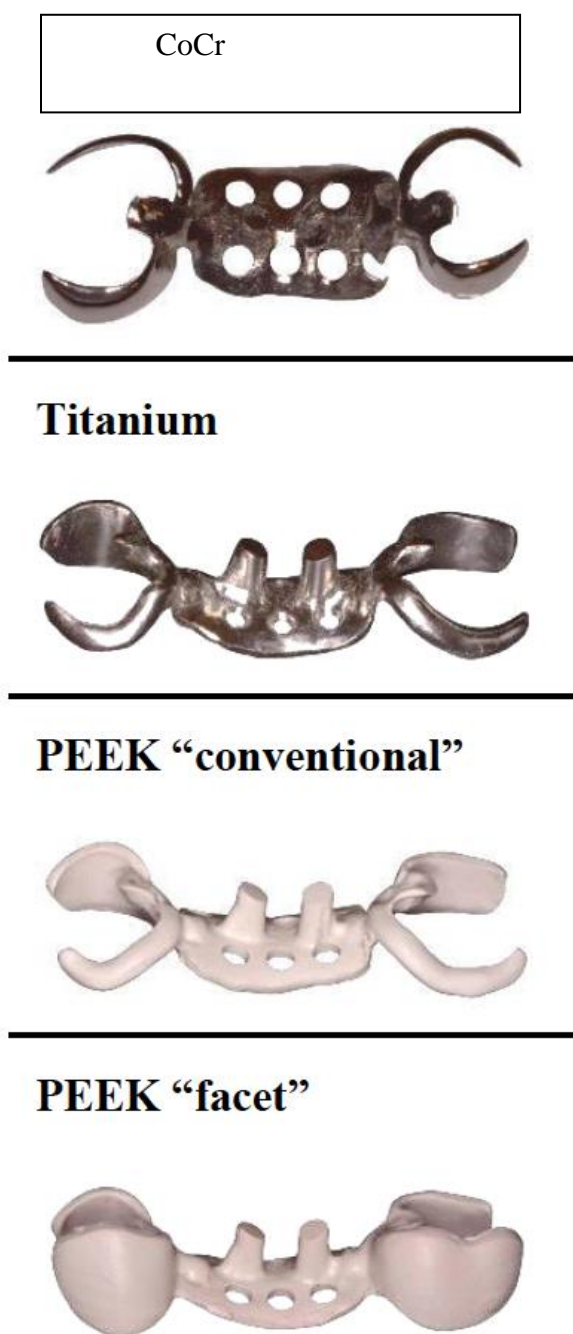
Par contre la rétention moins importante d'un châssis en PEEK est susceptible d'autoriser des mouvements prothétiques de plus grande amplitude (56).

La plus grande flexibilité du PEEK permettrait d'engendrer moins d'effet scholiodontique sur les dents supports (56).

Cette caractéristique pourrait être intéressante dans le cas de dents supports atteintes d'une perte d'attache liée à une maladie parodontale (66).

Une autre indication des châssis en PEEK pourrait être des forces de mastications trop importantes et des antécédents de fractures d'appareils amovibles. En effet le faible module d'élasticité du PEEK permet un amortissement des forces occlusales (67).

L'article *Different Polymers for the Base of Removable Dentures? Part I: A Narrative Review of Mechanical and Physical Properties.*) par Le Bars et al conclu « *PEEK seems to be an interesting alternative to the use of alloys (Cr-Co) for removable partial prostheses with reinforcement. However, improvements are needed before they can compete with metal alloys. Thus, it is desirable to increase the thickness of the PEEK prosthetic base.* » (67)



**Figure 10 :** *Design et Châssis expérimentaux en Cr-Co, Titane, PEEK et PEEK + céramique (figure courtoisie C.MAILLET).*

En comparant la distribution des forces de mastication dans un édentement mandibulaire de classe 1 de Kennedy de châssis en PEEK, en CoCr et en Titane, il a été mis en évidence que les déplacements du châssis en PEEK dans les secteurs postérieurs étaient susceptibles de causer des douleurs. Chen et al dans *A three-dimensional finite element analysis of*

*mechanical function for 4 removable partial denture designs with 3 framework materials: CoCr, Ti-6Al-4V alloy and PEEK* ont conclu que les châssis en PEEK ne devaient pas être envisagés dans le cas d'édentement non encastrés (68).

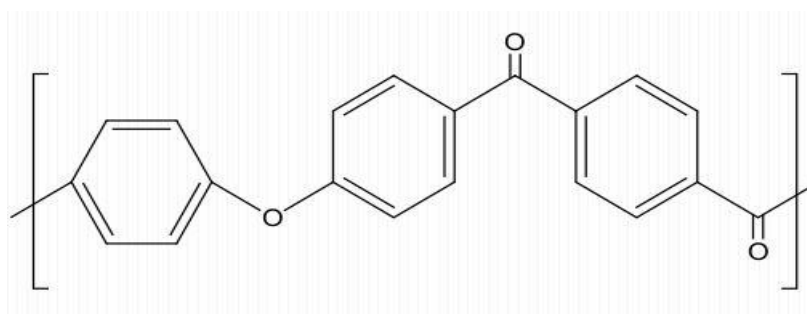
### 3.4.2. Polyethercetonecetone (PEKK)

Pour trouver des informations sur le PEKK et son usage en prothèse amovible une recherche PubMed a été réalisée. En cherchant « PEKK » and « Dental » and « Removable denture » 13 documents sont sélectionnés. En excluant les études portant sur les prothèses fixées et/ou implanto-portées il reste 6 documents. Parmi ces six documents trois étaient exploitables. Pour avoir plus de données une recherche sur science direct a été réalisée, sur les 17 documents obtenus 4 se sont révélés pertinents.

#### 3.4.2.1. Définitions

Le polyethercetonecetone (PEKK) est également de la famille des polymères d'arylcetone (PEAK).

Le PEKK est un polymère de très haut poids moléculaire avec une chaîne aromatique de polyéther-cétone. Il est produit à partir d'éther diphenylique et de chlorure de téréphtaloyle, auquel il a été ajouté du nitrobenzène et du chlorure d'aluminium. Il est différent du PEEK car une de ses fonctions éther est remplacée par une fonction cétone. Ce remplacement induit une plus grande rigidité par rapport au PEEK (55).



**Figure 11 :** Schéma moléculaire du PEKK réalisé via Chemdoodle Trial

#### 3.4.2.2. Caractéristiques techniques

**Tableau XI :** Caractéristiques du PEKK, d'après(37)

Caractéristiques	PEKK
Résistance à la flexion	200GPa

Résistance à la traction	110-115GPa
Résistance à la compression	240GPa
Densité	1.4g.cm <sup>3</sup>

Le PEKK présente des propriétés supérieures à celle du PEEK notamment en terme de résistance à la flexion, à la traction et à la compression (69). Le PEKK peut être modifié par adjonction de dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) ce qui accroît sa résistance à l'usure et sa dureté (69).

Sa structure chimique avec deux groupes cétones, par monomère permet d'augmenter la porosité du PEKK grâce à de l'acide sulfurique, ce PEKK à porosité augmentée peut être encore modifié avec des biocéramiques afin d'augmenter la biocompatibilité (ostéointégration augmentée pour les implants en PEKK) (69).

Après sablage de la surface du PEKK on peut utiliser un système adhésif afin de rajouter de la résine composite sur le PEKK (auto-mordançant ou sans mordantage l'etching est inutile sur le PEKK), dans le cadre de prothèse complète et/ou implanto-portée il est possible de réaliser les dents prothétiques en céramique sur la prothèse amovible afin d'augmenter la résistance à l'usure (69).

Le PEKK peut être imprimé en 3D par des machines avec une chambre de refroidissement inférieure à 200°C (55).

Il présente une plus grande rigidité que le Polyetherethercetone et peut être employé comme crochet sur les prothèses amovibles (70). Même si le PEEK a un plus grand potentiel en tant que matériaux pour les crochets (71).

Cependant cette plus grande rigidité implique un plus grand risque de fracture face à la torsion par rapport à des crochets en PEEK (71).

Il a été rapporté que les châssis en PEKK montrait une meilleure absorption des chocs et une plus faible concentration de contraintes que le PEEK (70).

Une étude de cas démontre que l'usage de prothèse maxillo-faciale en PEKK par CFAO est envisageable (72). Les auteurs ont mis en évidence une augmentation du confort pour le patient grâce au poids inférieur de la prothèse en PEKK et à l'esthétique des crochets en PEKK (crochets visibles car dents supports antérieures). Par contre l'étude ne suit le patient que sur six mois et il a été rapporté que polir du PEKK était plus difficile que de polir des métaux (72).

Un article du *journal of prosthetic dentistry* rapporte son utilisation dans le châssis de prothèse amovible complète implanto-portée (73).

Cet article porte néanmoins sur un cas unique et émet des réserves notamment en cas d'antécédents de bruxisme, de faible dimension verticale, de dents naturelles restantes ou de mauvaises dispositions des implants (73).

### 3.5.Problèmes liés aux alternatives non métalliques

#### 3.5.1.1. *Au niveau physique*

Les crochets en PAEK ne sont pas activables, le design des crochets doit être modifié pour obtenir des forces de rétention acceptables.

De plus il est très difficile d'envisager une réparation ou une adjonction d'éléments sur des prothèses à châssis en polymères (74).

Leur utilisation en prothèse amovible reste récente et on manque de données à long termes sur des patients (les études portent principalement sur du vieillissement in vitro).

De plus il y a peu d'études et bon nombre d'entre elles ont un niveau de preuves insuffisant (60).

#### 3.5.1.2. *Au niveau économique*

Dans la classification commune des actes médicaux les prothèses amovibles définitives à châssis sont remboursées uniquement si elles sont à châssis métalliques. Toutes les prothèses amovibles avec un châssis non métalliques sont hors nomenclature (HN)(75).

Ceci implique une absence de remboursement et la liberté de fixer les tarifs.

Les prothèses avec châssis en polymères hautes performances ayant un coût de production plus élevé et une prise en charge réduite par la sécurité sociale il est probable que peu de patients opteront pour cette solution.

En dehors d'un changement de législation la diffusion de ce type de prothèse restera confidentielle en France (Patient présentant une allergie au titane).

## Conclusion

Il a été démontré que le cobalt et ses alliages n'étaient pas des matériaux parfaits. Son exploitation en RDC est liée à des violations des droits humains. Les gisements de cobalt ne sont pas infinis et la demande ne cesse d'augmenter au vu de son rôle dans la transition énergétique. Les experts prédisent l'épuisement des stocks connus vers 2040.

Au niveau sanitaire les travailleurs exposés au cobalt risquent des pathologies, comme les dermatites de contact, des allergies, des problèmes pulmonaires et plus rarement des cancers broncho-pulmonaires. Certains types de prothèses de hanches au cobalt ont causé des intoxications locales et systémiques au cobalt créant de fait une réputation sulfureuse au cobalt. En odontologie quelques allergies ont été signalées ainsi que des irritations et des intolérances mais en aucun cas des événements indésirables d'aussi grande ampleur n'ont été rapportés.

Il semble que le châssis de prothèse amovible en Cr-Co soit une victime collatérale de la réputation sulfureuse des prothèses de hanche au Cobalt et de l'application généraliste des normes européennes.

Au niveau des biomatériaux susceptible de remplacer le Cr-Co dans les châssis le titane et ses alliages représentent le meilleur compromis. Il est certes un peu plus difficile à travailler pour le prothésiste mais les concepts prothétiques nécessaires à l'élaboration d'une prothèse amovible châssis en Cr-Co sont toujours d'actualité avec le Titane. Contrairement au PAEK le châssis en titane est modifiable et réparable ce qui est une qualité indispensable dans le cadre de la prothèse amovible. De plus la prothèse titane est compatible avec la CCAM ce qui permettra le remboursement des patients. Et enfin le titane étant moins dense que le Cr-Co les prothèses en titane seront plus confortables pour les patients.

Il est malgré tout indispensable de garder à l'esprit que les panacées relèvent de la fiction, chaque patient est unique et son édentement aussi. Le titane représente le meilleur compromis de manière générale et non de manière universelle. Il existe et existera toujours des patients pour qui d'autres biomatériaux seront plus adaptés.

## Bibliographie

1. Burger MH, Schmeda G, Long KR, Reyes TA, Karl NA. Cobalt Deposits in the United States.
2. Savinova E, Evans C, Lèbre É, Stringer M, Azadi M, Valenta RK. Will global cobalt supply meet demand? The geological, mineral processing, production and geographic risk profile of cobalt. *Resour Conserv Recycl.* mars 2023;190:106855.
3. Shedd K b. 2018 Minerals Yearbook U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey COBALT.
4. Yu Z, Wang Y, Ma X, Shuai C, Zhao Y. How critical mineral supply security affects China NEVs industry? Based on a prediction for chromium and cobalt in 2030. *Resour Policy.* août 2023;85:103861.
5. Khurshid A, Chen Y, Rauf A, Khan K. Critical metals in uncertainty: How Russia-Ukraine conflict drives their prices? *Resour Policy.* août 2023;85:104000.
6. Guo Y, Li Y, Liu Y, Zhang H. The impact of geopolitical relations on the evolution of cobalt trade network from the perspective of industrial chain. *Resour Policy.* août 2023;85:103778.
7. Nygaard A. The Geopolitical Risk and Strategic Uncertainty of Green Growth after the Ukraine Invasion: How the Circular Economy Can Decrease the Market Power of and Resource Dependency on Critical Minerals. *Circ Econ Sustain.* juin 2023;3(2):1099-126.
8. Gulley AL. One hundred years of cobalt production in the Democratic Republic of the Congo. *Resour Policy.* déc 2022;79:103007.
9. Rubbers B. L'effondrement de la Générale des Carrières et des Mines. *Cah D'études Afr.* mars 2006;46(181):115-33.
10. Anwani S, Methekar R, Ramadesigan V. Resynthesizing of lithium cobalt oxide from spent lithium-ion batteries using an environmentally benign and economically viable recycling process. *Hydrometallurgy.* nov 2020;197:105430.
11. EUR-Lex. Règlement (UE) n° 2023/1542 du Parlement européen et du Conseil du 12/07/23 relatif aux batteries et aux déchets de batteries, modifiant la directive 2008/98/CE et le règlement (UE) n° 2019/1020, et abrogeant la directive n° 2006/66/CE | AIDA [Internet]. [cité 18 mars 2024]. Disponible sur: <https://aida.ineris.fr/reglementation/reglement-ue-ndeg-20231542-parlement-europeen-conseil-120723-relatif-batteries>
12. Bureau Of International Labor Affairs. List of Goods Produced by Child Labor or Forced Labor [Internet]. [cité 20 févr 2024]. Disponible sur: <http://www.dol.gov/agencies/ilab/reports/child-labor/list-of-goods>

13. République Démocratique du Congo. « Voilà pourquoi on meurt » Les atteintes aux droits humains en République Démocratique du Congo alimentent le commerce mondial du cobalt [Internet]. [cité 16 mars 2022]. Disponible sur: <https://www.amnesty.org/fr/documents/afr62/3183/2016/fr/>
14. Katz-Lavigne S. Distributional impact of corporate extraction and (un)authorised clandestine mining at and around large-scale copper- and cobalt-mining sites in DR Congo. *Resour Policy*. mars 2020;65:101584.
15. Kayembe-Kitenge T, Musa Obadia P, Kasole Lubala T, Mbuyi-Musanzay S, Katoto P, Kalenga Ilunga G, et al. Incidence of congenital malformations and proximity to mining in Lubumbashi, DR Congo. *Environ Epidemiol*. oct 2019;3:194.
16. Van Brusselen D, Kayembe-Kitenge T, Mbuyi-Musanzayi S, Lubala Kasole T, Kabamba Ngombe L, Musa Obadia P, et al. Metal mining and birth defects: a case-control study in Lubumbashi, Democratic Republic of the Congo. *Lancet Planet Health*. avr 2020;4(4):e158-67.
17. EUR-Lex. Règlement délégué (UE) 2020/217 de la Commission du 4 octobre 2019 modifiant, aux fins de son adaptation au progrès technique et scientifique, le règlement (CE) no 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges et corrigeant ce règlement (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) [Internet]. [cité 14 févr 2024]. Disponible sur: [http://data.europa.eu/eli/reg\\_del/2020/217/oj/fra](http://data.europa.eu/eli/reg_del/2020/217/oj/fra)
18. Boisset P de. Méthodologie d'évaluation des substances cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques et/ou présentant un effet perturbateur endocrinien dans le cadre d'appels d'offres de dispositifs médicaux stériles [Mémoire de DES]. [Grenoble]: Université Grenoble Alpes, Facultés de Pharmacie; 2020.
19. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. La réglementation REACH [Internet]. [cité 17 févr 2024]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-reach>
20. Légifrance. Directive 93/42/CEE du Conseil, du 14 juin 1993, relative aux dispositifs médicaux [Internet]. [cité 17 févr 2024]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000339724>
21. Romain A. Parcours du dispositif médical en France [Internet]. [cité 17 févr 2024]. Disponible sur: [https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2009-12/guide\\_pratique\\_dm.pdf](https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2009-12/guide_pratique_dm.pdf)
22. Légifrance. Ordonnance n° 2022-582 du 20 avril 2022 portant adaptation du droit français au règlement (UE) 2017/745 du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2017 relatif aux dispositifs médicaux [Internet]. [cité 17 févr 2024]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045614779>
23. Légifrance. Décret n°2000-214 du 7 mars 2000 révisant et complétant les tableaux de maladies professionnelles annexés au livre IV du code de la sécurité sociale (deuxième

- partie : Décrets en Conseil d'Etat) [Internet]. [cité 19 févr 2024]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000006779516/2000-03-09/>
24. INRS. Régime Général Tableau 70 : Tableau des maladies professionnelles [Internet]. [cité 19 févr 2024]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/publications/bdd/mp/tableau.html?refINRS=RG%2070>
  25. Robert A. Analyse temporelle des expositions et des pathologies professionnelles françaises liées au cobalt et aux poussières de métaux durs, de la fin des années 1990 à 2020 [Thèse d'exercice]. [Grenoble]: Université Grenoble Alpes, Faculté de Pharmacie; 2021.
  26. Wataha JC. Biocompatibility of dental casting alloys: a review. *J Prosthet Dent.* févr 2000;83(2):223-34.
  27. Stenberg T. Release of cobalt from cobalt chromium alloy constructions in the oral cavity of man. *Scand J Dent Res.* déc 1982;90(6):472-9.
  28. Sokołowski J, Zieliński A, Brzeziński P, Łukomska-Szymańska M. Cytological response of palatal epithelium to TiN-coated CoCr alloy denture. *Folia Histochem Cytobiol.* avr 2012;50(1):104-10.
  29. Grosogeat B, Vaicelyte A, Gauthier R, Janssen C, Le Borgne M. Toxicological Risks of the Cobalt–Chromium Alloys in Dentistry: A Systematic Review. *Materials.* août 2022;15(17):5801.
  30. Mistretta V, Kurth W, Charlier C. Les prothèses de hanche au cobalt sont-elles dangereuses ? *Med Sci.* août 2016;32(8-9):732-8.
  31. ANSM. Surveillance des prothèses de hanche [Internet]. [cité 20 févr 2024]. Disponible sur: [https://archive.ansm.sante.fr/Activites/Surveillance-des-dispositifs-medicaux-implantables/Surveillance-des-protheses-de-hanche/\(offset\)/1](https://archive.ansm.sante.fr/Activites/Surveillance-des-dispositifs-medicaux-implantables/Surveillance-des-protheses-de-hanche/(offset)/1)
  32. Vullo PA, Olivera Moreno D, Crego Vita D. Haemodynamic instability during hip prosthesis removal due to metallosis: An acute chrome/cobalt intoxication? A case report. *Int J Surg Case Rep.* mai 2022;94:107033.
  33. Biglia A, Morandi V, Monti S, Delvino P, Cavagna L, Montecucco C. Cobalt hip prosthesis intoxication mimicking an autoimmune disease. *Jt Bone Spine.* déc 2020;87(6):652-4.
  34. Pratt NL, Cicuttini FM, Wang Y, Graves SE. No increased risk of cancer associated with metal-on-metal or ceramic-on-ceramic procedures compared to other bearing surfaces in patients with total hip arthroplasty: A nationwide linked registry cohort analysis of 167,837 patients. *PloS One.* nov 2022;17(11):e0278241.
  35. ECHA. Rôle des essais dans le CLP [Internet]. [cité 20 févr 2024]. Disponible sur: <https://echa.europa.eu/fr/testing-clp>

36. Jacquot B. Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie [Internet]. [cité 9 févr 2024]. Disponible sur: <https://archives.uness.fr/sites/campus-unf3s-2014/odontologie/enseignement/chap4/site/html/cours.pdf>
37. Baudouin L. Utilisation des PAEK en odontologie prothétique: applications cliniques actuelles et perspectives [Thèse d'exercice]. [Nancy]: Université de Lorraine, Faculté d'odontologie; 2018.
38. Mercieca S, Caligari Conti M, Buhagiar J, Camilleri J. Assessment of corrosion resistance of cast cobalt- and nickel-chromium dental alloys in acidic environments. *J Appl Biomater Funct Mater.* janv 2018;16(1):47-54.
39. Eliaz N. Corrosion of Metallic Biomaterials: A Review. *Mater Basel.* janv 2019;12(3):E407.
40. Barazanchi A, Li KC, Al-Amleh B, Lyons K, Waddell JN. Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. *J Prosthodont.* févr 2017;26(2):156-63.
41. Nakata T, Shimpo H, Ohkubo C. Clasp fabrication using one-process molding by repeated laser sintering and high-speed milling. *J Prosthodont Res.* juill 2017;61(3):276-82.
42. March PD. Châssis de prothèse amovible : cobalt-chrome ou alliages de titane ? [Internet]. [cité 14 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.information-dentaire.fr/actualites/chassis-de-prothese-amovible-cobalt-chrome-ou-alliages-de-titane/>
43. Saeed F, Muhammad N, Khan AS, Sharif F, Rahim A, Ahmad P, et al. Prosthodontics dental materials: From conventional to unconventional. *Mater Sci Eng C.* janv 2020;106:110167.
44. Argibaia C. Mise au point sur l'allergie au titane en Odontologie [Thèse d'exercice]. [Nancy]: Université de Lorraine, Faculté d'odontologie; 2012.
45. Oluwajana F, Walmsley AD. Titanium alloy removable partial denture framework in a patient with a metal allergy: a case study. *Br Dent J.* août 2012;213(3):123-4.
46. Jang KS, Youn SJ, Kim YS. Comparison of castability and surface roughness of commercially pure titanium and cobalt-chromium denture frameworks. *J Prosthet Dent.* juill 2001;86(1):93-8.
47. Blackman R, Barghi N, Tran C. Dimensional changes in casting titanium removable partial denture frameworks. *J Prosthet Dent.* févr 1991;65(2):309-15.
48. Srimaneepong V, Yoneyama T, Wakabayashi N, Kobayashi E, Hanawa T, Doi H. Deformation Properties of Ti-6Al-7Nb Alloy Castings for Removable Partial Denture Frameworks. *Dent Mater J.* déc 2004;23(4):497-503.
49. Bridgeman JT, Marker VA, Hummel SK, Benson BW, Pace LL. Comparison of titanium and cobalt-chromium removable partial denture clasps. *J Prosthet Dent.* août 1997;78(2):187-93.

50. Rodrigues RCS, Ribeiro RF, de Mattos M da GC, Bezzon OL. Comparative study of circumferential clasp retention force for titanium and cobalt-chromium removable partial dentures. *J Prosthet Dent.* sept 2002;88(3):290-6.
51. Ohkubo C, Sato Y, Nishiyama Y, Suzuki Y. Titanium removable denture based on a one-metal rehabilitation concept. *Dent Mater J.* sept 2017;36(5):517-23.
52. Katsoulis J, Fischer J, Huber S, Balmer S, Mericske-Stern R. [Titanium-alloy vs. CoCr-alloy in removable partial dentures--a clinical study]. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.* 2008;118(11):1040-6.
53. Mellado-Valero A, Igual Muñoz A, Guiñón Pina V, Sola-Ruiz MF. Electrochemical Behaviour and Galvanic Effects of Titanium Implants Coupled to Metallic Suprastructures in Artificial Saliva. *Materials.* janv 2018;11(1):171.
54. Ohkubo C, Hanatani S, Hosoi T. Present status of titanium removable dentures--a review of the literature. *J Oral Rehabil.* sept 2008;35(9):706-14.
55. Maloo LM, Toshniwal SH, Reche A, Paul P, Wanjari MB. A Sneak Peek Toward Polyaryletherketone (PAEK) Polymer: A Review. *Cureus.* nov 2022;14(11):e31042.
56. Picart B, Lambert E. PEEK vs Cr-Co : comparaison de deux types de châssis de prothèse amovible partielle. *Strat Prothétique.* juin 2016;(3).
57. Micovic D, Mayinger F, Bauer S, Roos M, Eichberger M, Stawarczyk B. Is the high-performance thermoplastic polyetheretherketone indicated as a clasp material for removable dental prostheses? *Clin Oral Investig.* mai 2021;25(5):2859-66.
58. Mendoza-Carrasco I, Hotta J, Sugio CC, Procópio AF, Urban V, Mosquim V, et al. Nonmetal clasp dentures: What is the evidence about their use? *J Indian Prosthodont Soc.* juill 2020;20(3):278.
59. Polycarpe M. Intérêts du polyetheretherketone en odontologie prothétique [Thèse d'exercice]. [Aix Marseille]: Université d'Aix Marseille, faculté d'odontologie; 2020.
60. Gama LT, Bezerra AP, Schimmel M, Rodrigues Garcia RCM, de Luca Canto G, Gonçalves TMSV. Clinical performance of polymer frameworks in dental prostheses: A systematic review. *J Prosthet Dent.* avr 2022;
61. Muhsin SA, Hatton PV, Johnson A, Sereno N, Wood DJ. Determination of Polyetheretherketone (PEEK) mechanical properties as a denture material. *Saudi Dent J.* juill 2019;31(3):382-91.
62. Gentz FI, Brooks DI, Liacouras PC, Petrich A, Hamlin CM, Ellert DO, et al. Retentive Forces of Removable Partial Denture Clasp Assemblies Made from Polyaryletherketone and Cobalt-Chromium: A Comparative Study. *J Prosthodont.* avr 2022;31(4):299-304.
63. Zheng J, Aarts JM, Ma S, Waddell JN, Choi JJE. Fatigue behavior of removable partial denture cast and laser-sintered cobalt-chromium (CoCr) and polyetheretherketone (PEEK) clasp materials. *Clin Exp Dent Res.* déc 2022;8(6):1496-504.

64. Gray D, Barraclough O, Ali Z, Nattress B. Modern partial dentures - part 2: a review of novel metal-free materials and innovations in polymers. *Br Dent J.* juin 2021;230(12):813-8.
65. El-Segai A, Abbas M. Retention and fatigue resistance of PEEK and acetal thermoplastic resin clasps. *Egypt Dent J.* oct 2018;64(4):4019-25.
66. Kumar N, Koli DK, Jain V, Nanda A. Stress distribution and patient satisfaction in flexible and cast metal removable partial dentures: Finite element analysis and randomized pilot study. *J Oral Bio Craniofac Res.* oct 2021;11(4):478-85.
67. Le Bars P, Bandiaky ON, Le Guéhennec L, Clouet R, Kouadio AA. Different Polymers for the Base of Removable Dentures? Part I: A Narrative Review of Mechanical and Physical Properties. *Polymers.* août 2023;15(17):3495.
68. Chen X, Mao B, Zhu Z, Yu J, Lu Y, Zhang Q, et al. A three-dimensional finite element analysis of mechanical function for 4 removable partial denture designs with 3 framework materials: CoCr, Ti-6Al-4V alloy and PEEK. *Sci Rep.* sept 2019;9(1):13975.
69. Alqurashi H, Khurshid Z, Syed AUY, Rashid Habib S, Rokaya D, Zafar MS. Polyetherketoneketone (PEKK): An emerging biomaterial for oral implants and dental prostheses. *J Adv Res.* févr 2021;28:87-95.
70. Zol SM, Alauddin MS, Said Z, Mohd Ghazali MI, Hao-Ern L, Mohd Farid DA, et al. Description of Poly(aryl-ether-ketone) Materials (PAEKs), Polyetheretherketone (PEEK) and Polyetherketoneketone (PEKK) for Application as a Dental Material: A Materials Science Review. *Polymers.* janv 2023;15(9):2170.
71. Lee W-F, Chen M-S, Peng T-Y, Huang P-C, Nikawa H, Peng P-W. Comparative analysis of the retention force and deformation of PEEK and PEKK removable partial denture clasps with different thicknesses and undercut depths. *J Prosthet Dent.* déc 2023;
72. Sun F, Shen X, Zhou N, Gao Y, Guo Y, Yang X, et al. A speech bulb prosthesis for a soft palate defect with a polyetherketoneketone (PEKK) framework fabricated by multiple digital techniques: A clinical report. *J Prosthet Dent.* oct 2020;124(4):495-9.
73. Dawson JH, Hyde B, Hurst M, Harris BT, Lin W-S. Polyetherketoneketone (PEKK), a framework material for complete fixed and removable dental prostheses: A clinical report. *J Prosthet Dent.* juin 2018;119(6):867-72.
74. Gray D, Barraclough O, Ali Z. Newer Generation Denture Materials. *Dent Abstr.* janv 2022;67(1):47-9.
75. L'Assurance Maladie. CCAM en ligne [Internet]. [cité 12 févr 2024]. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/accueil-de-la-ccam/telechargement/index.php>

## Table des matières

<b>Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>1.....Le cobalt définition, utilisations aspects économiques et éthiques</b>	<b>4</b>
.....	4
<b>1.1. Qu'est-ce que le cobalt ? .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Production, réserve et besoin en cobalt dans le monde.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. L'exploitation du cobalt en RDC historique, situation actuelle et enjeux géopolitiques liés .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. Le cobalt est-il recyclable ? .....</b>	<b>8</b>
<b>1.5. L'exploitation du cobalt est-elle éthique ? .....</b>	<b>9</b>
<b>1.6. En résumé.....</b>	<b>10</b>
<b>2.....Pourquoi l'interdiction du cobalt dans les dispositifs médicaux</b>	<b>11</b>
.....	11
<b>2.1. Réglementations concernant les dispositifs médicaux et les substances chimiques. 11</b>	<b>11</b>
<b>2.2. Les causes du changement de réglementations du cobalt.....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Des risques pour les travailleurs exposés au cobalt.....	12
2.2.2. Les événements indésirables liés au cobalt dans les dispositifs médicaux.....	14
2.2.2.1. En odontologie .....	14
2.2.2.2. Dans les autres dispositifs médicaux .....	15
2.2.3. Le fonctionnement de ECHA et la classification CMR du cobalt .....	17
<b>2.3. En résumé.....</b>	<b>17</b>
<b>3..... Les utilisations et alternatives au cobalt en odontologie.</b>	<b>18</b>
.....	18
<b>3.1. Utilisation en prothèse amovible.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Les propriétés mécaniques et les tests associés.....</b>	<b>18</b>
3.2.1. Contrainte et déformation .....	19

3.2.2.	La densité .....	19
3.2.3.	Résistance à la flexion .....	19
3.2.4.	Résistance à la traction .....	20
3.2.5.	Module de Young ou module d'élasticité .....	21
3.2.6.	Résistance à la compression .....	22
3.2.7.	Résistance à la fatigue.....	22
<b>3.3.</b>	<b>Alternatives métalliques .....</b>	<b>22</b>
3.3.1.	Le titane et ses alliages .....	23
3.3.1.1.	Au niveau économique .....	24
3.3.1.2.	Au niveau mécanique.....	24
3.3.1.3.	Compatibilité avec les autres métaux/alliages .....	27
3.3.1.4.	Aspects négatifs de l'usage du titane.....	28
<b>3.4.</b>	<b>Alternatives non métalliques au cobalt. ....</b>	<b>29</b>
3.4.1.	Le Polyéther-éther-cétone (PEEK).....	30
3.4.1.1.	Définition .....	30
3.4.1.2.	Caractéristiques techniques : .....	31
3.4.1.3.	Utilisation en prothèse amovible .....	32
3.4.2.	Polyethercetonecetone (PEKK) .....	36
3.4.2.1.	Définitions .....	36
3.4.2.2.	Caractéristiques techniques.....	36
<b>3.5.</b>	<b>Problèmes liés aux alternatives non métalliques.....</b>	<b>38</b>
3.5.1.1.	Au niveau physique.....	38
3.5.1.2.	Au niveau économique .....	38
	<b>Conclusion .....</b>	<b>39</b>
	<b>Bibliographie (Style : Titre Centré).....</b>	<b>40</b>
	<b>Table des matières.....</b>	<b>46</b>
	<b>Table des figures.....</b>	<b>48</b>
	<b>Table des tableaux.....</b>	<b>49</b>

## Table des figures

<b>Figure 1 :</b>	<i>Graphique représentant la production et les réserve exploitables de cobalt en 2023, d'après(1) ..</i>	5
<b>Figure 2 :</b>	<i>Test de flexion trois points, Millet .....</i>	20
<b>Figure 3 :</b>	<i>Machines d'essai bicolonne et monocolonne pour test de traction simple (Dessin P. MILLET).....</i>	21
<b>Figure 4 :</b>	<i>Exemple de courbe contrainte/déformation (P. MILLET) .....</i>	21
<b>Figure 5 :</b>	<i>Test de compression simple, P.MILLET .....</i>	22
<b>Figure 6 :</b>	<i>Graphique des publications obtenues sur PubMed avec recherche restreinte. ....</i>	23
<b>Figure 7 :</b>	<i>Les polymères par MILLET. ....</i>	29
<b>Figure 8 :</b>	<i>Schéma moléculaire du PEEK réalisé via ChemdoodleTrial. ....</i>	31
<b>Figure 9 :</b>	<i>Crochet en PEEK par MAILLET. ....</i>	33
<b>Figure 10 :</b>	<i>Châssis expérimental en Cr.Co, Titane, PEEK et PEEK + céramique. Par MAILLET. ....</i>	35
<b>Figure 11 :</b>	<i>Schéma moléculaire du PEKK réalisé via Chemdoodle Trial .....</i>	36

## Table des tableaux

<b>Tableau I :</b>	<i>Exploitation minière du cobalt par pays et réserve en 2023, d'après (1) .....</i>	<i>5</i>
<b>Tableau II :</b>	<i>Significations des catégories CMR, d'après l'ANSM .....</i>	<i>11</i>
<b>Tableau III :</b>	<i>Affections professionnels provoqués par le cobalt et ses composés, d'après (24) .....</i>	<i>13</i>
<b>Tableau IV :</b>	<i>Les différents alliages de cobalt utilisés dans les biomatériaux, d'après (39) .....</i>	<i>24</i>
<b>Tableau V :</b>	<i>Les différents grades de titane commercialement pur et leurs caractéristiques d'après (46) ..</i>	<i>26</i>
<b>Tableau VI :</b>	<i>Masse atomiques et poids des différents métaux d'après (46) .....</i>	<i>29</i>
<b>Tableau VII :</b>	<i>Les différentes familles de polymères, d'après (55).....</i>	<i>31</i>
<b>Tableau VIII :</b>	<i>Différence entre PEEK et PEKK d'après (54).....</i>	<i>31</i>
<b>Tableau IX :</b>	<i>Caractéristique technique du PEEK, d'après (58).....</i>	<i>33</i>
<b>Tableau X :</b>	<i>Propriétés mécanique et chimiques des trois types de PEEK et du PEKK commercialisés en odontologie, d'après (58) .....</i>	<i>33</i>
<b>Tableau XI :</b>	<i>Caractéristiques du PEKK, d'après (37).....</i>	<i>36</i>

**COPEAU, Gautier**

Alternatives au cobalt en prothèse amovible

Thèse d'exercice. Chirurgie-Dentaire. Reims : 2024

RÉSUMÉ :

*Depuis 2017 le cobalt fait partie des matériaux CMR, ce qui limite fortement son utilisation dans les dispositifs médicaux. Or les alliages de cobalt sont couramment employés dans les châssis des prothèses dentaires amovibles. Trouver des alternatives est donc nécessaire.*

Mots clés MeSH :

*Odontologie, Prothèse dentaire Partielle Amovible, Titane, Cobalt, Polymères*

JURY

Président : Pr MILLET Pierre

Assesseurs : Dr MAILLET Christina

Dr JOURDAIN Marie Laure

Dr DRIAU Jean Paul