

La liaison céramo-métallique

Société Francophone de Biomatériaux Dentaires

J. DEJOU

Date de création du document 2009-2010

Table des matières

I	Emaillage et liaison céramo métallique.....	3
II	Qualités requises pour un système céramo-métallique.....	7
III	L'adhésion métal-céramique.....	8
III.1	Oxydation à haute température.....	8
III.2	Les alliages précieux.....	8
III.3	Les alliages non précieux	9
IV	Evaluation de l'adhésion métal-céramique.....	12
V	Les céramiques pour CCM.....	13
VI	Les alliages pour CCM.....	14
VI.1	Composition et propriétés des alliages nobles.....	14
VI.2	Composition et propriétés des alliages non précieux	16
VII	Préparation des restaurations céramo-métalliques.....	18

OBJECTIFS

Mettre en évidence les principes qui déterminent une liaison métal-céramique fiable en montrant le lien existant entre les propriétés physiques des matériaux utilisés et la qualité de l'adhésion de la céramique sur l'alliage métallique.

INTRODUCTION

Les qualités esthétiques des céramiques peuvent être combinées avec la résistance des alliages pour produire des restaurations qui possèdent à la fois une apparence naturelle et de très bonnes qualités mécaniques : les restaurations céramo-métalliques.

Jusqu'au début des années 1980, seule cette technique permettait d'utiliser avec fiabilité un matériau, la céramique, présentant à cette époque des propriétés mécaniques très médiocres. Depuis l'apparition des céramiques alumineuses et/ou à base de zircon, on peut s'affranchir de l'utilisation des alliages lors de la réalisation de restaurations. On appelle ces restaurations sans alliages métalliques des restaurations céramo-céramiques. Cependant les restaurations céramo-métalliques sont encore très souvent utilisées dans de nombreuses situations cliniques qui ne peuvent pas être résolues sans l'utilisation d'une infrastructure métallique.

I EMAILLAGE ET LIAISON CÉRAMO MÉTALLIQUE

La qualité d'une liaison céramo métallique est sous la dépendance de trois modes principaux d'interactions intervenant entre l'alliage et la céramique lors de la cuisson et au cours du refroidissement :

- **Le premier** est d'ordre physico-chimique. Il se caractérise par la mouillabilité de la céramique en fusion à la surface du substrat métallique. La capacité de mouillage de la céramique est contrôlée par sa tension superficielle à la température de cuisson, par l'énergie de surface du substrat métallique, et par la nature des interactions à l'interface. On obtient un bon étalement de la céramique en fusion en augmentant l'énergie superficielle de l'alliage par une oxydation préalable.
- **Le deuxième** est d'ordre chimique. Il détermine la nature de la liaison qui se crée aux différentes interfaces entre céramique, oxydes de surface et métal. Cette liaison, difficile à caractériser expérimentalement, dépend de la composition et de la microstructure de l'alliage, ainsi que de la nature de la céramique. Elle est l'aboutissement de phénomènes complexes d'oxydo-réduction aux interfaces, consécutifs aux interdiffusions ou migrations ioniques se produisant lors de la cuisson.

- **Le troisième** est d'ordre mécanique. Il résulte de deux phénomènes.
 - l'ancrage de la céramique après refroidissement dans les rugosités; de surface de l'alliage. L'observation des interfaces céramo métalliques révèle deux formes de rugosités bien distinctes: celles qui proviennent d'un traitement de surface de l'alliage avant la cuisson, d'ordre macroscopique (p. ex. sablage), et celles d'ordre microscopique qui se créent lors de la cuisson par dissolution sélective de certaines phases de l'alliage, généralement localisées dans les espaces inter-dendritiques;
 - la mise en compression de la céramique à l'interface due à une légère différence de contraction entre l'alliage et la céramique lors du refroidissement. Cette précontrainte de la céramique (fretage) est mécaniquement favorable, puisqu'elle permet de s'opposer à l'initiation ou la propagation des fissures à partir des défauts interfaciaux. Elle nécessite une contraction supérieure de l'alliage.

En pratique, l'établissement d'une liaison de qualité entre un alliage et une céramique requiert successivement les conditions suivantes:

- **Sélection d'un alliage de haut module d'élasticité, dont le *solidus* est supérieur d'au moins 100 °C à la température de cuisson des premières couches de céramique opaque (980°C).** La rigidité élevée des alliages à base de nickel et à base de cobalt leur confère une excellente résistance à la déformation lors des cycles de cuisson; cette qualité est primordiale pour la stabilité dimensionnelle des travées de longue portée;
- **Création à la surface de l'infrastructure de rugosités par sablage**, afin d'améliorer l'ancrage de la céramique. Ce traitement de surface mécanique est suivi d'un nettoyage et d'un dégraissage scrupuleux;
- **Formation par traitement thermique préalable d'une pellicule d'oxydes stable et adhérente à la surface de l'armature métallique.** Pour être mécaniquement résistante, cette couche d'oxydes doit avoir une faible épaisseur et une bonne homogénéité chimique. Ce critère paraît plus accessible aux alliages à base de nickel, dont la cinétique de formation d'oxydes est plus faible que celle des alliages à base de cobalt. Toutefois, le rôle des principaux constituants apparaît moins déterminant que celui de certaines additions mineures telles que le béryllium ou certaines terres rares qui contribuent à promouvoir la formation de couches d'oxydes fines et adhérentes. On peut mettre également en oeuvre un traitement thermique d'homogénéisation de l'infrastructure métallique pour obtenir une couche d'oxydes de composition plus régulière. Pour cela, la première pellicule

d'oxydes formée lors de ce recuit doit être éliminée par sablage, et un second traitement thermique conduira à la formation de la couche d'oxydes définitive;

- **Application rigoureuse du protocole d'émaillage préconisé pour la céramique utilisée** car on observe en effet des variations importantes, notamment dans le comportement dilatométrique, d'une marque à l'autre. Certaines céramiques conviennent mieux à l'utilisation sur des infrastructures en alliage de métaux précieux, alors que d'autres sont mieux adaptées à l'émaillage d'armatures en alliages non-précieux. On veillera particulièrement à respecter la cinétique de refroidissement: des variations dans la vitesse de refroidissement peuvent induire des modifications dans le mode de contraction de la céramique. Un accord dilatométrique précis entre l'alliage et les céramiques opaques entre 650°C et la température ambiante apparaît donc comme une condition nécessaire, mais pas suffisante.

La résistance de la liaison céramo métallique obtenue entre un alliage non noble (Ni Cr Mo ou Co Cr W) peut atteindre des valeurs comparables à celles observées avec des alliages TCM à base de métaux nobles, voire même nettement plus élevée. La détermination de cette grandeur reste cependant très difficile, et la comparaison entre les résultats obtenus à l'aide des multiples techniques proposées reste très difficile, comme le montre la comparaison effectuée dans le **tableau 1**.

Tableau 1 : Résistance de la liaison céramo métallique

Comparaison des valeurs selon diverses méthodes (D'après H.F. Kappert, 1989)					
Type	Alliage	Schwickerath	Schm/Schu	DIN 1155	Voss
		N	N/mm2	N	N
Au-Pt	Degudent U	10		55	1.150
Pd-Cu	Albabond E	12	27	59	1.000
Pd-Cu	Bond-On 4	11	24	55	900
Pd-Cu	Begopal	14	25	58	1.120
Pd-Cu	Cerapall 2	13		58	1.600
Pd-Ag	Pors-On 4	11	34	57	1.200
Pd-Ag	Aibabond			60	1.400
Pd-Ag	Begopa;S	12	29	58	1.800
Pd-Ag	Ceradelta	12		56	1.350
Co-Cr-Mo	Dentitan	09	28	60	1.350
Ni-Cr-Mo	Elite	09	29	58	
Ni-Cr-Mo	Wiron 88	10		59	
Ni-Cr-Mo	VI Comp			59	
Ni-Cr-Mo	NP 2 (50 um)	14	24		1.000
Ni-Cr-Mo	NP2 (250 um)	15			

09 : Valeur la plus faible pour ce type d'essai

14 : Valeur la plus forte pour ce type d'alliage

Schwickerath: Essai en flexion selon Schwickerath (1983)

Schm/Schu : Essai de cisaillement selon Schmitz et Schulmeyer (1975)

DIN 1155 : Essai au choc selon projet de norme DIN 51 115

Voss : Essai en compression à 45 ° selon Voss (1969)

Extrait de G.K. Siebert: "Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik", 1989

II QUALITÉS REQUISES POUR UN SYSTÈME CÉRAMO-MÉTALLIQUE

- Haute température de fusion de l'alliage ($>1100^{\circ}\text{C}$). La température doit être supérieure ($> 100^{\circ}\text{C}$) à la température de frittage des céramiques.
- Température de frittage de la céramique abaissée. Cette température doit être plus faible que celle des céramiques utilisées pour les restaurations céramo-céramiques (céramiques "basse fusion"). De cette manière, aucune déformation des chapes métalliques ne peut se produire.
- La céramique doit mouiller l'alliage quand elle est appliquée sous la forme d'une pâte, de façon à éviter les bulles à l'interface et à permettre les interactions à moyenne distance (liaisons interatomiques et ponts hydrogène). Une bonne adhésion entre l'alliage et la céramique est essentielle et est obtenue grâce aux interactions de la céramique avec les oxydes métalliques de surface et à la rugosité de cette surface.
- Compatibilité des coefficients d'expansion thermique de la céramique et de l'alliage de façon à éviter la fracture de la céramique au cours de l'élaboration.
- Rigidité et résistance de l'armature évitant les contraintes dans la céramique (surtout au niveau des travées de bridge).
- Haute résistance à la déformation à haute température. Les chapes et armatures sont relativement peu épaisses et aucune déformation ne devrait se produire au moment de l'élaboration de la suprastructure en céramique. De telles déformations affectent l'insertion et l'adaptation des restaurations.
- Grande précision de coulée des alliages, même à haute température.
- Conception de la forme des armatures adéquate :
 - Épaisseur minimale de l'alliage
 - Épaisseur minimale réservée à la céramique

III L'ADHÉSION MÉTAL-CÉRAMIQUE

L'adhérence de la céramique sur le métal est le facteur le plus important de la liaison céramo-métallique. En règle générale, cette adhésion est le résultat d'une chimisorption par diffusion entre les oxydes sur la surface de l'alliage et dans la céramique. Ces oxydes sont formés au moment du mouillage de l'alliage par la céramique et lors du frittage de la céramique.

Les échecs d'origine mécanique les plus fréquents sont liés à cette rupture de la liaison céramo-métallique.

Plusieurs facteurs contrôlent l'adhésion métal-céramique :

- la formation d'une liaison chimique forte
- l'interpénétration mécanique des deux matériaux
- les contraintes résiduelles,
- l'absence de vides ou défauts de mouillage de la céramique sur le métal.

Les méthodes permettant d'obtenir une véritable liaison chimique entre la céramique et l'alliage n'ont pas encore été développées. Cependant la **formation d'oxydes à la surface de l'alliage contribue de façon significative à la formation d'une adhésion correcte.**

III.1 OXYDATION À HAUTE TEMPÉRATURE

La formation d'oxydes superficiels à haute température joue un rôle déterminant dans les mécanismes de liaison entre la céramique et l'alliage (TCM), ainsi que dans les procédés de soudo brasage.

- Idéalement, une couche d'oxyde de très faible épaisseur et fortement adhérente à son substrat est **indispensable à une bonne mouillabilité** de la céramique, durant sa cuisson, sur l'infrastructure métallique, puis à l'inter-diffusion des éléments de liaison (phénomènes d'oxydo-réduction), qui va définir la qualité de la liaison céramo-métallique.
- Dans le cas du soudo brasage, au contraire, il ne faudrait avoir aucune couche d'oxyde sur les surfaces à joindre, pour assurer une bonne mouillabilité du métal d'apport sur le métal de base, et créer ainsi les conditions d'une adhésion parfaite.

III.2 LES ALLIAGES PRÉCIEUX

Les alliages précieux, résistants à la corrosion, doivent être modifiés par adjonction d'éléments plus facilement oxydables. La formation de cette couche d'oxyde est alors obtenue lors du "dégazage" des armatures avant l'application de la céramique.

Figure 1 a : Microsonde électronique

Spectre de diffraction X de la surface d'un alliage précieux après traitement d'oxydation dégazage

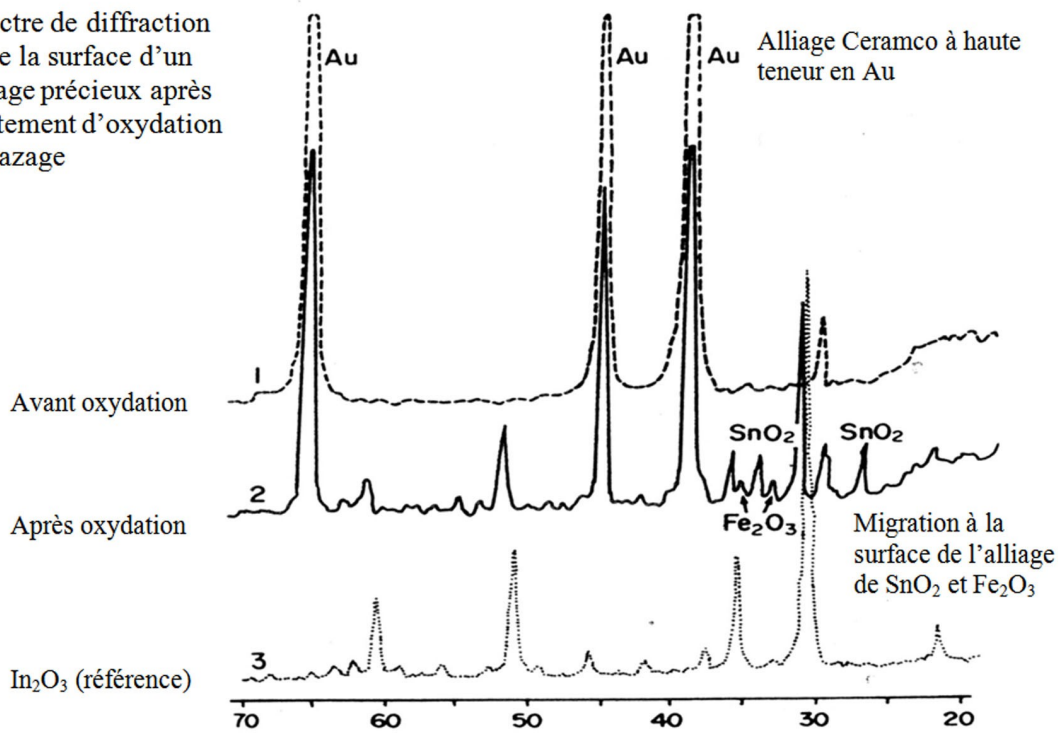
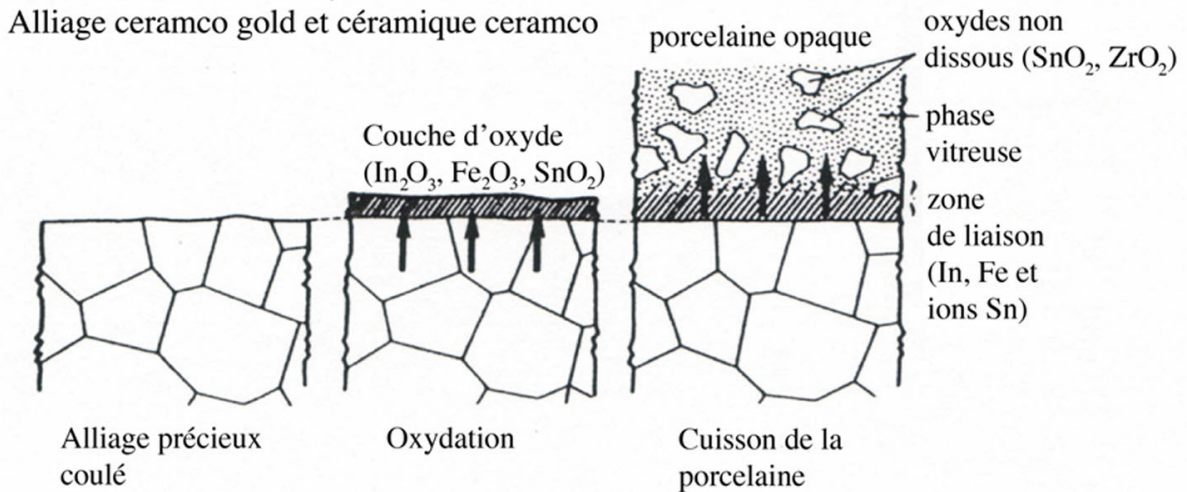


Figure 1b : Microsonde électronique



Mise en évidence de la concentration en Au, In, Fe à travers l'interface céramique-métal après différents temps ou cycles de cuisson. La diffusion de In et Fe dans la céramique augmente avec le temps de cuisson. Diffusion maxi = 25 µm

III.3 LES ALLIAGES NON PRÉCIEUX

Les alliages non précieux contiennent des éléments comme Ni, Cr, Be qui forment très aisément des oxydes au moment du dégazage.

La connaissance des mécanismes de formation des couches d'oxydes est indispensable pour optimiser les propriétés d'usage de tels alliages, notamment en contrôlant la cinétique de formation et de croissance des oxydes, et leur homogénéité.

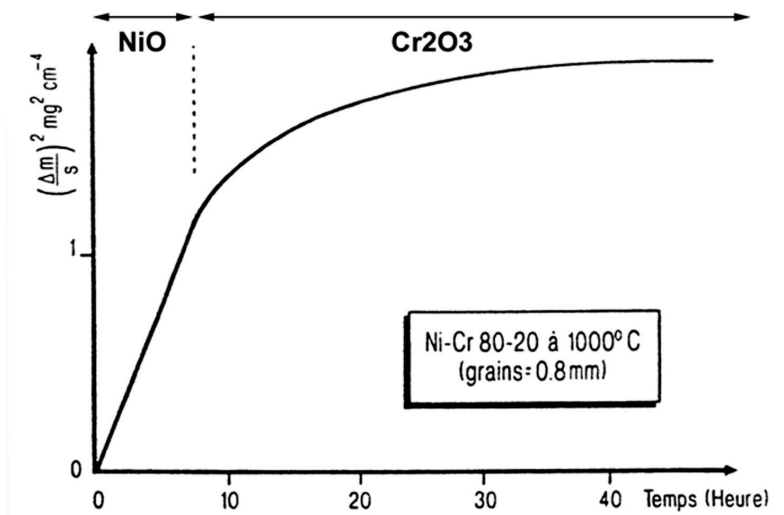
Ces mécanismes sont gouvernés par les paramètres suivants:

- **La vitesse de croissance des oxydes** : elle est très variable d'un oxyde à l'autre, ainsi $\text{CoO} > \text{NiO} > \text{Cr}_2\text{O}_3$
- **L'affinité du chrome pour l'oxygène** : elle est plus grande que celle du nickel lorsque l'activité de l'oxygène est faible.
- **Les coefficients de diffusion** : ils sont faibles dans le Cr_2O_3 , qui constitue ainsi une pellicule protectrice.
- **La nature de l'oxyde superficiel** : elle est le reflet de la nature de la structure sous-jacente, en d'autres termes, une structure hétérogène comme celle d'un alliage dendritique engendrera nécessairement la formation d'une **couche d'oxyde hétérogène**, moins résistante mécaniquement.

Ainsi, quelle que soit la teneur en chrome de l'alliage, au premier stade de l'oxydation, il se forme une couche externe de Cr_2O_3 au niveau des joints de grains, tandis qu'une couche soit de NiO , soit de CoO , recouvre le reste de la surface de l'alliage.

A ce premier stade, on observe par thermogravimétrie une forte augmentation en poids consécutive à l'absorption d'oxygène, ce qui correspond à la croissance d'une couche d'oxyde de Ni ou de Co, selon le cas.

Figure 2 : Courbe thermogravimétrique illustrant l'évolution du phénomène d'oxydation d'un alliage Ni-Cr 80-20 à 1000°C

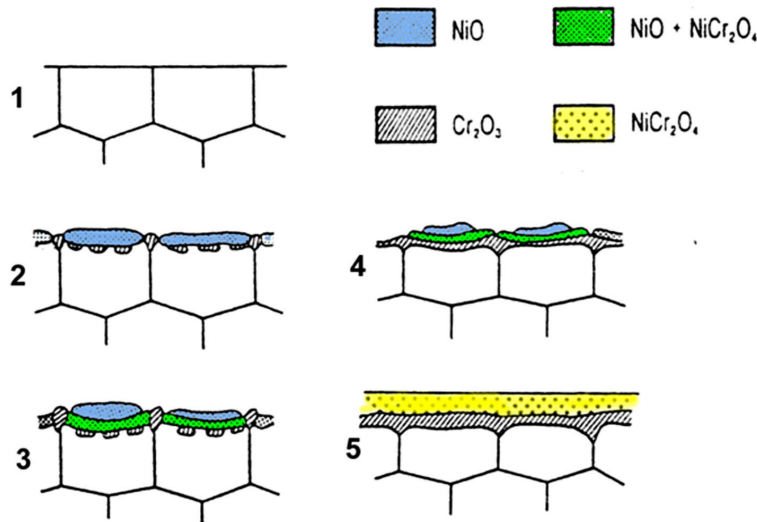


La première portion linéaire de la courbe correspond à la croissance de la couche NiO. Le second stade parabolique correspond à la formation d'une couche externe de Cr₂O₃.

Le second stade de l'oxydation correspond à la formation d'une couche continue d'oxyde de Cr à l'interface entre le métal et l'oxyde superficiel, l'activité de l'oxygène à ce niveau étant très inférieure à ce qu'elle est en surface. Il y a donc ralentissement de la vitesse

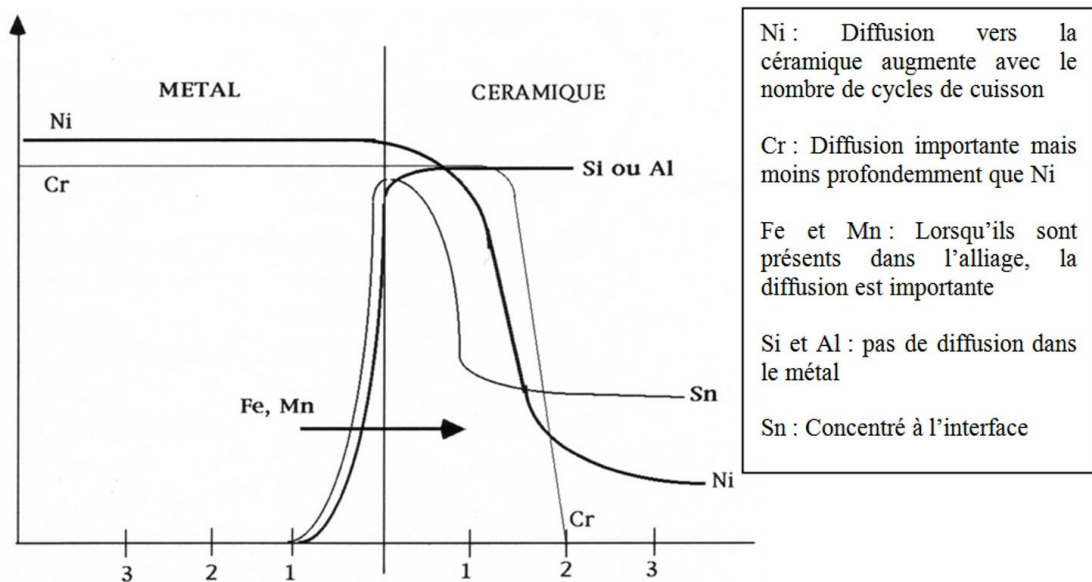
d'oxydation, qui correspond à la zone parabolique de la courbe thermogravimétrique. Au cours de la croissance de la couche d'oxyde pour les alliages nickel chrome, l'oxyde de chrome réagit avec NiO et donne naissance à un oxyde mixte NiCr_2O_4 . (spinelle), formant en surface un état biphasé relativement stable: une couche externe de spinelle recouvrant une couche interne d'oxyde de chrome Cr_2O_3 comme représenté sur la figure suivante.

Figure 3 : Représentation schématique de la chronologie de l'oxydation d'un alliage Ni-Cr



Ainsi, pour avoir une couche d'oxyde aussi faible et stable que possible, il faudra favoriser le formation rapide, voire précoce, d'une pellicule continue d'oxyde de chrome Cr_2O_3 . Pour cela, on peut jouer soit sur la structure (taille des grains), soit sur la composition (présence d'éléments dopants comme l'aluminium, le silicium, le calcium et surtout les terres rares, en particulier l'yttrium ou le cérium, ainsi que le béryllium, qui est probablement le dopant le plus actif). En ce qui concerne la taille des grains, elle est généralement contrôlée par des "affineurs" de grains, ou éléments germinateurs, qui favorisent dès la solidification l'apparition d'un nombre élevé de noyaux de cristallisation, générant ainsi une structure à grains fins, avec une densité élevée de joints de grains. Cependant, pour les alliages non précieux dont il est question ici, il n'existe pas d'agents de germination efficaces, et l'on obtient très souvent des structures à gros grains, souvent dendritiques. Le chrome ségréguant plus particulièrement dans les joints de grains ou les espaces inter-dendritiques, la formation de la première couche d'oxyde de chrome sera d'autant plus rapide que la structure sera fine. Comme il est difficile d'obtenir des structures à grains fins, on agit de préférence sur la composition, par le biais des adjonctions mineures décrites plus haut.

Figure 4 : Microanalyse X. profils de concentration des diffusions à l'interface alliage Ni-Cr/céramique



IV EVALUATION DE L'ADHÉSION MÉTAL-CÉRAMIQUE

De nombreux tests ont été utilisés pour mesurer l'adhérence d'une céramique sur un alliage : tests en cisaillement, en flexion. Cependant les données obtenues à l'aide de divers tests sont peu comparables.

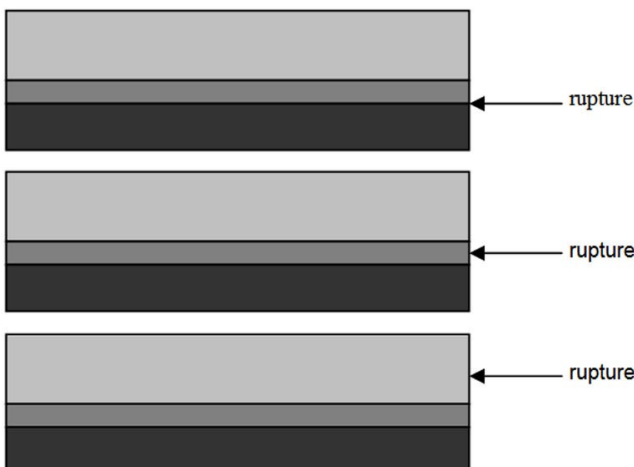
Dans les essais de flexion à 3 points, la céramique est frittée sur une lame rectangulaire de métal. L'éprouvette (face céramique vers le bas) est posée sur deux couteaux et une force est appliquée au milieu de la face supérieure jusqu'à fracture de la céramique.

On considère qu'une adhérence correcte est obtenue à partir de 25 Mpa. Cependant avec de nombreux systèmes, des valeurs de 40 à 60 Mpa peuvent être atteintes.

Une liaison céramique-métal peut être rompue à 3 niveaux différents (figure 5).

Figure 5 : Niveaux de rupture possibles de la liaison céramo-métallique

■ Céramique ■ Oxyde ■ Métal



Fracture adhésive à l'interface métal/oxyde. Adhérence réduite. Se rencontre avec des alliages très résistants à l'oxydation. Ex : Au, Pt

Fracture dans la couche d'oxyde. Adhérence réduite. Se rencontre souvent avec les alliages non précieux, avec une couche trop épaisse

Fracture cohésive dans la céramique. Adhérence élevée. Couche d'oxyde de nature et d'épaisseur correcte.

V LES CÉRAMIQUES POUR CCM

Elles doivent remplir cinq conditions :

- Simuler l'apparence de la dent naturelle,
 - Frittage à relativement basse température,
 - Coefficient d'expansion thermique adapté à celui de l'alliage,
 - Résister à la dégradation dans l'environnement buccal,
 - Ne pas abraser excessivement les dents antagonistes.
- La mise au point de telles céramiques a nécessité l'augmentation du coefficient d'expansion thermique de la céramique, habituellement nettement inférieur à celui des alliages. Ceci a été rendu possible par l'adjonction d'oxyde de potassium et la formation d'une phase cristalline à haute expansion appelée **leucite (KAlSi₂O₆)**
 - L'abaissement de la température de frittage a été obtenu par l'adjonction d'oxydes de sodium et de potassium dans la matrice vitreuse. Les températures atteintes sont situées entre 930°C et 980°C. Des céramiques à très basse température de frittage ont été créées qui contiennent des groupements hydroxyles et plus de Na₂
 - Les céramiques utilisées dans les techniques céramo-métalliques ont une résistance à la traction d'environ 35MPa et une résistance à la flexion de 70 MPa.

Tableau 2 : Proportions des différents composants des céramiques opaque et dentine

Composant	Opaque (%)	Dentine (%)
SiO ₂	50-59	57-62
Al ₂ O ₃	9-15	11-16
Na ₂ O	5-7	4-9
K ₂ O	9-11	10-14
TiO ₂	0-3	0-0,6
ZnO ₂	0-5	0,1-1,5
SnO ₂	5-15	0-0,5
RbO	0-0,1	0-0,1
CeO ₂		0-3
Pigments		Traces

VI LES ALLIAGES POUR CCM

VI.1 COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS DES ALLIAGES NOBLES

Les compositions et propriétés de 5 de ces alliages sont présentées dans les **tableaux 3 et 4**.

Tableau 3 : Composition des 5 alliages précieux pour technique céramo-métallique

Type	Au (%)	Pt(%)	Pd(%)	Ag(%)	Cu(%)	Autres (%)	Total alliages précieux
Au-Pt-Pd	84-86	4-10	5-7	0-2		Fe, In, Re, Sn 2-5	96-98
Au-Pd	45-52		38-45	0		Ru, Re, In 8,5, Ga 1,5	89-90
Au-Pd-Ag	51-52		26-31	14-16		Ru, Re, In 1,5, Sn 3,7	78-83
Pd-Ag			53-88	30-37		Ru, In1,5, Sn 4-8	49-62
Pd-Cu	0-2		74-79		10-15	In, Ga 9	76-81

Tableau 4 : Propriétés et intervalle de fusion d'alliages précieux pour technique céramo-métallique

Type	Résistance à la traction (MPa)	Limite élastique à 2% (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Allongement %	Dureté (Kg/mm ²)	Densité (g/cm ³)	Intervalle de fusion
Au-Pt-Pd	480-500	400-420	81-96	3-10	175-180	17,4-18,6	1150
Au-Pd	700-730	550-575	100-117	8-16	210-230	13,5-13,7	1320-1330
Au-Pd-Ag	650-680	475-525	100-113	8-18	210-230	13,6-13,8	1320-1350
Pd-Ag	550-730	400-525	95-117	10-14	185-235	10,7-11,1	1310-1350
Pd-Cu	690-1300	550-1100	94-97	8-15	350-400	10,6-10,7	1170-1190

Alliages Au-Pt-Pd : Haute teneur en métaux précieux. Excellente résistance à la corrosion. L'indium, l'étain, et le fer sont présents et forment des oxydes permettant la liaison céramique-alliage. Le rhénium est ajouté afin de réduire la taille des grains. Le durcissement de ces alliages résulte de la formation d'un précipité FePt₃. Le traitement thermique de durcissement est un chauffage à 550°C pendant 30 minutes, mais il est habituellement réalisé au cours du frittage de la céramique. Au moment de la coulée de ces alliages, certains des éléments de base sont perdus, il est donc recommandé d'utiliser au moins 50% d'alliage neuf à chaque coulée. Ces alliages ont une grande rigidité, une haute résistance, un allongement correct. Cependant leur résistance à la déformation à haute température est moyenne.

Alliages Au-Pd : Haute teneur en métaux précieux, bonne résistance à la corrosion. Ces alliages ne contiennent ni Pt ni Fe et ne sont donc pas durcis par précipitation. Ils contiennent de l'indium pour la liaison métal-céramique, du Ga pour abaisser la température de fusion, du rhenium pour diminuer la taille des grains et du ruthénium pour améliorer la coulabilité. En raison de leur haute teneur en Pd, ils sont de couleur blanche. Ces alliages sont plus résistants, pls rigides et durs que les alliages Au-Pt-Pd et ils ont un allongement plus important et une température de coulée supérieure. Leur densité est plus faible et ainsi ils ont été moins coûteux que les alliages au-Pt-Pd au moment de leur mise sur le marché. Cependant l'augmentation du prix de Pd a supprimé cet avantage.

Alliages Au-Pd-Ag : Ils contiennent moins de Pd que les précédents. Cette diminution se fait au profit du % d'Ag. Cependant ils ont encore une bonne résistance à la corrosion. De nouveau In et Sn sont ajoutés en vue de la formation d'une liaison céramo-métallique, Ru pour la coulabilité et Re pour la diminution de la taille des grains. Leurs propriétés sont voisines de celles des alliages A-Pd.

Alliages Pd-Ag : Ils ne contiennent pas d'Au et ont la teneur en métal noble la plus faible. Ils contiennent In et Sn pou la liaison céramique-métal, Ru pour la coulabilité. Leurs propriétés sont similaires à celles des alliages Au-Pd-Ag, exceptée leur densité plus faible (11g/cm² vs 14 g/cm²). Ils conduisent souvent à une coloration verdâtre des céramiques de recouvrement.

Alliages Pd-Cu : Ils ne contiennent que 10 à 15% de Cu. Ils contiennent de l'Indium pour la liaison céramique-métal, du gallium pour le contrôle de la température de coulée. Ils pont une haute résistance et une grande dureté, une rigidité moyenne et un allongement à la rupture modéré. Ils ont une faible résistance à la déformation à haute température et forment des oxydes noirâtres.

VI.2 COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS DES ALLIAGES NON PRÉCIEUX

Les **tableaux 5 et 6** résument les compositions et propriétés de 3 types d'alliages utilisés.

Tableau 5 : Composition en % en poids des alliages non précieux pour technique céramo-métallique

Type	Ni	Cr	Co	Ti	Mo	Al	V
Ni-Cr	69-77	13-16			4-14	0-4	
Co-Cr		15-25	55-58		0-4	0-2	
Ti				90-100		0-6	0-4

Tableau 6 : Propriétés des alliages non précieux pour technique céramo-métallique

Type	Résistance à la traction (MPa)	Limite élastique à 2% (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Allongement %	Dureté (Kg/mm ²)	Densité (g/cm ³)	Intervalle de fusion
Ni-Cr	400 - 1000	255-730	150-210	8-20	210-380	7,5-7,7	1300-1450
Co-Cr	520-820	460-640	145-220	6-15	330-465	7,5-7,6	1350-1450
Ti	240-890	170-830	103-114	10-20	125-350	4,4-4,5	1760-1860

Alliages Ni-Cr : Le chrome procure une bonne résistance au ternissement et à la corrosion. Les alliages qui contiennent Al ou Ti ont leurs propriétés mécaniques renforcées par la formation de précipités Ni₃Al ou Ti₃Al. Mo est ajouté pour diminuer le coefficient d'expansion thermique et Be est ajouté pour améliorer la coulabilité (réduction de la température de fusion) et pour augmenter la dureté. Cependant l'utilisation de Be peut poser certains problèmes de toxicité et d'oxydation de surface à haute température. Ces alliages sont plus durs que les alliages précieux, mais ont une limite élastique plus basse. Ils sont aussi plus rigide et permettent de réaliser des armatures et des chapes d'épaisseur plus réduite. Leur densité est beaucoup plus faible (7 à 8 g/cm³) et généralement leur intervalle de fusion est plus élevé que celui des alliages à base Au.

Alliages Co-Cr : Le Chrome procure encore ici une bonne résistance au ternissement et à la corrosion. A l'inverse des alliages Co-Cr pour prothèse partielle amovible, ceux pour restaurations céramo-métalliques sont renforcés plus par durcissement de la solution que

par formation de carbure. Mo permet d'abaisser le coefficient d'expansion thermique et Ru améliore la coulabilité. Ces alliages sont plus résistants et plus durs que les alliages Ni-Cr et ont presque la même densité et le même intervalle de fusion. La coulée et la brasure de ces alliages est plus difficile que celles des alliages précieux.

Alliages Ti : Le titane pur et les alliages Ti-Al6-V4 peuvent devenir des alliages importants dans les techniques céramo-métalliques, mais ils présentent des difficultés dans leur mise en œuvre : température de coulée de 1760°C à 1860°C, grande oxydabilité. Cependant de nouvelles techniques, comme les procédés d'usinage et d'électro-soustraction permettent d'envisager leur développement.

En résumé, les alliages précieux ont une bonne résistance à la corrosion, mais seuls les alliages Au-Pt-Pd possèdent une couleur jaune souhaitable. Les autres types d'alliages sont blanc-gris, ce qui les rend plus difficiles à masquer avec la céramique. Les alliages Au-Pd, Au-Pd-Ag et Pd-Ag ont de bonnes propriétés mécaniques couplées avec de hautes températures de fusion et une coulée et brasure faciles. Cependant les alliages Pd-Ag ont entraîné souvent des colorations disgracieuses. Ceci est dû à la formation d'oxydes foncés difficiles à masquer. Les alliages Ni-Cr et Co-Cr possèdent une grande dureté et un haut module d'élasticité, cependant certains Ni-Cr ont une limite élastique assez faible. Leurs températures de coulées sont élevées. Les alliages à base Ti ont en général des propriétés mécaniques plus basses que celles des autres alliages non précieux mais aussi une densité notoirement plus faible et une température de coulée très élevée. Une bonne adhésion céramique/alliage peut être obtenue avec tous ces alliages, mais l'adhésion avec certains alliages précieux est plus "technique-sensible".

VII PRÉPARATION DES RESTAURATIONS CÉRAMO-MÉTALLIQUES

La réalisation des armatures et chapes pour techniques CCM est très proche de celle des réalisations uniquement métalliques. Une différence importante existe par contre dans la ré-utilisation des alliages. Comme il a déjà été dit, lors de la fusion et de la coulée, certains éléments de l'alliage peuvent être perdus, spécialement ceux qui participent à la formation des oxydes. Ces éléments sont très importants pour la formation de la liaison céramo-métallique avec des alliages précieux. C'est pourquoi, à chaque coulée de ces alliages, la moitié au moins de l'alliage doit être neuve.

Les traitements de surface des chapes sont aussi importants. Ce sont le sablage de la surface (Al_2O_3 entre 25 et $50\mu m$) et la cuisson de formation des oxydes (soit à l'air, soit sous vide partiel). Avec certains alliages contenant du Pd, cette cuisson ne permet pas seulement de créer cette couche externe d'oxydes, mais aussi d'oxydes internes qui pénètrent dans le métal à partir de sa surface et augmentent significativement sa rugosité ce qui conduit à une amélioration de l'adhésion métal-céramique. Certains alliages non précieux conduisent à la formation d'une couche d'oxyde trop épaisse qui fragilise la liaison. Avec ces alliages les chapes subissent un traitement thermique et sont ensuite sablées pour éliminer les excès d'oxydes.

La première couche de céramique est très importante puisqu'elle doit cacher le métal. Des céramiques opaques spéciales doivent être utilisées. Après application et cuisson de cette couche, la céramique dentine qui contient moins d'oxydes opaques et des pigments et oxydes fluorescents est appliquée et frittée. Enfin, les céramiques émail translucides sont appliquées et frittées.