

Université de Montréal

Mesures de colorimétrie et de spectrophotométrie de différentes gouttières thermoplastiques d'alignement orthodontique avant et après l'exposition à différents substrats colorants et à des produits nettoyants.

par

Gabrielle Bernard

Département de santé buccale – Section d'Orthodontie

Faculté de Médecine Dentaire

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales

en vue de l'obtention du grade de

M. Sc (médecine dentaire), option orthodontie

Janvier, 2020

© Gabrielle Bernard, 2020

Université de Montréal
Département de santé buccale – Section d’Orthodontie
Faculté de Médecine Dentaire

Ce mémoire intitulé

Mesures de colorimétrie et de spectrophotométrie de différentes gouttières thermoplastiques d’alignement orthodontique avant et après l’exposition à différents substrats colorants et à des produits nettoyants.

présenté par

Gabrielle Bernard

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Dr Claude Remise, président-rapporteur
Dre Andrée Montpetit, directrice de recherche
Pr Jason Robert Tavares, codirecteur de recherche
Dr Réjean Labrie, membre du jury

Résumé

INTRODUCTION: Les gouttières thermoplastiques orthodontiques doivent souvent être retirées par les patients avant de consommer des aliments ou des liquides autres que l'eau. Cette précaution évite notamment des changements de couleur au niveau du matériau les constituant. Des études antérieures ont concentré leurs recherches sur des changements de coloration chez des marques limitées d'aligneurs thermoplastiques en excluant certaines marques américaines populaires.

OBJECTIFS: L'objectif principal de cette étude vise à évaluer la résistance au changement de teinte du polymère formant trois différentes marques d'aligneurs américaines. Un but secondaire est de comparer le pouvoir de retrait de taches de deux produits nettoyants conçus pour ces appareils amovibles. Un but tertiaire est d'évaluer le type de polymère qui constitue les surfaces interne et externe de chaque marque étudiée de gouttières.

MATÉRIELS ET MÉTHODES : Les gouttières ont été exposées à l'un des divers liquides colorants de l'alimentation courante (thé, café, vin rouge et cola) ou à une solution de contrôle formée d'un gel de remplacement salivaire Biotène® Oral Balance. Les trois marques évaluées étaient Invisalign®, ClearCorrect® et Minor Tooth Movement®. Après leur immersion de douze heures ou de sept jours, les mêmes gouttières étaient nettoyées pendant quinze minutes avec soit les cristaux Invisalign®, soit le bain Cordless Sonic Cleaner combiné avec un comprimé Retainer Brite®. Les données de colorimétrie étaient obtenues à l'aide d'un numériseur calibré et du logiciel Adobe Photoshop® en utilisant l'espace chromatique CIELAB pour comparer les changements de coloration (ΔE) entre les divers moments à l'étude. Les paramètres L^* , a^* , b^* étaient mesurés au temps initial (T0), après douze heures d'immersion (T1), après sept heures d'exposition (T2) et après nettoyage (T3). Les deltas E étaient ensuite convertis en unités du National Bureau of Standards (NBS) pour faciliter l'interprétation clinique des données. Selon la section, les analyses statistiques employées (test de Levene, ANOVA, méthode de Brunner-Langer, test de Tukey ou test-t) permettaient d'évaluer les interactions entre les trois marques entre elles ou entre les marques et les nettoyeurs. Une valeur de $p < 0,05$ était considérée statistiquement significative.

RÉSULTATS ET DISCUSSION: Les résultats suggèrent qu'une exposition de douze heures au café pour les aligneurs Invisalign® engendre un changement de couleur statistiquement significatif par rapport aux deux autres marques. Il en est de même pour une durée identique d'immersion dans le vin rouge ; les coquilles Invisalign® présentent un changement de teinte statistiquement significatif par rapport à ses concurrents. Après sept jours d'exposition au café ou au vin rouge, les coquilles de la marque Invisalign® ont aussi des changements de coloration statistiquement significatifs par rapport aux deux autres marques, mais plus prononcés qu'après douze heures. Le thé noir engendre des changements de couleur importants au niveau clinique chez les trois marques après sept jours d'exposition sous forme de taches extrinsèques. Les deux méthodes de nettoyage étudiées présentent un potentiel clinique de retrait de taches accru pour celles extrinsèques du thé noir par rapport aux taches intrinsèques des autres solutions étudiées. Les résultats par spectrophotométrie à lumière infrarouge démontrent des spectres similaires pour les surfaces interne et externe de chaque marque. Or, ce n'est pas le même polymère qui est employé par chaque compagnie. Des spectres ATR-FTIR d'un matériau à base de polyuréthane sont observés pour les marques Invisalign® et ClearCorrect®. Des spectres ATR-FTIR de matériau à base de polyéthylène téréphtalate glycolisé sont plutôt représentatifs de la marque Minor Tooth Movement®.

CONCLUSION: Les aligneurs de la compagnie Invisalign® sont plus susceptibles de souffrir de pigmentation par le café et le vin rouge que les deux autres marques qui ont présenté une stabilité accrue de leur coloration au contact de ces solutions. Le thé a engendré des changements de couleur extrinsèques importants chez les trois marques étudiées.

Mots-clés: aligneurs, orthodontie, colorimétrie, taches, nettoyage

Abstract

INTRODUCTION: Manufacturers of orthodontic aligners suggest that users take off removable appliances every time they consume solid foods or any drink (except water). This is to avoid a color change within the clear thermoplastic material of which they are made. Prior studies have focused on a limited set of aligners, excluding some popular American brands on the market.

OBJECTIVES: The main objective of this study is to evaluate the stain resistance of the polymer forming three different American aligner brands. A secondary aim is to evaluate the stain-removal potential of two cleaning techniques for these devices. A tertiary goal is to determine the type of polymer forming the internal and external surfaces of the studied brands of aligners.

MATERIALS AND METHODS: The removable appliances were exposed to different staining agents common in a regular diet (coffee, red wine, black tea and cola) or to a control solution made of a Biotene® Oral Balance saliva replacement gel. The three brands evaluated were Invisalign®, ClearCorrect® and Minor Tooth Movement®. Following exposure, the same aligners were cleaned during fifteen minutes with either the Invisalign® cleaning crystals or the Cordless Sonic Cleaner combined with a Retainer Brite® tablet. Colorimetry data was acquired via a calibrated scanner and the Adobe Photoshop® software, using a CIELAB color space approach to compare color changes (ΔE) in aligners exposed to various media. The CIE color parameters (L^* , a^* , b^*) of each specimen were measured before immersion (T0), after a twelve-hour exposure (T1), after a seven-day exposure (T2) and after cleaning (T3). Those color differences were then converted into National Bureau of Standards (NBS) units to facilitate the clinical interpretation. Statistics methods (Levene's test, ANOVA, Brunner-Langer model, Tukey's range test and t-test) were used to identify interactions between the brands themselves or between the brands and the cleaning methods. A p value < 0.05 was considered statistically significant.

RESULTS AND DISCUSSION: This study suggests that an exposure of twelve hours to instant coffee affects significantly the color of the Invisalign® aligners compared to the two other brands. A twelve-hour immersion into red wine also causes a statistically significant color change for the Invisalign® devices compared to their competitors. After seven days of exposure, a more conspicuous intrinsic color change is observed in the Invisalign® aligners exposed to instant coffee and red wine. In both media, the results are statistically significant for the Invisalign® appliances compared to the ClearCorrect® and the Minor Tooth Movement® aligners. The black tea creates an important extrinsic color change in the three brands after seven days. While normal exposure conditions would not typically consist of 12 h to 7 days of continuous exposure, these data indicate that repeated, cumulative exposure may be problematic. The two cleaning methods tend to show a better efficacy in removing extrinsic stains from black tea compared to intrinsic stains of other substrates. The infrared spectrophotometry confirms that the internal and external surfaces of each studied brand of aligners were made of the same polymer. ATR FTIR spectra of polyurethane-based material are observed for the Invisalign® and the ClearCorrect® devices. However, for the Minor Tooth Movement® aligners, the ATR FTIR analysis shows that the appliances are a polyethylene glycol terephthalate polyester.

CONCLUSION: The Invisalign® aligners were more prone to pigmentation from coffee and red wine than the ClearCorrect® or the Minor Tooth Movement® devices. Black tea caused important extrinsic stains on the surface of the three tested brands.

Keywords: aligner, orthodontics, colorimetry, staining, cleaning

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract.....	4
Table des matières.....	5
Liste des tableaux.....	8
Liste des figures.....	10
Liste des abréviations.....	13
Remerciements.....	16
Chapitre 1. Introduction.....	19
Chapitre 2. Recension des écrits.....	21
2.1 La biologie du mouvement dentaire.....	21
2.2 Les options esthétiques en orthodontie.....	23
2.3 Avantages et désavantages des coquilles thermoformées.....	25
2.3.1 Les avantages.....	25
2.3.2 Les désavantages.....	26
2.4 Les différentes catégories de gouttières thermoplastiques.....	27
2.5 Différentes marques de coquilles thermoplastiques à l'étude.....	28
2.5.1 Les gouttières thermoplastiques de la marque Invisalign®.....	28
2.5.2 Les gouttières thermoplastiques de la marque ClearCorrect®.....	31
2.5.3 Les gouttières thermoplastiques de la marque MTM® Clear Aligner.....	33
2.6 Différents produits qui peuvent engendrer des changements de couleur au niveau des gouttières thermoplastiques.....	34
2.6.1 Le café.....	34
2.6.2 Le thé.....	35
2.6.3 Le vin rouge.....	36
2.6.4 Le cola.....	36
2.6.5 Le substitut salivaire.....	37
2.7 La colorimétrie.....	38
2.7.1 Le système L*a*b* CIE.....	38
2.7.2 Le numériseur Epson Perfection V700 Photo.....	41

2.8 La spectrophotométrie	42
2.8.1 Définition	42
2.8.2 La transmittance et l'absorbance	43
2.8.3 Le spectrophotomètre et ses composantes	44
2.9 Différents types de plastique à l'étude.....	46
2.9.1 Le polyuréthane thermoplastique.....	46
2.9.2 Les polyesters	49
2.10 Les produits nettoyeurs pour gouttières thermoplastiques.....	51
2.10.1 Le bain Cordless Sonic Cleaner et son comprimé à dissoudre Retainer Brite® ...	53
2.10.2 Les cristaux à dissoudre Invisalign®.....	54
Chapitre 3. Objectifs et hypothèses	56
3.1 Objectifs	56
3.1.1 Objectifs secondaires	56
3.2 Hypothèses	56
3.3 Résultats attendus.....	57
Chapitre 4. Article.....	58
4.1 Préface.....	58
4.2 Article soumis	58
4.3 Résultats complémentaires.....	75
Chapitre 5. Discussion	80
5.1 Vérification des hypothèses	80
5.2 Intérêt clinique	81
5.3 Limitations de l'étude	81
5.4 Avenues de recherche	82
5.5 Sources de financement	83
Chapitre 6. Conclusion.....	84
Bibliographie.....	86
Annexe 1	93
Annexe 2	95
Annexe 3	97

Annexe 4	100
Annexe 5	103
Annexe 6	106
Annexe 7	109
Annexe 8	110
Annexe 9	111
Annexe 10	112
Annexe 11	113
Annexe 12	114
Annexe 13	115
Annexe 14	116
Annexe 15	117

Liste des tableaux

Tableau 1 : Signification des unités du National Bureau of Standards

Table 2 : National Bureau of Standards ratings

Table 3 : Means (\pm SD) of color changes (ΔE) at various time intervals for 3 aligners brands, 5 staining agents and 2 cleansers

Tableau 4 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T1 (douze heures d'immersion) et T0 (temps initial)

Tableau 5 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T1 (douze heures d'immersion) et T0 (temps initial)

Tableau 6 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T2 (sept jours d'immersion) et T0 (temps initial)

Tableau 7 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T2 (sept jours d'immersion) et T0 (temps initial)

Tableau 8 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage) et T1 (douze heures d'immersion)

Tableau 9 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T1 (douze heures d'immersion)

Tableau 10 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T1 (douze heures d'immersion)

Tableau 11 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage) et T2 (7 jours d'immersion)

Tableau 12 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T2 (sept jours d'immersion)

Tableau 13 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T2 (sept jours d'immersion)

Tableau 14 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Tableau 15 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Tableau 16 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Tableau 17 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Tableau 18 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Tableau 19 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Liste des figures

Figure 1 : Le schéma du mouvement dentaire lors de l'application de forces orthodontiques

Figure 2 : Le *Tooth Positioner* tel qu'initialement inventé par Dr H. D. Kesling

Figure 3 : Aligneurs thermoplastiques de la marque Invisalign®

Figure 4 : Test de résistance aux taches de moutarde réalisé par le groupe Bay Materials LLC

Figure 5 : Coquille transparente ClearCorrect® avec recouvrement gingival plus long que chez d'autres marques

Figure 6 : Gouttières transparentes de la marque MTM® Clear Aligner

Figure 7 : Le système L*a*b* CIE

Figure 8 : Le delta E

Figure 9 : Le cercle chromatique

Figure 10 : Les composantes du spectrophotomètre

Figure 11 : Le spectre infrarouge d'absorbance du polyuréthane thermoplastique

Figure 12 : Les spectres infrarouges d'absorbance de différentes marques de coquilles

Figure 13 : Le spectre infrarouge d'absorbance du **polyéthylène téréphtalate glycolisé**

Figure 14 : Le bain sonore et comprimés Retainer Brite®

Figure 15 : Les cristaux nettoyeurs de la marque Invisalign®

Figure 16 : Specimens submerged into the control solution with two glass sheets and the Gold Wing water pump.

Figure 17 : Breakdown of the experimental conditions used to analyze the 100 aligners per brand.

Figure 18 : Photographs of the three brands of aligners before and after staining in each solution (a) for 12 hours (b) for 7 days.

Figure 19 : Photographs of the aligners after staining and cleansing cycles by either the Invisalign® crystals or the Retainer Brite® tablet combined to the Cordless Sonic Cleaner (a) Invisalign® (b) ClearCorrect® (c) Minor Tooth Movement®

Figure 20 : FTIR spectra of the aligner polymers. (a) Invisalign® (b) ClearCorrect® (c) Minor Tooth Movement®. FTIR: Fourier transformation infrared

Figure 21 : Spectre ATR-FTIR des surfaces externe et interne d'un échantillon Invisalign®

Figure 22 : Spectre ATR-FTIR des surfaces externe et interne d'un échantillon ClearCorrect®

Figure 23 : Spectre ATR-FTIR des surfaces externe et interne d'un échantillon Minor Tooth Movement®

Figure 24 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans le thé entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 25 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans le thé entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 26 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans le thé entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 27 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T1 (douze heures d'immersion) et T0 (temps initial)

Figure 28 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T2 (sept jours d'immersion) et T0 (temps initial)

Figure 29 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par cristaux Invisalign®) et T1 (douze heures d'immersion)

Figure 30 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par Retainer Brite®) et T1 (douze heures d'immersion)

Figure 31 : Valeurs moyenne d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par cristaux Invisalign®) et T2 (sept jours d'immersion)

Figure 32 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par Retainer Brite®) et T2 (sept jours d'immersion)

Figure 33 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par cristaux Invisalign®) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Figure 34 : valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par Retainer Brite®) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Figure 35 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par cristaux Invisalign®) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Figure 36 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par Retainer Brite®) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Figure 37 : Numérisations des trois marques d'aligneurs après une exposition de douze heures aux cinq substrats.

Figure 38 : Numérisations des trois marques d'aligneurs après une exposition de sept jours aux cinq substrats.

Figure 39 : Numérisations des aligneurs Invisalign® après nettoyage par l'un des deux nettoyeurs.

Figure 40 : Numérisations des aligneurs ClearCorrect® après nettoyage par l'un des deux nettoyeurs.

Figure 41 : Numérisations des aligneurs Minor Tooth Movement® après nettoyage par l'un des deux nettoyeurs.

Figure 42 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans le café entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 43 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans le café entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 44 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans le café entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 45 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans le cola entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 46 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans le cola entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 47 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans le cola entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 48 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans la salive entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 49 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans la salive entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 50 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans la salive entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 51 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans le vin entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 52 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans le vin entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Figure 53 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans le vin entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

Liste des abréviations

Abréviations en français

\$: dollar

% : pour cent

ΔE : différence de couleur ; delta E

A : absorbance

BPA : bisphénol A

CIE : Commission Internationale de l'Éclairage

cm : centimètre

g : gramme

h : heure

IR : infrarouge

j : jour

kPa : kilopascal

L : litre

mg : milligramme

ml : millilitre

mm : millimètre

NanoQAM : Centre de Recherche sur les Nanomatériaux et l'Énergie de l'Université du Québec à Montréal

nm : nanomètre

p. : page

PET : polyéthylène téréphtalate

PETG : polyéthylène téréphtalate glycolisé

pH : potentiel hydrogène

ppp : point par pouce

PVC : polychlorure de vinyle

T : transmittance

UV : ultraviolet

Abréviations en anglais

Adj. P : adjusted P-value

ANOVA : analysis of variance

APL : Essix A+ Plastic

ATR : attenuated total reflectance

CADCAM : computer-aided design/computer-aided manufacturing

CC : ClearCorrect

CCD : Charge Coupled Device

CHDM : Cyclohexanedimethanol

CLA : Clear Aligner

CNBC : Consumer News and Business Channel

ESA : Essix ACE plastic

FDA : Food and Drug Administration

FTIR : Fourier-transform infrared spectroscopy

Inc. : incorporation

INV : Invisalign

MTM : Minor Tooth Movement

NBS : National bureau of standards

psi : pound-force per square inch

ppi : pixels per inch

SAS : Statistical Analysis System

Sig. : significance probability

SPSS : Statistical Package for the Social Sciences

TIFF : Tag Image File Format

TP : Tooth Positioner

Abréviations en latin

Et al. : et alii

It always seems impossible until it's done.
-Nelson Mandela-

*Je dédicace ce mémoire à tous mes
proches qui ont su m'épauler au cours de ce
cheminement. Antoine, Denis, Jocelyne, Laurence
et Bryan, merci d'avoir participé chacun à votre
façon à cette belle réalisation.*

Remerciements

Plusieurs personnes ont participé à la réalisation de ce projet qui m'a tenu à cœur au cours des trois années qu'a duré ma spécialité en orthodontie. Ces individus ont tous pris de leur précieux temps pour me diriger, me conseiller et m'aider à atteindre mes objectifs. Je les remercie tous profondément.

Tout d'abord, la réalisation de ce projet de maîtrise ainsi que la rédaction de ce mémoire n'auraient pu voir le jour sans l'aide grandement appréciée de ma directrice de recherche qui a cru en ce travail et qui a su appuyer mon idée et reconnaître mon intérêt pour la recherche sur les biomatériaux du domaine orthodontique dès les balbutiements de cette recherche. Dre Andrée Montpetit a été ouverte aux suggestions et a pu me diriger adéquatement tout au long de ce projet afin de le mener à bon port. Je lui en suis très reconnaissante.

D'autres remerciements vont à mon codirecteur de recherche, Pr Jason Robert Tavares, qui a été grandement impliqué à tous les niveaux de ce projet. Toujours à l'écoute de mes questionnements, cet ingénieur passionné de recherche proposait des solutions de divers ordres, permettant ainsi l'obtention d'un produit final de qualité. Merci du fond du cœur.

M. Pierre Rompré, quant à lui, a été d'une aide précieuse pour la réalisation des statistiques qui nous ont permis de tirer des conclusions pertinentes en lien avec les données recueillies. Généreux de son temps, je me considère très choyée d'avoir pu bénéficier de son expertise et de ses conseils.

Un merci tout spécial va à Mme Nelly Huynh, qui a été directrice de recherche par intérim en tout début de projet. Elle m'a prise sous son aile pour quelques mois en début de parcours et ses conseils furent fort utiles.

Merci à l'équipe du laboratoire du Pr Jason Robert Tavares qui m'a offert beaucoup de temps et dont j'ai pu bénéficier des compétences pour la réalisation des manipulations. Les employés et les étudiants Wendell Raphaël, David Brassard et Faezeh Sabri ont été d'une générosité incroyable, ce qui m'a permis de mener à bien mes expérimentations.

Je me dois de remercier chaleureusement le Dr Claude Remise, chef de Section lors de mon entrée dans le programme, de m'avoir permis de bénéficier de sa passion et de la richesse de ses connaissances dans le domaine orthodontique. Les professeurs et les cliniciens qui ont participé à notre formation méritent également qu'on souligne leur dévouement et leur patience. Mes corésidents ont aussi permis de rendre cette expérience inoubliable. Merci à tous!

Je suis également reconnaissant de la générosité de deux compagnies, ClearCorrect LLC et Dentsply Sirona, qui nous ont fourni gratuitement des gouttières thermoplastiques et du polymère brut en étant averties qu'elles n'auraient aucun droit de regard sur les résultats obtenus avant publication. Ainsi, merci à M. Paul Dinh, vice-président des produits chez ClearCorrect LLC©, à Mme Manon Brochu, directrice senior de l'Est du Canada chez Dentsply Sirona© et à M. Karim Smay, directeur de territoire pour le Québec et les Maritimes pour les dentistes généralistes chez Dentsply Sirona©, pour les dons de ces produits. Grâce à ces individus, l'obtention des matériaux à l'étude a été grandement simplifiée. La compagnie Dentsply Sirona© nous a également donné des comprimés Retainer Brite® sans frais, ce qui a été bien apprécié.

Sur le plan financier, le support offert par le Fonds Paul-Geoffrion doit être mentionné. L'achat des produits et des instruments requis pour la réalisation des expérimentations a été remboursé par ce Fonds. Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada a offert, quant à lui, un support aussi appréciable. Enfin, les instruments de Polytechnique Montréal ont été acquis par la Fondation canadienne pour l'innovation.

Sur le plan personnel, d'autres remerciements vont bien sûr à ma famille. Mes parents ont toujours été d'une aide inouïe à tous les niveaux. Leur amour inconditionnel, leur générosité et leurs encouragements m'ont permis de devenir la femme et la professionnelle que je suis aujourd'hui. J'espère simplement pouvoir exercer ma discipline avec la même passion que celle qu'ils ont transmise à leurs deux filles. Je ne saurais les remercier assez. Je ne pourrai passer sous silence l'aide reçue de ma sœur, Laurence Bernard, et de son conjoint, M. Bryan Glezerson, pour avoir participé à la correction des textes en anglais.

Enfin, j'aimerais remercier l'homme qui partage ma vie, Antoine, pour toute l'aide qu'il m'a constamment offerte au fil de ces années. Désireux de m'épauler à chaque étape du

processus, il a toujours su trouver des solutions à chaque embûche avec cette patience et cette logique dont il fait preuve. Ses talents en informatique ont constitué un atout impressionnant. Merci d'avoir toujours su m'écouter et simplifier mes questionnements. Ce projet est aussi le tien.

Merci encore à tous ; un nouveau chapitre du livre de ma vie sera écrit sous peu grâce à vous!

Chapitre 1. Introduction

Ces dernières années, les gouttières thermoplastiques, aussi appelées aligneurs ou coquilles, sont devenues une option de remplacement populaire par rapport aux appareils fixes orthodontiques conventionnels appelés broches.(1-3) Elles sont recherchées notamment par la clientèle adulte qui souhaite obtenir une option qui leur apparaît plus esthétique.(4, 5) Des études démontrent que les adultes préfèrent les options de traitement orthodontique avec le moins d'exposition de métal visible.(4, 5) De surcroît, certains jeunes en fin d'adolescence (15 à 17 ans) considèrent également les gouttières comme étant l'option la plus attirante comparativement aux traitements avec boîtiers buccaux, que ces derniers soient métalliques ou transparents.(4) Des études prouvent en effet que les individus qui optent pour un traitement orthodontique par gouttières recherchent des bénéfices esthétiques.(2) Plusieurs études avancent même que ces patients cherchant une option orthodontique moins apparente sont prêts à déboursier davantage pour obtenir un tel système d'alignement.(6) De plus, le fait que ces appareils permettent une diction relativement facile et qu'ils soient de petite taille, légers et faciles d'entretien les rend attrayants.(7)

Les coquilles thermoplastiques, qui sont remplacées à des intervalles réguliers généralement d'une à trois semaines selon la marque, engendrent des mouvements progressifs au niveau dentaire.(8-10) L'épaisseur des coquilles varie souvent de 0,5 à 1,5 mm de résine polymère.(3) Généralement, les patients doivent porter ces appareils amovibles en continu, mais ils sont généralement invités à retirer leurs coquilles pour manger, se brosser les dents et passer leur soie.(10-12) Les patients reçoivent souvent comme instruction de les porter environ vingt-deux heures par jour.(11, 13-15) Or, plusieurs patients n'ont pas cette coopération avec les appareils amovibles (15, 16) et consomment des produits colorants avec leurs aligneurs malgré les recommandations des manufacturiers et des spécialistes en orthodontie.(11, 17) Ainsi, le contact des aliments avec ces appareils amovibles engendre des changements de couleur au niveau de ces derniers, ce qui peut les rendre inesthétiques et affecter ainsi l'un des avantages principaux de ces gouttières.(17-19)

En ce qui concerne ces modifications de translucidité indésirables causées par le contact prolongé des produits colorants avec la matière plastique, de rares études ont comparé

par colorimétrie et par spectrophotométrie les changements de couleur de certaines marques de coquilles entre elles au contact de différents substrats.(17-19) De surcroît, plusieurs gouttières existent sur le marché avec des compositions chimiques de polymère qui diffèrent. Deux de ces études ont fait leurs évaluations sur des coquilles provenant de différents pays, dont la Chine ou l'Italie, pour les comparer avec la marque américaine la plus connue dans ce domaine, c'est-à-dire Invisalign®.(17, 18) Nous avons jugé qu'il serait intéressant de diriger une nouvelle étude afin d'identifier parmi trois marques populaires de coquilles américaines, donc plus facilement accessibles pour les orthodontistes du Québec, celle qui possède les meilleures propriétés de conservation de couleur avant et après contact avec des produits colorants alimentaires.

De plus, il est à noter qu'il existe sur le marché une panoplie de produits nettoyants pour ces appareils amovibles. Ceux-ci peuvent prendre différentes formes, qu'il s'agisse de comprimés, de poudres, de mousses ou de bains soniques ou ultrasoniques, servant à déloger les résidus bactériens et alimentaires. Les manufacturiers de ces produits affirment que ceux-ci peuvent redonner une clarté et un meilleur éclat aux gouttières. Des études précédentes publiées en 2017 et en 2018 avaient comparé respectivement neuf et sept techniques différentes de nettoyage pour aligneurs thermoplastiques.(11, 20) Or, il existe un nombre important de ces produits, ce qui peut représenter un intérêt pour poursuivre des recherches en ce sens.

Enfin, il est important de savoir que les coquilles d'alignement peuvent être formées de différents types de plastique, que ce soit notamment le polyuréthane, le polyéthylène téréphtalate, le polyéthylène téréphtalate glycolisé, le polychlorure de vinyle, le polycarbonate, etc.(6, 17, 18, 21) Ces différences dans le polymère les constituant leur confèrent des propriétés qui leur sont propres. Il est possible de se demander si la composition du plastique est uniforme sur les surfaces externes et internes ou si des enduits de nature distincte sont ajoutés ou non pour en améliorer leurs caractéristiques. Des réponses à ces questions pourraient possiblement constituer des avenues intéressantes pour les compagnies privées qui désirent améliorer constamment leurs produits afin de se démarquer de leurs concurrents.

Chapitre 2. Recension des écrits

2.1 La biologie du mouvement dentaire

L'orthodontie est basée sur le principe de forces douces et continues exercées sur les dents afin de déplacer ces dernières de telle sorte que l'os se remodèle lors des déplacements.(22) La capacité d'adaptation aux forces appliquées orthodontiquement réside dans l'ADN du ligament parodontal et des cellules de l'os alvéolaire.(23) Ce ligament péri-dentaire mesure, à l'homéostasie, entre 0,15 mm et 0,38 mm d'épaisseur selon le type de dent.(24) Le ligament parodontal est formé de structures rigides en collagène qui rattachent le cément de la dent à la lamina dura de l'os alvéolaire.(22) Le ligament serait formé à 50-60% de fibroblastes.(24) Il est aussi constitué de macrophages, de lymphocytes, de cellules endothéliales et de cellules mésenchymateuses indifférenciées.(22, 24) À la base, le rôle du ligament parodontal est de permettre aux dents une légère mobilité pour optimiser la fonction lorsque celles-ci subissent les forces de mastication qui sont relativement fortes.(22) Le deuxième rôle de cette structure est d'offrir un support vasculaire et nutritionnel au cément, à l'os alvéolaire et à elle-même.(24)

Le mouvement dentaire se divise en trois phases : la phase initiale, la phase de latence et la phase post-latence.(24, 25) La phase initiale a lieu entre 24 et 48 heures après le début d'application de la force. La deuxième phase dure plusieurs jours tout en étant caractérisée par très peu de mouvement. La dernière phase est plutôt celle qui se produit quand des mouvements dentaires sont cliniquement observables.(24)

La théorie de pression-tension est connue chez les orthodontistes.(23, 25) L'application d'une force physiologique mène à une compression et à une tension des fibres du ligament parodontal en plus d'une activation subséquente des cellules mésenchymateuses indifférenciées.(23) La portion du ligament soumise à des forces de compression (là où la pression de la dent contre l'os alvéolaire est appliquée) connaît une différenciation de ses cellules progénitrices du ligament en ostéoclastes.(22, 23) La vascularisation et le taux d'oxygène à cet endroit sont réduits et l'os devient résorbé à ce niveau.(22, 23) La dent peut donc progressivement se déplacer dans cette direction.(22) Si les forces appliquées sont légères (entre 50 à 100g par dent), c'est la résorption directe qui a lieu ; les tissus et les

cellules sont préservés.(24) La résorption sous-minée (indirecte) est plutôt le résultat de forces importantes causant des dommages tissulaires.(23) Si c'est le cas, il se produit une mort cellulaire et une hémostase dans la région comprimée du ligament ; c'est l'hyalinisation.(24) Les macrophages vont ensuite résorber éventuellement ce tissu nécrotique.(24) Le mouvement dentaire est alors retardé, car il ne peut se produire qu'après la complétion de ce processus de guérison.(24) La portion du ligament qui, quant à lui, se retrouve dans la zone de tension voit plutôt ses cellules mésenchymateuses devenir des ostéoblastes et une apposition osseuse en découle.(23) C'est le parodonte élargi, incluant le ligament, l'os alvéolaire et le ciment qui se remodèle et subit cette apposition.(24) Plusieurs facteurs affectent le taux de mouvements orthodontiques comme la magnitude, la fréquence et la durée des forces mécaniques.(24) Le schéma ci-dessous permet de bien représenter la biologie du mouvement.

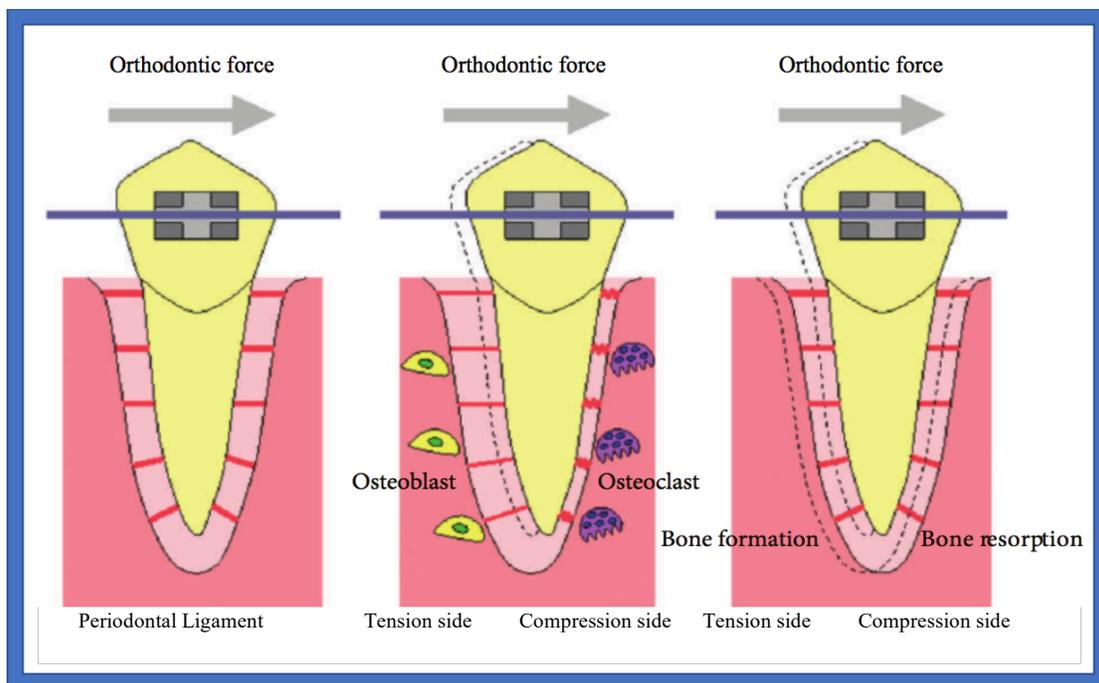


Figure 1 : Le schéma du mouvement dentaire lors de l'application de forces orthodontiques (Image adaptée de https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-tooth-movement-Applying-orthodontic-force-to-the-tooth-causes_fig2_260396769)(26)

2.2 Les options esthétiques en orthodontie

On note une demande de plus en plus croissante pour les appareils orthodontiques qualifiés d'esthétiques en raison de la clientèle adulte qui croît dans les cabinets orthodontiques de façon importante depuis les trente dernières années.(3, 6) D'ailleurs, mentionnons que 90% de cette tranche spécifique de la population recherche une option esthétique quand elle recherche des soins orthodontiques.(3) Ainsi, tranquillement, des alternatives aux broches conventionnelles sont apparues sur le marché. Il semblerait d'ailleurs que seulement 55% des individus trouvent les boîtiers métalliques conventionnels attirants.(3) Comme options de remplacement, on peut tout d'abord penser aux boîtiers transparents ou aux boîtiers linguaux. La technique linguale, en ce qui la concerne, remonte à la fin des années 70, mais ne connaît pas le départ escompté à cette période.(6) Il faudra presque trois décennies pour que cette technique réussisse à obtenir ses lettres de noblesse de la part des spécialistes en orthodontie.(6) Les boîtiers esthétiques, pour leur part, ont été introduits en 1988 et domineront donc pendant une dizaine d'années le marché de l'orthodontie esthétique jusqu'au moment où une nouvelle technologie est apparue sur le marché, c'est-à-dire les aligneurs thermoformés.(6) L'engouement plus sérieux pour ces coquilles transparentes remonte plus précisément à 1998 qui correspond à l'année pendant laquelle la Food and Drug Administration (FDA) a donné le feu vert à la compagnie Align Technology pour produire leurs coquilles de la marque Invisalign®.(27) Or, avant l'arrivée de ces coquilles sur le marché, cette notion d'appareils orthodontiques amovibles relativement esthétiques avait déjà été introduite plusieurs décennies auparavant ; l'idée remonte en effet aux années 1940 pendant lesquelles le Dr Harold Kesling avait introduit le *Tooth Positioner*.(2, 28) Son concept proposé avançait la possibilité qu'on puisse bouger de façon progressive les dents à partir d'une série d'appareils fabriqués en caoutchouc en les changeant de façon séquentielle dans le temps.(6) À cette époque, cette proposition avait été considérée avec scepticisme de la part de la communauté orthodontique.(28) L'idée générale n'est toutefois pas tombée aux oubliettes, car on sait que les coquilles transparentes aujourd'hui commercialisées à grande échelle sont une évolution de cet appareil introduit par TP Orthodontics© en 1945.(2)



Figure 2 : Le *Tooth Positioner*

(Image adaptée de <http://blog.afond.fr/tooth-positioner-individualises-imprimés-direct>)(29)

Entre 1994 et 2010, le pourcentage de traitements orthodontiques pour adultes a connu une hausse de 58% contrairement à seulement 15% chez les moins de 18 ans.(6) Cet intérêt accru de la clientèle adulte pour les soins orthodontiques peut être expliqué par notamment les nouveaux produits des dernières décennies qui offrent des alternatives plus esthétiques, efficaces, confortables et rapides que précédemment et qui répondent mieux aux besoins de cette tranche d'âge.(6) Déjà en 1986, Proffit avait affirmé dans le *Contemporary Orthodontics* que les patients adultes étaient hésitants à se procurer des appareils fixes et indiquaient leur préférence pour des appareils amovibles.(15) Selon l'étude de Baron publiée en 2014, les boîtiers buccaux qualifiés de transparents ne sont plus considérés comme une option véritablement invisible.(6) Ceci étant dit, en 2014, les options considérées comme les plus esthétiques sont les boîtiers linguaux ou les aligneurs thermoformés.(6) Ainsi, avec les années, plusieurs fabricants de coquilles thermoplastiques ont tranquillement fait leur apparition sur ce marché compétitif ; cela a élargi l'éventail de choix des cliniciens en ce qui concerne les techniques de prise d'empreintes, les logiciels de préparation de plans de traitement, le matériau de fabrication des coquilles, leur épaisseur, leur rigidité, leur transparence et la qualité de finition.(3)

2.3 Avantages et désavantages des coquilles thermoformées

2.3.1 Les avantages

Selon Graber et al., si on se fie aux critères de base auxquels tout appareil orthodontique doit répondre selon Proffit dans son livre *Contemporary Orthodontics*, les coquilles thermoplastiques les respectent.(15) Ces critères sont les suivants :

- 1- L'appareil ne doit pas interférer avec la fonction.
- 2- L'appareil ne doit pas causer de dommages aux tissus oraux ou interférer avec le maintien de l'hygiène buccale.
- 3- L'appareil doit être aussi léger et discret que possible, mais suffisamment fort pour tolérer les forces masticatrices et celles découlant d'usage commun raisonnable.
- 4- L'appareil doit être fermement maintenu en position.
- 5- L'appareil doit être capable d'exercer une force bien contrôlée dans la bonne direction aussi longtemps que possible entre les visites.
- 6- L'appareil doit contrôler l'ancrage afin de minimiser les mouvements dentaires non désirés.

À part l'esthétique améliorée, ces coquilles présentent certains avantages sur les appareils fixes conventionnels comme notamment le confort, la quantité d'urgences qui est réduite et l'hygiène plus facile à maintenir pour ces patients.(2, 11)

Au chapitre du confort, des études ont démontré que la douleur ressentie serait moindre qu'avec des appareils fixes.(2) En effet, les patients ne ressentiraient qu'une faible douleur à la mise en bouche qui disparaîtrait au bout de deux ou trois jours.(6)

Pour ce qui est du nombre d'urgences qui est réduit, on peut convenir qu'il s'agit autant d'un avantage pour le patient que pour le praticien ; le temps au fauteuil est réduit et chacun peut optimiser son temps par le fait même.(6) Selon une méta-analyse de Zheng et al. publiée en 2017, le temps à la chaise et la durée de traitement seraient réduits pour les malocclusions dont la difficulté est qualifiée de faible à moyenne, ce qui confère aux aligneurs le seul avantage significatif par rapport aux broches conventionnelles que leurs recherches leur ont permis d'affirmer.(28) Les visites en urgence sont moins fréquentes chez la clientèle traitée par aligneurs puisque ce système requiert moins d'auxiliaires à risque de briser ou d'incommoder les patients.(28) De surcroît, les utilisateurs de coquilles doivent en théorie les

retirer lors des repas, ce qui réduit les probabilités d'abîmer les appareils comparativement aux boîtiers fixes qui peuvent être décollés lors de la mastication.(28)

Concernant la santé parodontale, il semblerait que la condition des tissus de support de la dent est améliorée lors d'un traitement de douze mois avec coquilles comparativement aux appareils fixes.(2, 6) La quantité de bactéries pathogènes serait notamment réduite.(2, 6, 11) L'indice de plaque serait, par le fait même, également diminué, ce qui devient un atout intéressant pour les candidats à l'orthodontie souffrant de légère parodontopathie.(6) Il est important de noter que d'autres recherches sont parvenues à des résultats différents ; des études réalisées par Miethke et Vogt et par Miethke et Brauner ont comparé la santé parodontale de patients qui ont subi des traitements avec gouttières en comparaison avec des individus avec boîtiers fixes buccaux ou linguaux.(15) Il semblerait, selon ces chercheurs, que le risque d'atteinte parodontale soit équivalent entre les gouttières et les boîtiers buccaux alors que le risque serait réduit en comparaison avec les broches linguales.(15)

2.3.2 Les désavantages

Un des aspects négatifs toutefois observé chez ces systèmes d'aligneurs réside dans le fait que l'effet tampon salivaire et la reminéralisation au niveau amélaire soient moindres qu'avec des appareils fixes conventionnels, car la salive est moins en contact intime avec la surface des dents.(11) Les lèvres, la langue et les joues qui généralement aident au délogement des bactéries et des résidus alimentaires à la surface des dents ne sont plus en contact direct avec l'émail, ce qui nuit à cette action préventive généralement réalisée.(11)

Ajoutons que le coût du matériau au moment de la mise en bouche est souvent supérieur à celui des appareils fixes et que certains mouvements sont difficilement réalisables avec des aligneurs, ce qui représente deux faiblesses à connaître en lien avec ce type de traitement orthodontique.(28)

Il est aussi important de noter qu'un seul article scientifique de la méta-analyse de Zheng et al. remplissait leurs critères d'inclusion et d'exclusion en lien avec la stabilité post-traitement orthodontique.(28) Ledit article arrivait à la conclusion que les candidats traités avec les coquilles Invisalign® subissaient plus de récidence que ceux avec des appareils conventionnels.(28) Les individus portant les gouttières les changeaient à chaque deux semaines alors que le groupe avec les appareils fixes étaient vus en suivi aux quatre à six

semaines pour les ajustements.(28) Une hypothèse expliquant cette différence réside possiblement dans le concept d'hyalinisation.(28) Même sous des forces idéales, l'os alvéolaire est à même de subir de la résorption sous-minée qui est une résorption indésirable en orthodontie qui prend place au niveau de la sous-face de la lamina dura.(22) Tel que mentionné précédemment, les mouvements dentaires deviennent alors impossibles tant que la dent est entourée par ces tissus nécrosés.(22) Il faut donc attendre que le corps élimine ces tissus affectés.(22) Pour y parvenir, les ostéoclastes procèdent à la résorption alvéolaire de l'os affecté en apparaissant au niveau de la moelle osseuse adjacente à la région nécrosée.(22) Sachant cela, la résorption sous-minée peut perdurer jusqu'à sept à quatorze jours avec un temps égal requis pour la régénération et la réparation du ligament parodontal affecté.(28) Ainsi, en activant un appareil trop souvent sans laisser le temps à l'organisme de compléter son processus de réparation, les auteurs croient que le changement d'aligneurs aux deux semaines ou moins pourrait engendrer une pauvre formation osseuse et plus de récurrence par le fait même à la fin du traitement.(28) Une autre revue de littérature publiée cette fois en 2019 a comparé l'efficacité des traitements par gouttières thermoplastiques par rapport à ceux effectués à l'aide d'appareils fixes conventionnels. Cette étude a également soulevé le fait que les aligneurs présentent une récurrence plus marquée pendant la phase de rétention suivant le traitement orthodontique.(30) En effet, il semblerait que le groupe de Grünheid et al. ait identifié une augmentation plus marquée de la largeur intercanine chez les candidats traités par coquilles amovibles par proclinaison accrue de ces dents comparativement aux résultats obtenus à l'aide de boîtiers fixes.(31) Or, la littérature a démontré à plusieurs reprises que l'expansion en largeur des canines mandibulaires n'est pas stable, même si les canines sont rétractées pendant ce gain en transverse.(22) Cela peut assurément mener à une instabilité des déplacements dentaires effectués.(22)

2.4 Les différentes catégories de gouttières thermoplastiques

Les premiers systèmes de coquilles sur le marché visaient à corriger des problèmes relativement mineurs de chevauchement.(2) Certains systèmes visent encore à corriger ce genre de malocclusions plus simples alors que d'autres produits sont vendus pour traiter des cas plus complexes.(2)

Il existe différents types de produits de gouttières thermoplastiques.(2) Tel que mentionné, certaines marques visent à réaliser des mouvements plus rudimentaires. Ces marques représentent souvent une option moins chère que d'autres offertes sur le marché pour des traitements plus difficiles.(2) On pense notamment aux marques Originator®, Simpli5® et MTM® Clear Aligner qui entrent dans cette catégorie.(2)

D'autres marques vendent directement aux consommateurs un produit avec suivi à distance par un professionnel.(2) Ces produits s'annoncent comme étant 50% moins dispendieux et plus pratiques que les systèmes conventionnels.(2) La marque Crystal Braces® figure parmi ce groupe.(2)

D'autres cliniciens peuvent produire leur propre système de coquilles en se procurant un logiciel de planification de traitement avec imprimante tridimensionnelle et numériseur à leur clinique.(2) Les marques Orchestrate®, 3 Shape® and SureSmile® offrent notamment ce service.(2)

Enfin, le dernier type de système de coquilles est celui pour les cas complexes qui est élaboré à partir d'empreintes numériques ou en polysiloxane de vinyle et d'un logiciel de planification de plans de traitement qui est géré par une équipe d'orthodontistes, d'ingénieurs et de techniciens.(2) Ces coquilles peuvent venir avec des attaches de composite et autres modifications au niveau du plastique qui optimisent les mouvements souhaités.(2) Le système le plus développé est celui de la marque Invisalign.(2) Or, les marques ClearCorrect®, ClearPath®, eClinger®, K Line® et TwinAligners® font également partie de ce sous-groupe.(2)

2.5 Différentes marques de coquilles thermoplastiques à l'étude

Différentes compagnies produisent des coquilles thermoformées en utilisant des polymères différents. Les trois marques américaines qui sont présentées ci-après constituent un intérêt pour la recherche puisqu'aucune étude antérieure ne les a comparées entre elles jusqu'à ce jour sur le point de la stabilité de couleur :

2.5.1 Les gouttières thermoplastiques de la marque Invisalign®

Le produit Invisalign® a été commercialisé par la compagnie Align Technology Inc. basée à Santa Clara, en Californie, aux États-Unis.(32) Cette société a été fondée en 1997. (33)

Les deux fondateurs sont Zia Chishti et Kelsey Wirth, deux universitaires aux études supérieures en commerce.(11, 15) Il s'agit de la première marque à avoir introduit les coquilles thermoplastiques telles qu'on les connaît et qui est, aujourd'hui encore, celle la plus vendue dans le monde.(3, 34) C'est en 1998 que la Food and Drug Administration a donné sa première approbation pour le traitement des individus avec ce système.(27) Or, certaines restrictions avaient été imposées par la FDA ; les cas en dentition mixte, les individus présentant un surplomb horizontal et/ou vertical sévère, les malpositions dentaires requérant une procédure chirurgicale, les adolescents avec un palais étroit et les adultes avec des restaurations prothodontiques ou implantaires étaient exclus ou préférentiellement évités.(27) C'est en 2008 que la FDA a retiré la limitation du système Invisalign® aux patients avec dentition permanente et a éliminé certaines précautions de la liste énumérée ci-haut.(27) Cette compagnie détient le système de coquilles le plus complexe à ce jour.(2, 35) L'institut de sondage Ipsos MORI a avancé qu'en 2009, le niveau de satisfaction des individus traités par le système de gouttières Invisalign® atteignait 96% des patients et que trois Américains sur quatre connaissaient cette marque.(6) Align Technology Inc. propose un logiciel informatique développé pour manipuler les images numériques, établir les plans de traitement en collaboration avec les techniciens de la société ainsi que pour mettre en fabrication des coquilles formées sur mesure par un procédé de moulage sous pression et d'impression par stéréolithographie.(2) La technique de confection de gouttières sous pression, qui expose les aligneurs à des pressions jusqu'à 100 psi, est souvent synonyme de meilleure adaptation des appareils amovibles sur les dents ainsi qu'une meilleure précision des forces appliquées.(2) En effet, des coquilles fabriquées par d'autres compagnies par la technique sous-vide (par *vaccum*) sont plutôt exposées, lors de leur conception, à des valeurs de pression entre 3 et 14 psi.(2) Le résultat est une adaptation moindre au niveau des dents, ce qui affecte négativement les mouvements dentaires souhaités.(2) Au cours des années, plusieurs brevets de cette compagnie sont tombés et des compétiteurs ont tranquillement émergé sur le marché.(3) En date de 2017, cette compagnie aurait traité le plus de patients par gouttières thermoplastiques, c'est-à-dire au-delà de cinq millions d'individus.(36) Initialement, la compagnie utilisait un plastique appelé Exceed-30®. Au niveau chimique, ces coquilles étaient constituées d'une seule couche rigide de polyuréthane provenant de feuilles de diisocyanate de

diphénylméthylène et de 1,6-hexanediol.(18) Ensuite, elle a mis sur le marché depuis 2012 un nouveau produit appelé SmartTrack formé de polyuréthane multicouche thermoplastique avec un élastomère intégré qui procurerait des forces plus continues et une meilleure prédictibilité de mouvements.(18) Selon le *Material Safety Data Sheet* de ce polymère, le polymère SmartTrack serait constitué d'un polyuréthane thermoplastique aromatique multicouche.(37) L'épaisseur des gouttières varierait de 0,75 mm à 1 mm selon l'équipe de recherche Gao et al.(38) Sur son site Internet, la compagnie avance plus précisément que chaque feuille de SmartTrack mesure 0,03 pouce d'épaisseur.(39) Ce matériau serait plus flexible et présenterait une transparence augmentée en plus d'une résistance accrue à la fracture.(3) La force délivrée par ce type de plastique serait plus constante dans le temps et l'élasticité du produit en serait augmentée, permettant des insertions et des retraits plus faciles pour l'utilisateur.(6) Une étude de Brascher et al. ayant comparé les deux plastiques avance que le nouveau matériau procure des intensités moindres de douleurs maximales ainsi que des durées significativement plus courtes de douleur.(9) En ce qui concerne l'insertion et le retrait d'appareils, l'irritation des tissus mous et la phonétique, 90% des répondants de cette même étude affirment que le nouveau matériau est meilleur ou similaire au précédent.(9) Ce nouveau plastique favoriserait selon un autre article de la littérature des mouvements d'extrusion et de rotation qui sont des mouvements parfois difficiles à réaliser.(6) Par contre, d'autres auteurs viennent contredire les affirmations citées ci-dessus en affirmant que ce nouveau matériau démontrerait une propriété plus cassante en raison d'un index élastique plus élevé.(3) Ce polymère pourrait ainsi se déformer plus facilement et atténuer les forces orthodontiques appliquées.(3) Or, en ce qui a trait à la résistance à la coloration, la compagnie Align Technology concède elle-même que certains docteurs considèrent le produit légèrement plus susceptible de changer de teinte au contact de certains produits, rappelant aux patients qu'il est préférable de retirer les coquilles avant de fumer, manger ou boire des liquides autres que de l'eau froide avec le matériau SmartTrack.(40) Il est important de préciser qu'en raison du nouveau plastique utilisé, la compagnie est revenue sur la durée de port de chaque paire de coquilles en changeant le nombre de semaines de deux à une.(41) En ce qui concerne certaines recommandations du fabricant, il est suggéré de porter les appareils entre vingt et vingt-deux heures par jour et de retirer les gouttières pour manger, brosser ses dents et passer le fil dentaire.(42)



Figure 3 : Aligneurs thermoplastiques de la marque Invisalign®
(Image adaptée de <https://www.maggiikleemdds.com/invisalign.html>)(43)

2.5.2 Les gouttières thermoplastiques de la marque ClearCorrect®

Une autre compagnie qui produit des coquilles thermoplastiques est ClearCorrect LLC basée à Rock Round au Texas aux États-Unis.(6) Les aligneurs produits portent le nom de ClearCorrect®.(2, 6) La compagnie a été fondée en 2006 et a reçu l'approbation de la Food and Drug Administration en 2009 pour commercialiser son produit qui existe sur le marché depuis.(2) Contrairement aux gouttières produites par la compagnie Align Technology Inc., les appareils ClearCorrect® sont découpés pour recouvrir une plus grande partie des tissus mous entourant les dents, ce qui augmenterait la rétention des aligneurs selon cette société.(2) Le matériau qui forme les coquilles ClearCorrect® porte le nom de Zendura.(35, 44) Il s'agit d'une formule de polyuréthane rigide créée spécifiquement pour la compagnie par le groupe Bay Materials LLC.(44) Le *Material Safety Data Sheet* confirme en effet que le produit est une résine de polyuréthane.(45) L'épaisseur des feuilles de matériau employé est généralement de 0,03 pouce pour les coquilles actives.(46) Selon le site Internet de ce groupe, les propriétés de choix de leur matériau Zendura A proviendraient de sa force, de sa ductilité, de sa résistance chimique, de sa clarté et de sa résistance au stress.(47) La compagnie avance que le produit serait formé d'une résine rigide hautement performante conçue par des ingénieurs pour assurer une rétention supérieure au stress et une résistance aux fissures.(47) Il semblerait que le polymère, en plus d'être très durable, permet un bon alignement dentaire.(47) Encore selon la compagnie produisant ce matériau, la résistance supérieure aux taches chimiques et sa clarté seraient des bénéfices significatifs à souligner.(47)

En ce qui concerne la résistance aux taches plus spécifiquement, la compagnie Bay Materials LLC aurait réalisé un test standardisé à la moutarde, car il s'agit selon eux d'un agent fort tachant.(47) En effet, le groupe avance que plusieurs produits courants tels les huiles, le café et les agents alimentaires peuvent causer un jaunissement de la coquille et la détériorer, d'où la pertinence de réaliser ce test. La compagnie aurait trempé leur produit dans la moutarde et l'aurait ensuite déposé dans un four à trente-sept degrés pendant vingt-quatre heures.(47) À l'aide de l'index CIELAB décrit quelques pages plus loin, le groupe avance que leur produit Zendura A a subi moins de changement de couleur que certains de leurs concurrents.(47) Voici les résultats de leur étude maison :

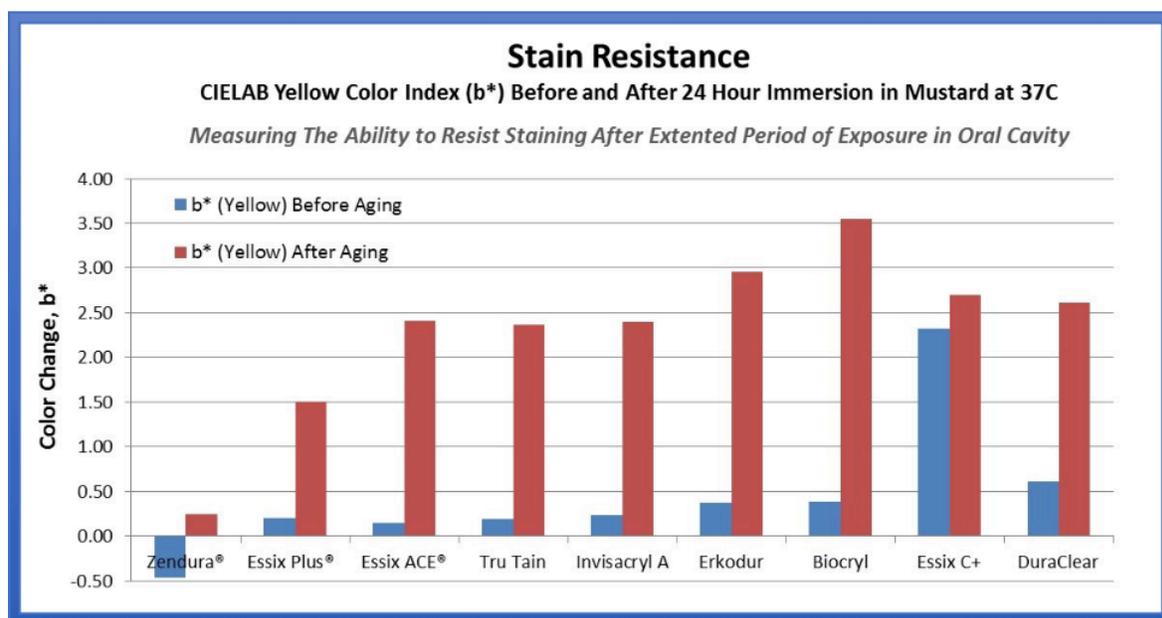


Figure 4 : Test de résistance aux taches de moutarde réalisé par le groupe Bay Materials LLC (Image adaptée de <https://www.zenduradental.com/pages/properties>)(47)

Le site Internet de la compagnie ClearCorrect LLC affirme que les paires de coquilles sont généralement portées deux à trois semaines selon les recommandations du praticien.(48) La compagnie ne suggère pas la consommation de liquides chauds avec le port de leurs appareils, ce qui pourrait autrement les déformer.(44) La société affirme également que le café ou le thé pourraient tacher les aligneurs.(44) Ainsi, le retrait des appareils amovibles avant de manger ou de boire autre chose que de l'eau est suggéré.(44) Dans la section pour les docteurs

du site Internet de la compagnie, il est mentionné que ces coquilles sont conçues pour résister aux taches et aux craquelures pour en optimiser leur clarté.(49) En date de 2017, ClearCorrect Inc. aurait traité environ 80 000 personnes avec son système amovible.(2)



Figure 5 : Coquille transparente ClearCorrect® avec recouvrement gingival plus long que chez d'autres marques

(Image adaptée de <https://clearcorrect.com>)(48)

2.5.3 Les gouttières thermoplastiques de la marque MTM® Clear Aligner

Une autre compagnie proposant des coquilles est Dentsply Sirona© qui produit les coquilles baptisées MTM® Clear Aligners.(15, 35) La compagnie avance que son produit se contente d'aligner les dents antérieures des arcades supérieure et inférieure des patients en dentition permanente (donc ayant toutes leurs deuxièmes molaires éruptées) qui requièrent un minimum de déplacement.(35) La compagnie mentionne que le produit est formé à base de plastique sans bisphénol A (BPA) et sans polychlorure de vinyle (PVC).(35) La *Food and Drug Administration* précise, quant à elle, que les gouttières sont formées de copolyester ou de copolymères thermoformés.(44) Le *Material Safety Data Sheet* du produit avance que le produit Essix Ace est formé à 95% de copolyester et à 5% d'un composé secret industriel.(50) Selon le livre intitulé *Orthodontics : current principles and techniques*, le matériau Raintree Essix ACE serait aussi un dérivé de copolyester.(15) L'épaisseur du produit varierait de 0,75 mm à 1 mm selon l'équipe de recherche Gao et al.(38) Selon son site Internet, la compagnie Dentsply Sirona prétend qu'un avantage de leur produit réside dans le fait que l'emploi de

leurs coquilles est plus abordable que d'autres systèmes de gouttières existants.(35) La société affirme également que le traitement peut durer une période parfois aussi courte que de trois à six mois.(35) Les coquilles doivent être remplacées aux deux à trois semaines.(35) La société suggère de porter les coquilles en tout temps le jour et la nuit pour obtenir des résultats optimaux à l'exception des périodes pour manger, boire des liquides chauds ou brosser ses dents.(35) Dentsply Sirona donne comme recommandation de nettoyer les coquilles avec les Retainer Brite® Cleaning Tablets dont il sera discuté plus loin.(35)



Figure 6 : Gouttières transparentes de la marque MTM® Clear Aligner
(Image adaptée de <http://bayridgedentalcare.com/orthodontics/>)(51)

2.6 Différents produits qui peuvent engendrer des changements de couleur au niveau des gouttières thermoplastiques

En ce qui concerne les produits qui seront utilisés pour possiblement engendrer des changements variables de couleur des aligneurs, nous aurons recours au café, au thé noir, au vin rouge ainsi qu'au cola tels qu'employés lors d'études précédentes portant sur différents produits dentaires.(17, 19, 52-55) La moutarde n'ayant pas été employée régulièrement dans ces articles de la littérature, elle n'a pas été retenue pour nos expérimentations.

2.6.1 Le café

En termes de consommation de café, le site du Consumer News and Business Channel (CNBC) affirme que 85% des Américains boivent de la caféine régulièrement, le café en étant la principale source.(56) Au Canada, 71% des individus âgés de 18 à 79 ans consomment du café quotidiennement selon l'Association canadienne de café.(57) Statista avance que 44% des Américains buvaient deux ou trois cafés par jour en 2017.(58) Pour ce qui est des buveurs de café canadiens âgés de 18 ans est plus, ceux-ci en consommaient en moyenne trois tasses

chaque jour en 2016.(59) Le site Internet de Statistiques Canada avance que parmi les Canadiens qui boivent du café, la consommation la plus importante se retrouve chez le groupe des 31 à 50 ans.(60) Les hommes ont recours en moyenne à 639 grammes de café par année alors que cette valeur est de 586 grammes chez les femmes.(60) La caféine consommée par les Canadiens provient à 80,6% du café.(60) Plus de 20% des Canadiens et environ 15% des Canadiennes âgés entre 31 et 70 ans consomment au moins 400 milligrammes de caféine par jour, ce qui excède les recommandations quotidiennes des spécialistes.(60) Ces 400 milligrammes de caféine correspondent à environ trois tasses de café de huit onces chacune.(60) Pour se donner une idée de la recette pour obtenir un café instantané, on peut mentionner que l'article de Zafeiriadis et al. a testé le plastique des coquilles Vivera® au contact de différents substrats en diluant 3,6 g de café dans 300 mL d'eau distillée bouillante pour ses expérimentations.(19) Cela correspondrait selon les auteurs aux recommandations du manufacturier, c'est-à-dire la compagnie Nestlé commercialisant le produit Nescafé® Classic.(19)

2.6.2 Le thé

Pour ce qui est du thé, Statistiques Canada affirme que la consommation de ce breuvage diffère de la majorité des autres produits liquides en raison de la hausse régulière du pourcentage de citoyens qui en consomment proportionnellement à leur avancement en âge.(60) Le pourcentage d'hommes canadiens buvant du thé passe de 20% à 49% entre la tranche d'âge de 19-30 ans à celle des 71 ans et plus. Pour les mêmes changements d'âge, le pourcentage augmente de 30% à 56% chez la gente féminine.(60) La moyenne nationale serait de 8,3 tasses par semaine, donc d'un peu plus d'une tasse par jour pour le buveur moyen.(61) L'association de thé du Canada affirme que les citoyens du pays consomment 9,7 millions de tasses de thé chaque année.(61) Pour donner une idée de grandeur de concentration de grammes par quantité d'eau, une tasse d'eau bouillante peut recevoir un sachet de thé noir qui renferme généralement deux grammes de feuille de thé.(61) Selon le site Internet de la marque Twinning's, on peut infuser les sachets de thé noir pour environ quatre minutes afin d'obtenir un goût optimal.(62) L'article de Zafeiriadis et al. affirme que les auteurs ont infusé, quant à eux, trois grammes de feuilles de thé Lipton dans 300 ml d'eau bouillante distillée pendant dix minutes pour évaluer le changement de teinte du polymère étudié.(19)

2.6.3 Le vin rouge

En ce qui a trait à la consommation d'alcool au Canada, il faut savoir premièrement qu'environ 80% des citoyens du pays boivent de l'alcool selon l'administrateur en chef de la santé publique du Canada.(63) La tranche d'âge ayant bu le plus d'alcool en 2013 est celle des 30 à 34 ans.(63) Entre avril 2013 et mars 2014, les Canadiens ont acheté en moyenne 76 litres de bière, 16 litres de vin, 5 litres de spiritueux et 16 litres d'autres types d'alcool.(63) Selon le quotidien national le National Post, en 2014, les buveurs d'alcool canadiens âgés de 15 ans et plus ont ingéré chacun 8 litres d'alcool pur ou 469 consommations régulières.(64) Le Centre for Addiction and Mental Health (CAMH) avance, quant à lui, que 19% des Canadiens consommeraient au-delà des limites recommandées de dix verres par semaine pour les femmes et de quinze verres par semaine pour les hommes.(64) Parmi les différents types d'alcool consommés au pays, 42% est du vin pour la moyenne canadienne.(64) Au Québec plus spécifiquement, 79,3% des ventes d'alcool était du vin en 2014 contrairement à la majorité des habitants des autres provinces qui préconisent l'achat de bière.(64) Le vin vendu dans la province québécoise était du rouge dans une proportion de 67%.(64) Un verre de vin régulier au Canada renferme six onces de liquide à 12%.(65) En 2017, Éduc'alcool a stipulé que les Québécois consommaient en moyenne 2,8 verres d'alcool chaque semaine.(66) Plus du tiers des Québécois de 15 ans et plus consomment du vin une fois ou plus par semaine.(66) Les Américains, quant à eux, consomment annuellement 10,25 L de vin par personne selon le magazine économique Forbes.(67) Selon le Washington Post, en buvant un verre de vin chaque soir, les Américains adultes se placent dans le huitième décile de consommation d'alcool per capita du pays. (68) Si cette consommation augmente à deux verres par soir, cela correspond alors au neuvième décile de la consommation per capita.(68) Enfin, les dix pour cent de la population américaine qui boivent le plus d'alcool ingèrent en moyenne 74 consommations hebdomadairement.(68) Cela correspond à 24 millions d'individus de 18 ans et plus de ce pays.(68)

2.6.4 Le cola

Si on aborde le sujet des boissons gazeuses, le groupe Statista avait prévu pour 2018 que les Canadiens auraient une consommation de ces produits per capita de 68 L par année.(69) La consommation de boissons gazeuses décroît avec l'âge.(60) En 2015, un sondage de

Statistiques Canada révèle que 47% des hommes et 27 % des femmes, tous entre 19 et 30 ans, ont consommé régulièrement des boissons gazeuses dans les derniers jours alors que ce taux diminue à 10% pour les deux sexes au-delà de 70 ans.(60) En 2014, le réseau télévisé Global News a avancé que la consommation per capita de boissons carbonisées douces avait drastiquement diminué pendant la dernière décennie. (70) Cette réduction se traduisait par une ingestion de 105 L de boissons gazeuses annuellement ou, autrement dit, de 287 ml par jour.(70) Les boissons au cola, qu'elles soient diètes ou régulières, représentent les deux tiers des 2,5 millions des ventes obtenues dans ce marché.(70) Coke® et Pepsi® sont les grands meneurs avec respectivement 28% et 25 % des ventes.(70)

2.6.5 Le substitut salivaire

Comme solution pour le groupe contrôle de coquilles, un substitut de salive sera employé. Celui utilisé sera le gel hydratant Oral Balance de Biotène® qui, selon une étude réalisée par l'Université de Zurich, présente un potentiel protecteur contre l'érosion de l'émail en raison de sa consistance visqueuse qui exerce un rôle de barrière ou de film à la surface des dents.(71) Cela offre une protection mécanique à ces dernières.(71) Il est important de préciser que la salive véritable a un rôle similaire en formant à la surface de l'émail des dents une pellicule exogène acquise qui prévient notamment l'attaque acide par les bactéries, mais qui fournit également une protection contre l'attrition et l'abrasion.(72) Le gel salivaire de substitution Biotène® a comme fonction de soulager la xérostomie, c'est-à-dire la sécheresse buccale, en apaisant les gencives irritées et en rafraîchissant la cavité buccale.(73) Selon le site Internet de la compagnie offrant le produit, les ingrédients que renferme ce dernier sont de la glycérine, de l'eau, du sorbitol, du xylitol, du carbomère, de l'hydroxyéthylcellulose, de l'hydroxyde de sodium et du propylparabène.(74) L'étude de Lombardo et al. avait utilisé le gel Oral Balance de Biotène® pour évaluer les changements de transmittance et d'absorbance de leur coquilles en ajoutant 250 ml de ce produit à un litre d'eau afin d'obtenir une solution imitant la salive naturelle.(18) Ils avaient ensuite rajouté des colorants alimentaires bruns ou jaunes.(18)

2.7 La colorimétrie

2.7.1 Le système L*a*b* CIE

Plusieurs études de la littérature se sont intéressées à l'étude des changements de couleur de différents produits du domaine dentaire. Un des systèmes qui est le plus couramment employé pour décrire ces changements de couleur est le système de la Commission Internationale de l'éclairage (CIE) qui englobe les paramètres L*, a* et b*. (17, 19, 52-55, 75, 76) Ce système datant de 1976 est également appelé CIELAB et englobe premièrement la clarté L* qui s'étend du noir (valeur de 0) au blanc (valeur de 100). (75) Le paramètre a* représente l'axe s'étirant du vert (valeur négative) au rouge (valeur positive). (77) Le paramètre b* offre, quant à lui, des données allant du bleu (valeur négative) au jaune (valeur positive). (77) Les changements de couleur (ΔE) sont souvent calculés via l'équation suivante :

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2},$$

Où $\Delta L^* = L^*_{T2} - L^*_{T1}$

Où $\Delta a^* = a^*_{T2} - a^*_{T1}$

Où $\Delta b^* = b^*_{T2} - b^*_{T1}$ (17, 53, 75, 76)

Ainsi, l'unité de changement numérique des trois paramètres est approximativement égal aux nuances que l'œil humain peut observer, ce qui donne des résultats avec une signification clinique applicable. (19) La clarté L* correspond à la mesure de valeur du système de Munsell. (19) Les paramètres a* et b* font plutôt référence, quant à eux, à la teinte et à la chromaticité de ce même système précédemment cité. (19)

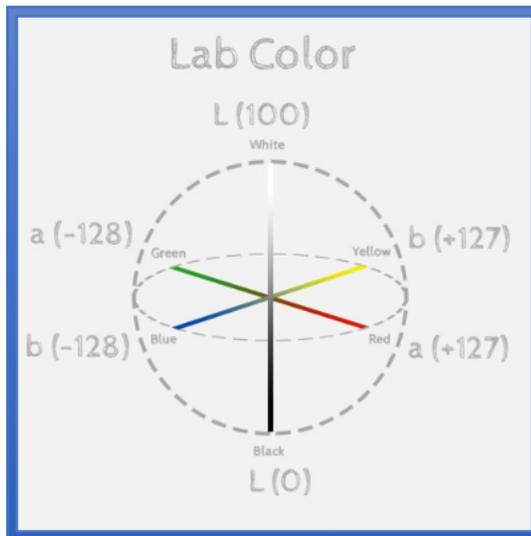


Figure 7 : Le système L*a*b* CIE
(Image adaptée de Photoshopbuzz.com)(78)

Le delta E correspond donc à la formule mathématique nous permettant d'obtenir une représentation quantitative d'une différence de teinte entre deux échantillons colorés sous des conditions expérimentales déterminées.(79) Cela correspond donc à une distance euclidienne, c'est-à-dire la distance qui relie deux points dans un espace multidimensionnel.

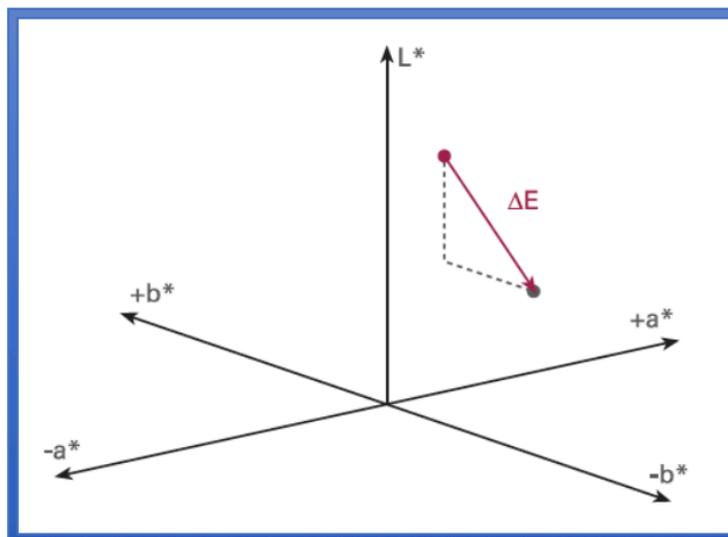


Figure 8 : Le delta E
(Image adaptée de <https://www.yumpu.com/en/document/read/6730754/delta-e-delta-h-delta-t-what-does-it-mean-efi>)(80)

Ces valeurs de delta E peuvent ensuite être converties en unités du National bureau of standards (NBS) en employant la formule suivante (17) :

$$\text{NBS} = \Delta E \times 0,92$$

Ces valeurs permettent de mieux décrire au niveau clinique les degrés de couleurs perceptibles visuellement. (17, 81) Il est possible de se référer au tableau ci-dessous pour interpréter les valeurs obtenues(17) :

Tableau 1 : Signification des unités du National Bureau of Standards

Unités du National Bureau of Standards	Signification du changement de couleur
0,0 – 0,5	Trace ; changement extrêmement léger
0,5 – 1,5	Changement léger
1,5 – 3,0	Changement notable, qui peut être perçu
3,0 – 6,0	Changement appréciable, qui est marqué
6,0 – 12,0	Changement important, qui est extrêmement marqué
12,0 et +	Changement très important, qui correspond à un changement de couleur

Une étude publiée en 2014 dans le Australian Orthodontic Journal a effectué des expérimentations de changements de coloration sur des coquilles Vivera® aplanies de la compagnie Align Technology.(19) Il semblerait que les échantillons aient été soumis à un procédé thermique et moulés par pression négative similairement à la confection des coquilles Vivera® régulières afin de préserver exactement les mêmes propriétés chimiques et mécaniques que celles des appareils commercialement en vente.(19) Les auteurs ont eu recours à un spectrophotomètre leur donnant les valeurs L*, a* et b* avant et après trempage dans différents substrats tels le café, le thé, le vin rouge, le cola et l’eau distillée.(19) Le café aurait causé une baisse significative des valeurs de L* et a* et une hausse des valeurs de b*.(19) Cela indique que le matériau testé a subi un assombrissement et un changement de teinte vers le jaune et le vert.(19) Le thé employé a quant à lui subi une augmentation significative des valeurs a* et b*, ce qui implique une coloration accrue vers les teintes de rouge et de jaune respectivement.(19) Le vin rouge aurait, quant à lui, augmenté la valeur de a* alors que le cola a eu l’effet inverse.(19) Cela se traduit par une coloration du polymère vers les teintes de rouge pour le vin et vers les teintes de vert pour le cola.(19) Le trempage

dans la solution contrôle d'eau distillée n'a pas engendré de changements au niveau des paramètres L^* , a^* ou b^* .(19) Il semblerait que le café ait engendré le changement de couleur le plus important parmi les substances vérifiées.(19) Les chercheurs expliquent ces résultats de décoloration par l'absorption ou la pénétration superficielle des agents colorants dans le polymère employé.(19)

2.7.2 Le numériseur Epson Perfection V700 Photo

Ce numériseur à plat est conçu pour le traitement des photographies de haute qualité. Il utilise une source lumineuse fluorescente avec un spectre d'émission à large bande ainsi qu'un capteur CCD linéaire.(82) Le produit présente une résolution maximale de 6 400 ppp.(82) La zone maximale à numériser est de 21,6 cm par 29,7 cm.(82) La source lumineuse et le système de détection de ce numériseur se déplacent le long du film stationnaire alors que chez d'autres numériseurs, le film lui-même est déplacé.(82) Il est possible d'enregistrer les numérisations sous différents formats, mais celui TIFF a l'avantage de permettre une compression de données sans perte et est favorable à une manipulation par différents logiciels d'imagerie.(82) Le numériseur V700 d'Epson ne présente pas de réchauffement automatique.(82) L'utilisateur a besoin d'effectuer de multiples scans de réchauffement avant de recueillir ses données et il doit assumer que l'émission de la source lumineuse soit stable après les numérisations de réchauffement.(82) Une étude réalisée en 2010 visait à comparer la capacité d'un numériseur à plat commercial (le Epson PerfectionV700 Photo) par rapport à celle d'un numériseur à films radiographiques (Vidar VXR Dosimetry PRO Advantage Film Digitizer) à effectuer une dosimétrie de films radiochromiques EBT.(82) Les films radiochromiques servent à la communauté de physique médicale pour effectuer des dosimétries en radiothérapie et en imagerie médicale.(83) Pour y parvenir, le chercheur laissait le Epson V700 se réchauffer pendant 30 minutes avant la numérisation et il activait ce dernier à dix reprises sans film pour stabiliser la source lumineuse.(82) Il positionnait ensuite les films au centre de la vitre et tous les paramètres d'amélioration de l'image par le logiciel de capture étaient désactivés. Il faut savoir qu'au moment de l'étude, le Epson V700 valait moins de 1000\$ alors que le Vidar VXR valait plus de 10 000\$.(82) Leurs résultats leur permettaient d'affirmer des performances similaires notamment en ce qui concerne la consistance des mesures et d'uniformité de réponse.(82) Le Epson V700 a même surpassé les valeurs du Vidar VXR en ce qui concernait

l'uniformité des numérisations et le bruit. Il est toutefois important de mentionner que la position du film sur le Epson V700 avait son importance (positionnement en mode portrait ou paysage).(82) Il est alors important, selon les auteurs, d'adopter une orientation constante à maintenir lors d'une prise de mesures expérimentales.(82)

Dans le domaine orthodontique, l'emploi d'un numériseur a également servi à certains spécialistes réalisant leur mémoire dans le domaine. L'orthodontiste française Dre Isabelle Amar-Mamou a employé un numériseur à dos rétro-éclairé à l'Université Denis Diderot – Paris 7 en 2003-2004 pour son projet de recherche.(84) Son protocole expérimental visait à établir une comparaison entre la coloration de ligatures et chaînettes siliconées et non siliconées au contact de milieux humides colorés.(84) Ces auxiliaires étaient immergés pendant un nombre d'heures précis à l'intérieur d'un bain à 37°C contenant des solutions teintées par des colorants alimentaires ou de réels aliments.(84) Les ligatures et chaînettes étaient ensuite rincées et séchées, puis numérisées.(84) L'étape suivante était l'emploi du logiciel Adobe Photoshop® pour mesurer la saturation en couleur de l'accessoire sur une échelle de 1 à 100.(84) Dr Amar-Mamou prenait quatre points de chaque accessoire coloré et faisait une moyenne.(84) Ainsi, la chercheuse détenait des données quantitatives précises pour appuyer ses comparaisons et ses conclusions et les prises de teinte étaient réalisées dans des conditions constantes de luminosité.(84) Il est important de noter que cette dernière considération n'est pas toujours facilement réalisable avec la photographie.(84)

2.8 La spectrophotométrie

2.8.1 Définition

Selon le site de LibreText Librairies qui est notamment supporté par le California State University Affordable Learning Solutions Program, la spectrophotométrie est la discipline qui s'intéresse à l'étude de l'absorption de la lumière par une substance chimique en mesurant l'intensité de la lumière lorsqu'un faisceau traverse un échantillon de cette substance.(85) Cette discipline est très utilisée en chimie, en physique, en biochimie, en génie des matériaux et en génie chimique.(85) L'instrument employé est un spectrophotomètre qui mesure la quantité de photons traversant une substance à l'étude.(85) Deux types de spectrophotomètres existent ; il peut s'agir dans un premier temps de spectrophotomètres UV-visible qui ont un spectre de lumière dans la tranche des ultraviolets de 185 à 400 nm et dans la tranche des

rayons visibles à l'œil de 400 à 700 nm.(85) Dans un deuxième temps, il existe les spectrophotomètres IR qui ont un spectre dans les ondes infrarouges de 700 à 15 000 nm.(85)

2.8.2 La transmittance et l'absorbance

La transmittance (T) correspond à la fraction de l'intensité lumineuse transmise à travers un matériau par rapport à l'intensité incidente à la longueur d'onde donnée.(18) Ainsi, plus le matériau est transparent, plus la transmittance est élevée.(18) L'absorbance (A) correspond, quant à elle, à la portion du faisceau de lumière qui est absorbée par le matériau à une certaine longueur d'onde au moment de son passage à travers la matière.(85) Il s'agit de l'inverse du logarithme de la transmittance ($A = -\log T$).(85)

En spectrophotométrie visible, l'absorbance et la transmittance peuvent être déterminées par la couleur de la substance observée. Par exemple, une substance noire aura, en théorie, absorbé toutes les longueurs d'onde visibles du spectre pour apparaître d'une telle teinte.(85) À l'inverse, une substance blanche aura réfléchi toutes les longueurs d'onde visibles du spectre entre 400 et 700 nm.(85) Il n'y aurait en théorie aucune absorption de lumière.(85) Si la substance absorbe toutes les longueurs d'onde du rouge, elle apparaît verte, car il s'agit de la couleur complémentaire du rouge dans le cercle chromatique.(85)



Figure 9 : Le cercle chromatique
(Image adaptée de https://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle_chromatique)(86)

2.8.3 Le spectrophotomètre et ses composantes

Le principe derrière le spectrophotomètre à lumière visible consiste à faire circuler un rayon de lumière dans un prisme afin de filtrer tout le rayon incident qui contient une panoplie de longueurs d'onde et le réduire à une seule d'entre elles qui circulera à travers la substance à l'étude.(85)

Ainsi, un spectrophotomètre se divise en deux grandes sections : le spectromètre et le photomètre.(85) Le spectromètre en tant que tel correspond à la portion de l'appareil qui produit, disperse et mesure la lumière incidente qui traverse la substance alors que le photomètre représente le détecteur photoélectrique qui mesure l'intensité de la lumière, une fois que cette dernière a traversé la substance.(85) Les différentes composantes d'un spectrophotomètre sont donc la source lumineuse, le collimateur, le monochromateur, le sélecteur de longueurs d'onde, la substance à l'étude, un détecteur photoélectrique et un écran digital ou une mesure métrique.(85)

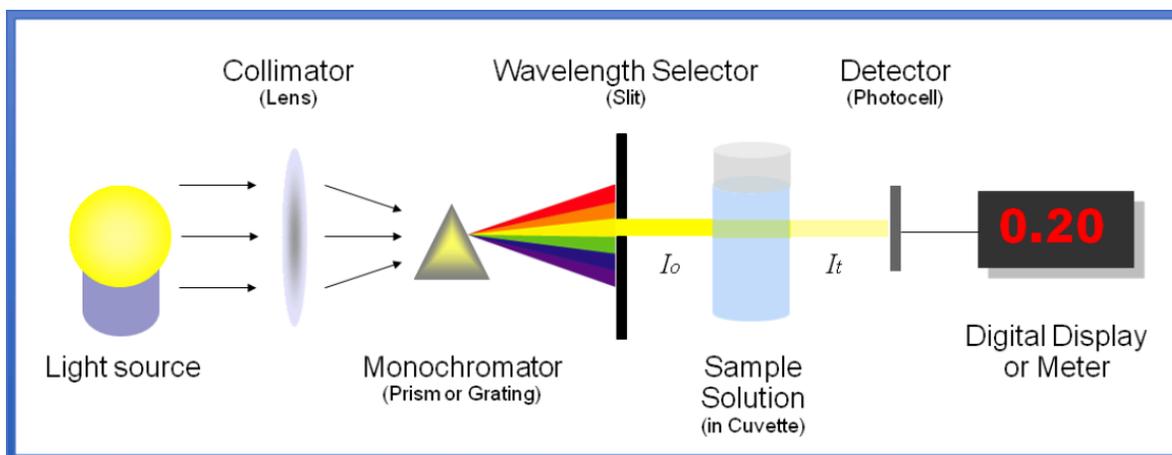


Figure 10 : Les composantes du spectrophotomètre
(Image adaptée de

https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Kinetics/Reaction_Rates/Experimental_Determination_of_Kinetics/Spectrophotometry)(85)

Le collimateur a pour but de faire converger les rayons de la source lumineuse qui arrivent en faisceau direct.(85) Ces rayons dorénavant convergents entre eux vont traverser le monochromateur qui est un prisme ou un réseau de diffraction ayant pour but de diviser le rayon incident en ses différentes longueurs d'onde le constituant.(85) Ensuite, un sélecteur de longueurs d'onde filtrera et bloquera toutes les longueurs d'onde autres que celle désirée vers la substance à l'étude.(85) Une fois que la lumière a traversé la substance, le détecteur

identifie la quantité de photons absorbée et envoie un signal au galvanomètre ou au lecteur digital pour indiquer l'absorbance ou la transmittance du produit à cette longueur d'onde.(85)

Un autre type de spectrophotomètre est celui de type infrarouge (IR) qui a pour fonction de notamment déterminer la composition du type de matériau étudié. Le test consiste à soumettre la substance à analyser à un faisceau de rayons infrarouges.(87) Cette technique est fiable, rapide et peu coûteuse pour déterminer qualitativement la composition de différents polymères.(88) Selon le Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Caoutchouc et des Plastiques, les molécules qui composent le polymère absorbent cette énergie lumineuse, s'excitent et transforment l'énergie absorbée en énergie de vibration.(87) En fonction des liaisons chimiques du plastique, un spectre de rayons infrarouges propre à lui sera obtenu et pourra révéler, par le fait même, ses composantes.(87) En effet, la position des bandes d'absorption dans le spectre étudié nous donnera le détail de la présence de certains groupes fonctionnels spécifiques dans le composé plastique selon l'entreprise américaine PerkinElmer spécialisée dans la fabrication de matériels de mesure scientifique.(88) L'ensemble des bandes obtenues pour un même polymère se compare donc aux empreintes digitales d'une personne et permet, du coup, l'identification du plastique.(88)

Pour obtenir de bons résultats avec ce type d'appareil, avoir une bonne technique d'échantillonnage est critique.(88) Il faut considérer le type, la forme et la quantité d'échantillons à analyser.(88) Il faut tout d'abord que la longueur de trajet soit courte pour obtenir une bonne mesure de transmission.(88) De nos jours, la méthode préconisée est celle ATR (réflectance totale atténuée) où le solide est pressé contre un diamant, un séléniure de zinc ou un cristal de germanium.(88) La technique de spectrophotométrie infrarouge par transmission existe aussi.(88) Pour la technique ATR, l'échantillon a besoin généralement de peu de préparation et les résultats sont précis.(88) Il faut se souvenir toutefois que cette technique par ATR en est une d'identification de surface et non de composition centrale, car la profondeur de pénétration est très petite.(88) Pour des échantillons souples comme ceux des coquilles thermoplastiques, il devient pertinent de couper une portion de l'échantillon à analyser avec un couteau ou un scalpel pour préparer une surface lisse à insérer sous le cristal ATR.(88) Si l'échantillon est plus dur ou arrondi, il est même recommandé d'aplanir l'échantillon avec des pinces à bouts plats si possible.(88) Entre la technique par ATR et celle par transmission, il faut se souvenir que la longueur de trajet effectif varie de façon

inversement proportionnelle avec la mesure de la longueur d'onde.(88) Ainsi, sur le spectre infrarouge par ATR, les bandes à grande longueur d'onde seront plus petites qu'en transmission.(88) Du coup, si on cherche une correspondance entre le matériau étudié et la banque des spectres déjà connus, il vaut mieux chercher dans une banque de données antérieures qui est propre aux analyses par ATR si on utilise cette technique.(88) Selon le Centre de Recherche sur les Nanomatériaux et l'Énergie (NanoQAM), l'ATR est une technique à préconiser pour les échantillons purs et pour les composés ayant des pics dans les basses énergies, car la résolution du spectre est en général meilleure qu'en transmission.(89)

2.9 Différents types de plastique à l'étude

2.9.1 Le polyuréthane thermoplastique

Selon l'entreprise américaine multinationale Hunstman spécialisée dans la fabrication et la distribution de produits chimiques, le polyuréthane thermoplastique est un type de plastique qui a été développé initialement en 1937.(90) Ce composé est formé d'une réaction de polyaddition entre du diisocyanate et un glycol ou plus.(90) C'est un polymère de consistance relativement molle qui durcit lorsque refroidi.(90) Il peut être retraité plusieurs fois sans perdre pour autant son intégrité de structure initiale(90). Ses propriétés multiples font de lui autant un plastique malléable dans certaines situations qu'une option de remplacement pour le caoutchouc dur, ce qui fait de lui un polymère populaire puisqu'il peut répondre à une vaste gamme de besoins.(90) Il est reconnu pour sa grande capacité d'élongation et de force en tension, son élasticité à des degrés variables, sa résistance à l'huile, au gras, aux solvants, aux produits chimiques et à l'abrasion.(90) Selon l'*American Chemistry Council*, c'est un élastomère qui est reconnu pour sa grande résilience, sa bonne compression, sa résistance aux impacts, aux déchirures, à la température variable et aux hydrocarbures.(91) Il peut être enduit d'une solution, coloré et formé par pression sous-vide.(91) Ses propriétés physiques sont dues en partie à sa composition par segments alternatifs souples et rigides, formant un copolymère en bloc segmenté linéaire.(91, 92) Le segment rigide peut être aliphatique ou aromatique.(91) Quand les isocyanates mentionnés ci-haut se combinent à des diols à courte chaîne, ils deviennent des blocs durs.(91) Normalement, le segment est aromatique, mais quand la couleur et le maintien de la clarté à l'exposition solaire sont prioritaires, on opte pour un segment aliphatique.(91)

Il existe trois sous-classes de polyuréthanes thermoplastiques : les polyesteruréthanes, les polyétheruréthanes et les polycaprolactones uréthanes.(90)

Il est intéressant de noter que les polyuréthanes thermoplastiques formés à base de polyester seraient vulnérables aux dommages causés par les bactéries et les champignons.(90) Les enzymes présents dans ces micro-organismes seraient en effet capables de briser les liens esters, ce qui entraînerait la décoloration et le craquement de ce type de polymère.(90) De plus, cette même sous-classe de polyuréthanes serait à risque d'hydrolyse lorsqu'elle est exposée à des températures hautes et à des environnements humides.(90) Les molécules d'eau sont en effet capables de diviser les groupes esters.(90) Les polyuréthanes à base de polyéther, quant à eux, sont plus résistants aux situations humides.(90) Il semblerait que les polyuréthanes thermoplastiques aient une faible résistance aux solutions acides et alcalines.(90) Ces plastiques ne peuvent supporter de tels milieux à la température pièce que pendant de courtes périodes de temps.(90) Une étude réalisée en 2014 sur la coloration de coquilles de rétention Viverra® d'Align Technology© affirme aussi que le polyuréthane n'est pas inerte et est affecté par l'humidité, la chaleur et le contact prolongé avec les enzymes intra-orales.(19)

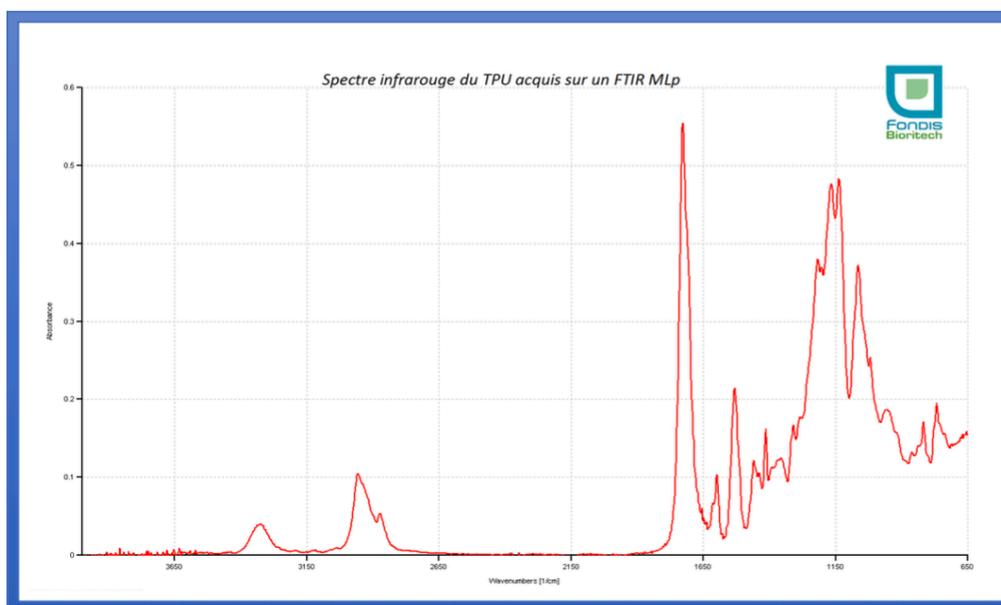


Figure 11 : Le spectre infrarouge d'absorbance du polyuréthane thermoplastique (Image adaptée de Fondis Electronic)(93)

Le pic à 3332 cm^{-1} indique le groupe N-H dans l'uréthane (-NHCOO-).(94) Les pics à 2935 et 2850 cm^{-1} appartiennent respectivement aux vibrations asymétriques et symétriques

du groupe $-CH_2-$.(94) Il s'agit des pics caractéristiques du polyuréthane thermoplastique. L'intensité de ces pics s'accroît avec le ratio croissant de polyuréthane thermoplastique dans le composé.(94)

Voici dans la figure 12 le spectre infrarouge de différentes marques de coquilles sur le marché obtenu par spectroscopie par transformée de Fourier via un échantillonnage par réflectance totale atténuée.(3) Les spectres qui nous intéressent sont les derniers du schéma, c'est-à-dire ceux ESA et INV.(3) En effet, ceux-ci correspondent respectivement aux produits provenant du plastique Essix ACE entrant dans la composition des coquilles MTM® Clear Aligner et aux produits de la marque Invisalign®.(3) Le livre *Orthodontic Applications of Biomaterials: A Clinical Guide* affirme que la coquille Invisalign est formée d'une structure d'uréthane alors que les trois autres renferment du polyéthylène téréphthalate glycolisé (PETG), un copolyester qui sera abordé dans la prochaine sous-section.(3)

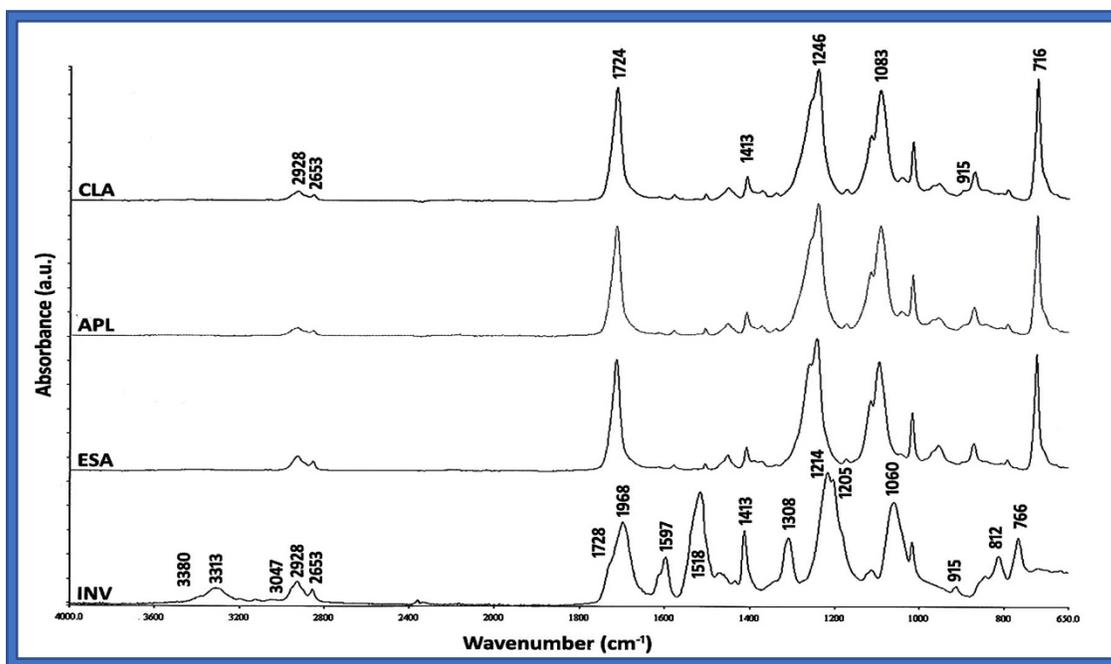


Figure 12 : Les spectres infrarouges d'absorbance de différentes marques de coquilles (CLA : Clear Aligner, APL : Essix A+ Plastic, ESA : Essix ACE plastic, INV : Invisalign) (Image adaptée de *Orthodontic Applications of Biomaterials : A Clinical Guide*)(3)

Selon l'étude d'Alexandropoulos et al. publiée en 2015, le spectre infrarouge du polyuréthane qui forme les coquilles peut être interprété ainsi.(95) Si on observe le spectre

INV, on situe des liaisons OH à 3380 cm^{-1} , des liaisons NH à 3313 cm^{-1} et des liaisons C-H aromatiques à $3047, 1605, 1597, 812$ et 766 cm^{-1} .(95) Les bandes des liaisons C-H, quant à elles, se retrouvent à $2928, 2853, 1413$ et 915 cm^{-1} .(95) Les liaisons C=O se situent à 1728 et 1308 cm^{-1} et celles amide I (C=O de NCO), à 1698 cm^{-1} .(95) Les liaisons amide II (N-H et C=O de NCO) occupent une position à 1518 cm^{-1} .(95) C-O se trouve à 1214 et 1205 cm^{-1} et C-O-C se situe à 1100 et 1060 cm^{-1} .(95)

2.9.2 Les polyesters

Cette autre famille de polymères se caractérise par le fait qu'ils contiennent un groupement ester accompagné soit par des unités d'hydrocarbures aliphatiques ou aromatiques.(96) Les polyesters commerciaux sont manufacturés par des réactions de polycondensation, les techniques couramment utilisées étant la polymérisation en fusion d'un diacide et d'un diol, la transestérification d'un diester en un diol ou la polymérisation interfaciale entre un chlorure de diacide et un diol.(97) Parmi les polyesters, on retrouve notamment le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polyéthylène téréphtalate glycolisé (PETG).(97)

Dans le polyéthylène téréphtalate (PET), on fait premièrement réagir par transestérification le diméthyle téréphtalate avec un excès d'éthylène glycol à 150 degrés Celsius à 100 kPa .(97) On obtient du bis-(2-hydroxyéthyl)téréphtalate et le méthanol distillé également obtenu pendant est, quant à lui, éliminé continuellement.(96) La réaction de pré-polymérisation (250 à 280 degrés Celsius/ $2-3\text{ kPa}$) suit pendant laquelle le bis-(2-hydroxyéthyl)téréphtalate est amené à un degré de polymérisation de 30 .(97) L'étape suivante est le processus de polycondensation pendant lequel le degré de polymérisation atteint 100 par chauffage sous-vide, la température atteignant 280 à 290 degrés Celsius et la pression, 50 à 100 Pa .(97) Selon le besoin d'avoir un PET avec un grand poids moléculaire ou une grande viscosité, il est possible d'accroître le degré de polymérisation encore plus jusqu'à 150 .(97)

Ce matériau présente une grande force et une stabilité dimensionnelle. Il a une bonne résistance à l'eau et aux acides inorganiques, mais est dilué par les acides sulfuriques et nitriques.(97) Avec le temps et l'amélioration des techniques, le produit a pu devenir très rigide, moins sensible à l'eau et présenter une température de déflexion à la chaleur très élevée (227 degrés Celsius à 264 psi). (97) Ce dernier point lui offre ainsi une excellente

stabilité thermique.(97) Ayant une petite perméabilité au dioxyde de carbone, la fin des années 1970 a vu apparaître l'emploi du polyéthylène téréphtalate dans la confection des bouteilles de boissons gazeuses principalement aux États-Unis.(97)

Pour ce qui est du polyéthylène téréphtalate glycolisé, celui-ci est conçu en remplaçant une partie des groupes d'éthylène glycol du PET par des groupes de 1,4-cyclohexane diméthanol (CHDM).(98) Ce produit créé amorphe clair a des propriétés bien à lui telles qu'une rigidité élevée, une dureté et une bonne force d'impact.(99) Le PETG démontre une bonne résistance aux solutions aqueuses diluées d'acides minéraux, de bases, de sels ou de savons.(99) Il a une bonne résistance aux hydrocarbures aliphatiques, aux alcools et à une variété d'huiles.(99)

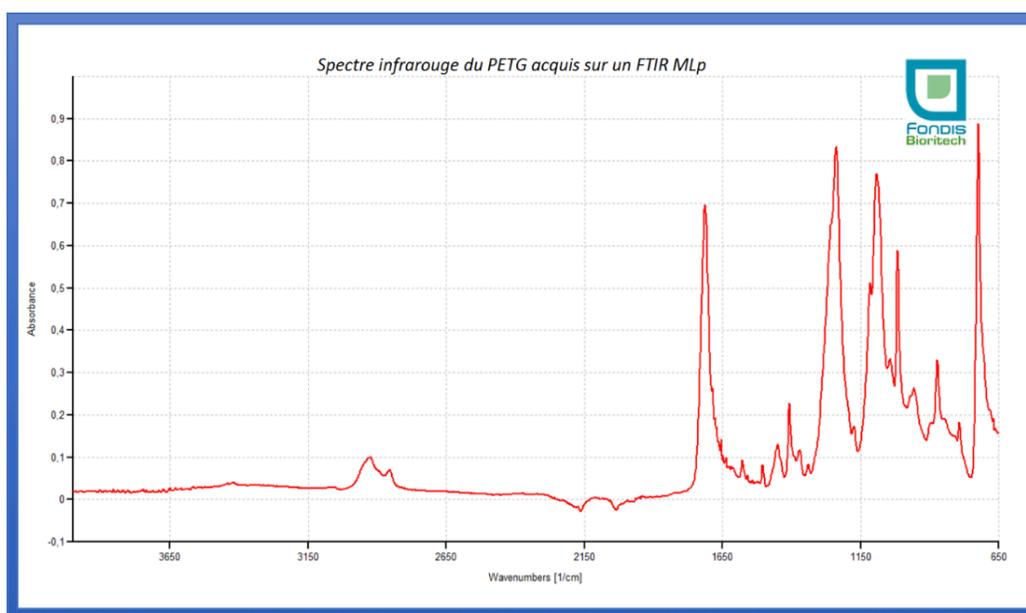


Figure 13 : Le spectre infrarouge d'absorbance du polyéthylène téréphtalate glycolisé (Image adaptée de Fondis Electronic)(100)

Si on observe la figure 12, l'expérience d'Alexandropoulos et al. avait déterminé que les trois premières marques de coquilles (CLA, APL et ESA) étaient toutes formées de polyéthylène téréphtalate glycolisé (PETG). Il semblerait donc que les coquilles de la marque MTM® de Dentsply Sirona soient constituées de ce polyester. Les bandes moléculaires identifiées étaient les suivantes : les liaisons CH à 2928, 2853, 1413, 1010 et 716 cm^{-1} , celles C=O à 1724 cm^{-1} , celles CH aromatiques à 1505 cm^{-1} et celles C-C-O à 1246 et 1083 cm^{-1} .(95)

Cette même étude a avancé que les coquilles Invisalign®, formées de polyuréthane quant à elles, présentaient des propriétés mécaniques de dureté, de module et d'indice d'élasticité significativement plus élevées que celles des trois autres marques formées plutôt en PETG. La résistance au fluage du polyuréthane était toutefois moindre que celles du polytéréphtalate d'éthylène glycolisé. On se rappelle que la dureté est un indicateur de la résistance des coquilles à l'usure, ce qui fait qu'on pourrait supposer que les coquilles Invisalign® résistent mieux à l'usure sous des conditions cliniques. En ce qui concerne le module d'élasticité, les auteurs notent qu'il s'agit d'une propriété souhaitable pour la délivrance des forces sous une contrainte constante. Ainsi, un matériau avec un module d'élasticité augmenté peut transmettre des forces similaires à un autre polymère en ayant une épaisseur moindre. La marque Invisalign® avec un indice élastique plus haut laisse présager un matériau plus cassant. Enfin, le fait d'avoir moins de résistance au fluage pourrait rendre les coquilles en polyuréthane plus à risque de se déformer sous les forces de l'arcade opposée, donc d'atténuer les forces orthodontiques appliquées par le même coup. Les auteurs ne peuvent toutefois pas affirmer que les différences entre les marques observées ont réellement un impact au niveau des résultats finaux obtenus cliniquement.(95)

Ces différences de propriétés mécaniques entre les marques sont expliquées par les structures chimiques distinctes des polymères.(95) Or, les chercheurs ont aussi identifié des distinctions entre les trois marques toutes formées de PETG.(95) Cette dernière observation s'explique selon eux par la différence de poids moléculaire d'un type de PETG à un autre et par les procédés différents de thermoformage qui peuvent influencer l'orientation des molécules, le poids moléculaire moyen ainsi que les stress résiduels causés par le refroidissement rapide du plastique sur les modèles employés.(95) Selon les compagnies, ces derniers peuvent être fabriqués en pierre ou encore en résine par la technique CAD/CAM.(95, 101)

2.10 Les produits nettoyants pour gouttières thermoplastiques

Plusieurs nettoyants différents peuvent être recommandés par les spécialistes en orthodontie afin d'entretenir adéquatement les gouttières thermoplastiques. En effet, il est important de retenir que même si le système avec coquilles est plus facilement nettoyable, il

n'en reste pas moins que les aligneurs accumulent la plaque comme le font les appareils fixes conventionnels et nécessitent des soins appropriés pour prévenir tous problèmes dentaires, parodontaux ou esthétiques qui en découlent.(11) Une étude publiée en 2013 dans le *Journal of Clinical Orthodontics* a fait des recommandations en ce qui a trait à ce que les orthodontistes devraient demander sur le plan de l'hygiène de la part de leurs patients porteurs de coquilles thermoplastiques afin d'obtenir un résultat optimal tout en protégeant les tissus solides et mous de la cavité buccale.(11) Selon ces chercheurs, les patients doivent éviter de consommer des produits alimentaires solides ou liquides avec ces appareils en bouche.(102) Ils doivent également retirer tout dépôt blanchâtre (la plaque) à la surface des coquilles, brosser leurs dents pendant deux minutes avec une brosse à dents à poils souples, utiliser de la soie dentaire et du rince-bouche fluoré en soirée et toujours mettre leurs coquilles propres dans une bouche elle-même fraîchement nettoyée.(102) Cette même étude par Moshiri et al. recommandait l'utilisation d'un bain ultrasonique ou du produit détergent Invisalign® qui consiste en des cristaux pour le retrait de la plaque.(102) L'efficacité de ces deux dernières méthodes n'était toutefois pas mentionnée dans l'article, ce pourquoi le groupe de Lombardo et al. a réalisé une étude à ce sujet.(11) Le groupe a comparé neuf techniques distinctes de nettoyage de gouttières thermoplastiques.(11) Leurs expérimentations ont démontré que l'utilisation pendant cinq minutes d'un bain ultrasonique à 42 000 Hertz combiné à une solution détergente cationique aurait les propriétés nettoyantes les plus efficaces pour retirer le biofilm bactérien à la surface de coquilles de la marque F22®.(11) La technique qui consisterait à rincer les coquilles à l'eau aurait plutôt les effets les moins bénéfiques sur le retrait de la plaque.(11) Il semble toutefois que les bains ultrasoniques soient plus dispendieux que les bains soniques, ce qui doit être considéré pour la clientèle qui débourse déjà des frais considérables pour le traitement orthodontique lui-même.(11) De plus, l'étude de Lombardo et al. a avancé que l'effet du bain ultrasonique ne se limitait pas seulement à endommager les parois cellulaires bactériennes, mais aussi la surface du polyuréthane thermoplastique testé en raison des turbulences mécaniques engendrées.(11) Une autre étude a comparé quant à elle l'effet de sept solutions chimiques nettoyantes distinctes sur des coquilles fabriquées par le matériau Essix Ace de la compagnie Dentsply Sirona.(103) Cette recherche est parue en 2018 dans le journal *The Angle Orthodontist* et elle visait à étudier spécifiquement l'effet des agents nettoyants sur ce copolyester.(103) Les propriétés étudiées sur six mois à raison de deux

nettoyages par semaine étaient la transmittance de la lumière, le module de flexion et la rugosité de surface.(103) L'étude portait notamment sur les cristaux de la marque Invisalign® et les comprimés à dissoudre Retainer Brite®.(103) Ces derniers représentaient les deux seules techniques employées à ne pas avoir réduit le module de flexion du plastique, ce qui est appréciable.(103) À l'autre opposé, le peroxyde d'hydrogène 3% aurait le plus augmenté le module de flexion du plastique.(103) Le produit Listerine® aurait affecté, quant à lui, le plus la transmittance de la lumière après six mois, possiblement en raison de son contenu en alcool éthylique élevé (21,6%).(103)

2.10.1 Le bain Cordless Sonic Cleaner et son comprimé à dissoudre Retainer Brite®

La compagnie produisant l'appareil Cordless Sonic Cleaner, c'est-à-dire Dentsply Sirona©, affirme qu'il peut nettoyer et éclaircir les appareils dentaires amovibles thermoplastiques en au moins quinze minutes.(104) L'effet vibrant mécanique est recommandé en conjonction avec l'effet chimique d'un comprimé Retainer Brite® à dissoudre dans de l'eau.(105) Ces comprimés nettoyants auraient comme rôle de préserver la clarté et la propreté des appareils orthodontiques amovibles comme notamment les gouttières thermoplastiques.(105, 106) Ils retireraient également le tartre et la plaque.(106) D'autres appareils amovibles pouvant être nettoyés seraient les appareils de rétention, les prothèses complètes amovibles (dentiers), les protecteurs buccaux de sport, les protections de nuit, les appareils anti-bruxisme et les appareils pour articulations temporo-mandibulaires.(104) Les patients présentant des allergies aux persulfates devraient éviter l'utilisation de ces pastilles puisqu'elles en contiennent.(104) Les comprimés Retainer Brite® doivent être utilisés pendant quinze minutes dans une quantité d'eau tiède et non chaude qui recouvre complètement les appareils à nettoyer.(104) Il est important de se laver les mains convenablement avant et après l'utilisation de ce produit.(104) Ces comprimés devraient être utilisés selon la compagnie sur une base quotidienne pour optimiser les résultats et ils sont à usage unique.(104) Selon la compagnie les produisant, ces pastilles réduiraient les odeurs et élimineraient 99% des bactéries courantes les produisant telles que le staphylococcus aureus, le fusobacterium nucleatum, le pseudomonas aeruginosa et le escherichia coli.(104, 106) Une étude publiée dans le journal The Angle Orthodontist en mai 2017 affirme que ces comprimés à base de

peroxyde alcalin employés secondairement au brossage mais sans bain sonore ne réduisent par le compte microbactérien sur les coquilles Essix de façon statistiquement significative en comparaison au brossage seul avec de l'eau de ces mêmes appareils amovibles.(107) Les comprimés Retainer Brite n'étaient pas efficaces contre l'élimination de Streptococcus mutans, Staphylococcus epidermidis et Staphylococcus aureus.(107) Les résultats semblaient similaires pour les deux autres marques de pastilles testées, c'est-à-dire Kukis® et Corega® bien que les dernières mentionnées, celles Corega®, semblaient avoir un effet inhibitoire très légèrement marqué pour Staphylococcus epidermidis.(107)



Figure 14 : Le bain sonore et comprimés Retainer Brite®
(Image adaptée de <https://www.amazon.co.uk/Retainer-Cleaner-Cleaning-Batteries-Included/dp/B00GRBB1Z4>)(108)

2.10.2 Les cristaux à dissoudre Invisalign®

Il existe sur le marché des cristaux nettoyants de la marque Invisalign® à dissoudre dans une certaine quantité d'eau afin de nettoyer les gouttières thermoplastiques. La compagnie Align Technologie donne très peu de détails sur la composition des cristaux.(109) Selon le groupe de Levrini et al., ce système de nettoyage est constitué de granules effervescentes qui contiennent du carbonate de sodium et du sulfate.(110) Nous savons aussi qu'il faut laisser tremper quinze minutes les coquilles dans l'eau dans laquelle on a dissous les cristaux pour retirer la plaque de ces appareils amovibles.(111) Le guide d'utilisation de ce

produit avance aussi que les gouttières doivent être placées dans 100 ml d'eau chaude ou tiède dans laquelle les cristaux auront été préalablement dissous par agitation pendant 20 secondes.(111) À la fin du quinze minutes de trempage, il faut réagiter 20 secondes avant de retirer les coquilles du mélange aqueux et les rincer minutieusement à l'eau tiède.(111) Il semblerait que les cristaux conservent les aligneurs hygiéniques, propres et clairs.(42) Il est aussi noté sur le site Internet de la compagnie qu'il s'agit de la meilleure méthode pour nettoyer les appareils selon elle.(42) Une étude publiée en mai 2018 dans le journal The Angle Orthodontist a comparé ce produit à six autres techniques de brossage n'incluant pas le produit présenté à la sous-section précédente.(20) Les auteurs ont évalué notamment la transmission de lumière à travers du polyuréthane sous forme de feuille servant à former les coquilles Viverra® de Align Technology.(20) Ils ont eu recours à un spectrophotomètre produisant des longueurs d'ondes variant de 380 et 740 nm.(20) Il semblerait qu'après 6 mois, les cristaux Invisalign, tout comme les produits étudiés des marques Polident® et Listerine®, ont démontré le moins de changement au niveau de la transmittance comparativement à d'autres techniques employées.(20) Il est important de mentionner que le polymère n'était pas exposé à des produits colorants préalablement.(20)



Figure 15 : Les cristaux nettoyants de la marque Invisalign®
(Image adaptée de https://www.qoo10.sg/item/INVISALIGN-INVISALIGN-CLEANING-CRYSTALS-FOR-ALIGNERS-AND-RETAINERS/656797895?__ar=Y)(112)

Chapitre 3. Objectifs et hypothèses

3.1 Objectifs

L'objectif principal est de comparer par colorimétrie la résistance aux changements de couleur de trois marques de coquilles thermoplastiques américaines populaires exposées à l'une des quatre solutions colorantes ou à la solution contrôle.

3.1.1 Objectifs secondaires

- Comparer, par colorimétrie, l'efficacité de deux types de nettoyants populaires à redonner la clarté et à nettoyer les taches des gouttières.
- Confirmer le type de polymère qui compose la surface externe et interne des trois différentes marques d'aligneurs à l'aide de la spectrophotométrie infrarouge.

3.2 Hypothèses

1. Hypothèses de recherche :

- Certaines compagnies de coquilles présenteront des changements de coloration plus marqués que d'autres.
- Les deux techniques de nettoyage n'auront pas le même potentiel de retrait des taches créées.
- Le type de polymère différera d'une marque de coquilles à l'autre.

2. Hypothèses nulles :

- Les trois marques de coquilles thermoplastiques évaluées auront des changements de couleur identiques au contact de l'un des quatre substrats colorés ou de la solution contrôle
- Les deux techniques de nettoyage auront le même potentiel de retrait de taches créées.
- Le type de polymère ne différera pas d'une marque de coquilles à l'autre.

3.3 Résultats attendus

- Variation de coloration en fonction de la marque évaluée :
 - Les gouttières Invisalign® pourraient être plus promptes à changer de couleur au contact du café que d'autres marques d'aligneurs comme présenté précédemment par Liu et al.

- Variation en fonction du substrat colorant évalué :
 - Nous supposons que certains produits alimentaires comme le café et le thé seront plus aptes à modifier la teinte et la transmittance des échantillons que le vin rouge et le cola.

- Variation en fonction du nettoyant employé pour retirer les taches :
 - Selon nous, la combinaison de l'effet mécanique du bain sonore et de l'effet chimique du produit Retainer Brite® sera plus efficace que l'action purement chimique des cristaux dissous de la marque Invisalign®. Ainsi, nous supposons que le comprimé nettoyant à dissoudre Retainer Brite® avec son bain sonore sans corde dans lequel tremperont les gouttières retirera plus efficacement les taches que les cristaux dilués dans l'eau vendus par Align Technology Inc.

- Variation de composition des trois marques de coquilles :
 - Nous croyons que les coquilles Invisalign® auront une composition formée principalement de polyuréthane.
 - Nous établissons comme hypothèse que les aligneurs ClearCorrect® seront composés de polyuréthane.
 - Nous supposons que les coquilles MTM® Clear Aligner seront formées de polyéthylène téréphtalate glycolisé.

Chapitre 4. Article

4.1 Préface

L'article ci-joint a été soumis au journal *Head and Face Medicine* en novembre 2019. Il s'intitule *Colorimetric and spectrophotometric measurements of orthodontic thermoplastic aligners exposed to various staining sources and cleaning methods*. L'étudiante Gabrielle Bernard a fourni un apport original, indépendant et spécifique à la rédaction de celui-ci en agissant à titre de première auteure. Elle a également réalisé les manipulations. Monsieur Pierre Rompré a assuré la réalisation des calculs statistiques. Le codirecteur de recherche, le professeur Jason Robert Tavares, ainsi que la directrice de recherche, la docteure Andrée Montpetit, ont supervisé de près l'élaboration de l'écriture pour en optimiser le résultat final en plus de diriger les différentes expérimentations requises.

4.2 Article soumis

Colorimetric and spectrophotometric measurements of orthodontic thermoplastic aligners exposed to various staining sources and cleaning methods.

Authors :

Dr. Gabrielle Bernard, DMD

Pierre Rompré, MSc

Prof. Jason Robert Tavares, Eng., Ph.D., MCIC

Dr. Andrée Montpetit, DMD, MSc ortho, FRCD(c)

Author for correspondence :

Jason Robert Tavares

Department of Chemical Engineering

Polytechnique Montreal

Tel. : 1-514-340-4711, ext. 2326

E-mail : Jason.tavares@polymtl.ca

ABSTRACT

Background: Manufacturers of orthodontic aligners suggest that users remove appliances every time they consume solid foods or any drink (except water). This is to avoid a color change within the clear thermoplastic material of which they are made. However, limited quantitative evidence exists to guide users and practitioners in this regard. Herein, we evaluated the color stability of the polymer forming three different American brands of aligners and the stain-removal potential of two cleansers to provide such guidelines.

Methods: The removable appliances (300 specimens, 100 per brand) were exposed to different staining agents common in a regular diet (coffee, black tea, red wine, cola) or to a control solution *in vitro* for 12 hours over 7 days. The three brands evaluated were Invisalign®, ClearCorrect® and Minor Tooth Movement®. These were then cleaned by using either Invisalign® cleaning crystals or the Cordless Sonic Cleaner combined with a Retainer Brite® tablet. The CIELAB color space approach was used to compare color changes (ΔE) in aligners before immersion (T0), after a 12-hour exposure (T1), after a 7-day exposure (T2) and after cleaning (T3). Statistical methods (Levene's test, ANOVA, Brunner-Langer model, Tukey's range test and t-test) were used to identify interactions between the brands themselves or between the brands and the cleaning methods. Statistical analyses were performed at the .05 significance level.

Results: A 12-hour or 7-day exposure to instant coffee or red wine significantly colored the Invisalign® aligners compared to the two other brands. Black tea created an important extrinsic color change for all three brands after 7 days. Clinically, both cleaning methods showed a better efficacy in removing stains from black tea compared to other staining agents.

Conclusions: The Invisalign® aligners were more prone to pigmentation than the ClearCorrect® or the Minor Tooth Movement® devices after an exposure to coffee or red wine. Black tea caused important stains on the surface of the three tested brands. Both cleansing methods performed similarly.

Keywords: Aligner, Orthodontics, Colorimetry, Staining, Cleaning

Background

Thermoplastic orthodontic aligners are a popular replacement option to conventional fixed appliances such as braces.(1) These removable appliances are sought, in particular, by adults looking for a more aesthetic option with less metal exposure.(4) Patients are normally asked to wear their aligners full-time except when they eat or drink anything except water, or when they brush or floss their teeth.(12, 102) However, many patients do not have complete compliance (16) and consume coloring agents with their devices despite the orthodontists' or manufacturers' recommendations.(11) This leads to a change within the polymer forming the aligners, affecting their transparency, which is one of their main advantages.(17-19)

Few studies have examined the color stability of orthodontic aligners to staining agents, and only on a limited set of brands available on the market.(17-19) While there have been studies evaluating the removal of bacterial biofilms at the surface of aligners by different cleaning products and methods(11, 107), a select few articles compared the transparency of aligners after cleaning.(20, 103, 113) To our knowledge, no study exists in which thermoplastic aligners are both exposed to coloring agents and subjected to a cleansing cycle to verify the color changes of the devices.

The main objective of our study was to evaluate the stain resistance of three different American aligner brands for up to seven days in a staining solution *in vitro*. Our second aim was to evaluate the stain-removal potential of two cleaning techniques after immersion.

Methods

300 aligners were used for testing: 100 were from Invisalign® (INV)(Align Technology Inc, San Jose, CA, USA), 100 from ClearCorrect® (CC)(ClearCorrect LLC, Rock Round, TX, USA) and 100 from Minor Tooth Movement® (MTM)(Dentsply Sirona Inc, York, PA, USA). The vast majority of aligners were not identical in that they were not necessarily all thermo-formed on the same model.

INV appliances are made from SmartTrack, a multilayer thermoplastic polyurethane combined with an integrated elastomer.(18, 37) CC devices are made of Zendura®, a polyurethane resin.(45) The MTM Safety Data Sheet states it is composed of Essix Ace, a polymer combining a copolyester (95%) and trade secret material (5%).(50) The copolyester

was previously identified via Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) as polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG).(95)

Five different coloring media were employed. Each had a volume of 2.5 L and was maintained at $37\pm 1^{\circ}\text{C}$ in a thermostated water bath (PolyScience WB05A11B, PolyScience, Niles, IL, USA). Fresh solutions were prepared daily for the 7-day immersions. A submersible water pump (Gold Wing 3,5V-9V 3W USB-1020, Goldwing, Beijing, China) was used during the immersions to ensure mixing, and two glass sheets kept the specimens submerged (Fig. 16).

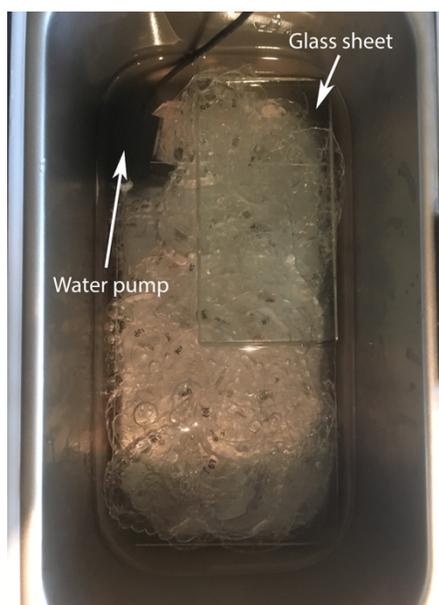


Figure 16. Specimens submerged into the control solution with two glass sheets and the Gold Wing water pump.

The instant coffee solution consisted of 30 grams of instant coffee powder (Nescafé® Original, Nestlé, Vevey, Vaud, Switzerland) per 2.5 L of boiling distilled water (as per a previous study(19)). For the tea (English Breakfast Tea, Twinings, Andover, England), 9 bags per 2.5 L of boiling distilled water was used (steeped for four minutes). The cola (Coca-Cola, Coca-Cola Company, Atlanta, GA, USA) and red wine (Merlot/Malbec Astica, Bodegas Trapiche, Mendoza, Argentina) coloring media were used as supplied. For the control solution, 500 mL of saliva replacement gel (Biotène® Oral Balance, GlaxoSmithKline, Brentfort, England) diluted in 2 L of distilled water was employed (as per (18)). Each aligner was immersed in one of the five solutions over 12 hours or 7 days (Fig. 17). Aligners were briefly immersed in distilled water after a 12-hour exposure before analysis. For a 7-day immersion,

aligners were quickly rinsed with distilled water every 24 hours before being re-immersed in a fresh solution bath.

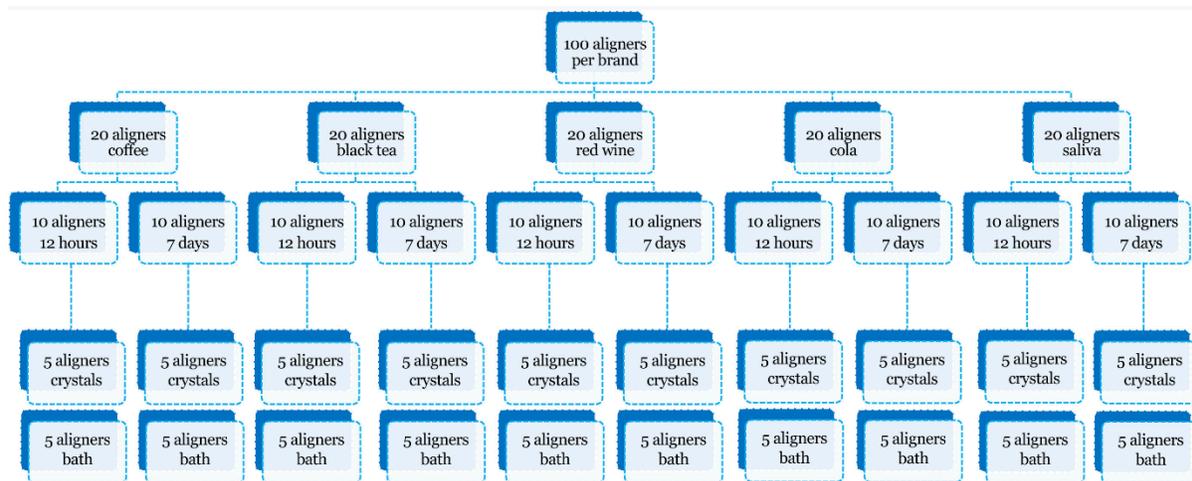


Figure 17. Breakdown of the experimental conditions used to analyze the 100 aligners per brand.

Among the various products on the market, two cleaning methods were retained: Invisalign® cleaning crystals (Align Technology Inc, San Jose, CA, USA) and the Cordless Sonic Cleaner combined with a Retainer Brite® tablet (Dentsply Sirona Inc, York, PA, USA). These two techniques were chosen as they constitute cleaning options offered by two of the three American companies producing the aligners studied in our research. Aligners were cleaned separately with each approach lasting 15 minutes. One bag of crystals was diluted in 100 mL of distilled water at room temperature (22°C) immediately before aligner immersion. In the case of the Retainer Brite® tablet, it was incorporated in an active Cordless Sonic Cleaner bath containing 100 mL of distilled water at room temperature (22°C) at the same time as the aligner to be cleaned. Before color analysis, each sample was rinsed with distilled water and dried with compressed air.

Colorimetry

The color changes (ΔE) were calculated via the Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) $L^*a^*b^*$ color system. L^* indicates luminosity from darkness to lightness (values from 0 to 100, 0 = black and 100 = white). a^* and b^* are two axes of the chromatic scale. A positive a^* corresponds to red, while negative means green. A positive b^* corresponds to yellow whereas negative is blue.(81) ΔE was calculated in accordance with the formula(17, 81) :

$$\Delta E = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2}$$

ΔL^* , Δa^* and Δb^* are the subtractions of the L^* , a^* and b^* color parameters collected at various times T1–T0, T2–T0, T3–T1, T3–T2 and T3–T0 (for 12h and 7d separately):

T0: before specimen immersion (as-received aligner)

T1: after a twelve-hour exposure to a staining solution

T2: after a seven-day exposure to a staining solution

T3: after a 15-minute cleaning by one of the two techniques

To obtain the color parameters, the 300 aligners were scanned at T0, T1 or T2 and T3 with an Epson Perfection V700 Photo flatbed scanner (Seiko Epson Corporation, Suwa, Nagano, Japan). Before every measurement session, the scanner was calibrated with an IT8 SilverFast Fuji transparent target (LaserSoft Imaging, Kiel, Germany) and the SilverFast Ai Studio 8 one software (LaserSoft Imaging, Kiel, Germany). The positive and transparent film scanned images had a resolution of 1800 ppi. They were saved as uncompressed TIFF images to retain all data.

The images were analyzed with Adobe Photoshop® CS6 software (Adobe, San Jose, CA, USA). Five regions were kept as similar as possible from one measurement session to the other in order to obtain a mean as repeatable as possible. The chosen areas were situated in the posterior part of each arch in order to avoid any overlap in the polymer. The tips of the cuspids, the grooves or the pits of the teeth were favorably selected. The National Bureau of Standards

(NBS) system was used to offer a clinical interpretation (perception) to the color change values (ΔE) obtained (Table 2) (17, 81):

$$\text{NBS} = \Delta E \times 0.92$$

Table 2. National Bureau of Standards ratings

National Bureau of Standards units	Description of color change
0.0 – 0.5	Trace: extremely slight change
0.5 – 1.5	Slight: slight change
1.5 – 3.0	Noticeable: perceivable
3.0 – 6.0	Appreciable: marked change
6.0 – 12.0	Much: extremely marked change
12.0 and more	Very much: change to other color

To our knowledge, this method to assess color change of aligners by scanning has not been described before. However, the only other instance we have identified describing this approach is from a thesis studying orthodontic elastomeric auxiliaries.(84) We believe that the use of a cursor to situate a specific region of a magnified aligner at high resolution is more precise than the use of a larger tip intra-oral colorimeter.(17)

Statistical analyses were conducted with the IBM *SPSS Statistics* 25.0 and the *Statistical Analysis System* (SAS) 9.4 software packages. The Levene’s test was used to assess homogeneity of variances across groups. The one-way ANOVA and nonparametric ANOVA-type statistic (Brunner-Langer(114)) were used when appropriate to compare the mean color changes among the 3 brands. Two-way ANOVA or nonparametric ANOVA-type statistic (Brunner-Langer) identified interactions between the brands and the cleaning techniques concerning the color changes. Tukey correction was applied for pairwise comparisons. T-test was used to compare the effects of different cleaning methods, if there was an interaction between a brand and the two cleaning techniques. A p value <0.05 was considered statistically significant. When a significant interaction effect was found, only the highest level of

interaction was reported. Lower level significant interactions were not mentioned in this article if they were not visible by the human eye or only appreciable by a skilled individual.

Spectrophotometry

Fifteen additional aligners (5 per brand) were analyzed via FTIR spectrophotometry to identify the polymer composition of the internal and external surfaces of the different shells. A Thermo Fisher Nicolet iS5 (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) in Attenuated Total Reflectance (ATR) mode (iD7 with a diamond plate accessory) was used in conjunction with the OMNIC FTIR 9.2.86 software. Three different regions per surface were sampled. The scan resolution was 4 cm^{-1} and the scan range was $400\text{ to }4000\text{ cm}^{-1}$. 16 scans were averaged by the software.

Results

The one hundred MTM aligners used were formed out of one of two different models (one per dental arch) used by Dentsply Sirona© (the company that supplied them for our research). The CC and INV aligners were all different models. It was relevant for us to know whether comparing sets of five aligners formed on different models and, consequently, changing the location of the five chosen areas per shell from one appliance to the other affected the results. To that end, we compared the standard deviations obtained for readings on MTM aligners compared to CC ones and found no statistical difference ($p=0.504$). All colorimetric results are listed in Table 3.

Table 3. Means (\pm SD) of color changes (ΔE) at various time intervals for 3 aligners brands, 5 staining agents and 2 cleansers

Brand	Staining agent	Cleanser	ΔE (T1-T0) IC	ΔE (T2-T0) IC	ΔE (T3-T1)	IC	ΔE (T3-T2)	IC	ΔE (T3-T0) 12h group	IC	ΔE (T3-T0) 7d group	IC
INV	Coffee	Crystals	7.12 (\pm 2.27) a	27.76 (\pm 4.99) a	1.51 (\pm 0.38)	a	1.72 (\pm 1.23)	a	6.29 (\pm 2.35)	a	29.83 (\pm 2.50)	a
		RB			1.41 (\pm 0.59)		1.47 (\pm 0.57)		5.48 (\pm 2.77)		22.94 (\pm 3.20)	
	Cola	Crystals	0.92 (\pm 0.34) a	0.74 (\pm 0.27) a	0.80 (\pm 0.23)	a	0.82 (\pm 0.37)	a	1.22 (\pm 0.28)	b	0.69 (\pm 0.59)	a
		RB			0.35 (\pm 0.09)		0.51 (\pm 0.20)		1.01 (\pm 0.22)		0.75 (\pm 0.18)	
	Saliva	Crystals	0.90 (\pm 0.27) ab	1.06 (\pm 0.18) b	0.41 (\pm 0.20)	a	0.45 (\pm 0.28)	a	1.05 (\pm 0.43)	ab	1.33 (\pm 0.31)	a
		RB			0.53 (\pm 0.21)		0.52 (\pm 0.16)		1.11 (\pm 0.38)		1.44 (\pm 0.27)	
	Tea	Crystals	1.56 (\pm 0.65) a	23.01 (\pm 3.24) a	1.27 (\pm 0.49)	a	22.07 (\pm 4.28)	a	0.95 (\pm 0.26)	b	3.15 (\pm 1.33)	a
		RB			1.15 (\pm 0.41)		17.14 (\pm 2.19)		1.27 (\pm 0.42)		4.86 (\pm 1.12)	
	Wine	Crystals	5.66 (\pm 0.43) a	15.75 (\pm 2.99) a	0.61 (\pm 0.35)	n/a	1.71 (\pm 0.87)	b	5.00 (\pm 0.47)	a	15.84 (\pm 2.25)	a
		RB			2.00 (\pm 0.90)		1.22 (\pm 0.70)		4.02 (\pm 1.09)		13.20 (\pm 2.65)	
CC	Coffee	Crystals	0.98 (\pm 0.25) b	1.97 (\pm 0.67) b	1.26 (\pm 0.40)	a	1.81 (\pm 0.33)	a	1.20 (\pm 0.32)	b	1.08 (\pm 0.42)	b
		RB			1.25 (\pm 0.28)		2.02 (\pm 0.88)		1.13 (\pm 0.59)		0.98 (\pm 0.18)	
	Cola	Crystals	0.88 (\pm 0.32) a	0.87 (\pm 0.26) a	0.89 (\pm 0.37)	a	0.61 (\pm 0.37)	a	0.97 (\pm 0.59)	b	1.13 (\pm 0.41)	a
		RB			0.84 (\pm 0.25)		0.41 (\pm 0.17)		1.31 (\pm 0.18)		0.92 (\pm 0.40)	
	Saliva	Crystals	1.20 (\pm 0.51) a	1.33 (\pm 0.57) b	0.67 (\pm 0.30)	a	0.71 (\pm 0.21)	a	1.17 (\pm 0.45)	a	0.99 (\pm 0.51)	ab
		RB			0.47 (\pm 0.43)		0.71 (\pm 0.49)		1.15 (\pm 0.49)		1.28 (\pm 0.54)	
	Tea	Crystals	0.85 (\pm 0.29) b	19.28 (\pm 3.51) a	0.99 (\pm 0.23)	a	18.87 (\pm 2.45)	a	0.49 (\pm 0.15)	a	1.39 (\pm 0.62)	b
		RB			1.01 (\pm 0.18)		15.71 (\pm 4.49)		0.31 (\pm 0.38)		2.91 (\pm 0.38)	
	Wine	Crystals	1.47 (\pm 0.25) b	1.22 (\pm 0.47) b	2.03 (\pm 0.43)	n/a	1.40 (\pm 0.68)	ab	1.26 (\pm 0.32)	b	1.23 (\pm 0.40)	b
		RB			1.90 (\pm 0.20)		1.13 (\pm 0.48)		1.18 (\pm 0.25)		0.97 (\pm 0.68)	
MTM	Coffee	Crystals	0.91 (\pm 0.32) b	1.45 (\pm 0.42) b	1.32 (\pm 0.39)	a	1.78 (\pm 0.41)	a	0.55 (\pm 0.15)	c	0.61 (\pm 0.18)	c
		RB			1.12 (\pm 0.30)		1.01 (\pm 0.38)		0.79 (\pm 0.32)		0.85 (\pm 0.30)	
	Cola	Crystals	0.65 (\pm 0.33) a	0.78 (\pm 0.21) a	0.59 (\pm 0.29)	a	0.52 (\pm 0.09)	a	0.54 (\pm 0.24)	a	0.86 (\pm 0.18)	a
		RB			0.72 (\pm 0.26)		0.66 (\pm 0.14)		0.94 (\pm 0.28)		0.89 (\pm 0.30)	
	Saliva	Crystals	0.63 (\pm 0.29) b	0.66 (\pm 0.23) a	0.58 (\pm 0.11)	a	0.68 (\pm 0.29)	a	0.68 (\pm 0.18)	b	0.96 (\pm 0.32)	b
		RB			0.55 (\pm 0.13)		0.66 (\pm 0.08)		0.75 (\pm 0.31)		0.70 (\pm 0.19)	
	Tea	Crystals	1.03 (\pm 0.36) b	21.21 (\pm 2.98) a	1.37 (\pm 0.41)	a	21.02 (\pm 2.01)	a	0.81 (\pm 0.50)	b	0.73 (\pm 0.26)	b
		RB			0.86 (\pm 0.38)		19.16 (\pm 3.62)		0.77 (\pm 0.24)		2.14 (\pm 1.33)	
	Wine	Crystals	0.90 (\pm 0.26) c	0.81 (\pm 0.42) b	0.97 (\pm 0.27)	n/a	0.69 (\pm 0.09)	a	0.87 (\pm 0.27)	c	0.90 (\pm 0.29)	b
		RB			1.39 (\pm 0.20)		0.66 (\pm 0.40)		0.79 (\pm 0.30)		0.86 (\pm 0.33)	

SD, standard deviation; CC, ClearCorrect; INV, Invisalign; MTM, Minor Tooth Movement; RB, Retainer Brite; IC, Intergroup comparison. Intergroup comparison of color differences among the various aligner types according to the Tukey's multiple comparison test. Non-identical letters (a, b and c) indicate a statistically significant difference between aligner types in each solution at each time point ($P < 0.05$). n/a was used as the t-test demonstrated a different effect among the two cleansers as described in the results section.

Color change after a 12-hour exposure showed a significant difference in mean values for INV compared to the two other brands for coffee (Brunner-Langer, $p < 0.0001$ for INV-CC and INV-MTM) and red wine (one-way ANOVA, $p < 0.001$ for INV-CC and INV-MTM). (Fig. 18)

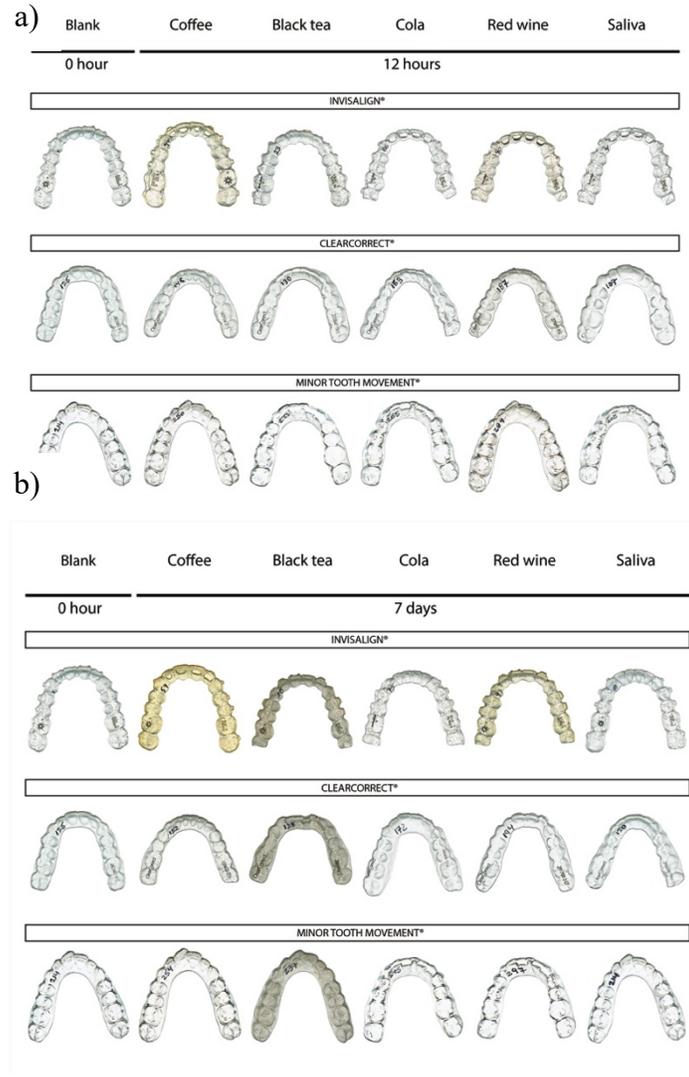


Figure 18. Photographs of the three brands of aligners before and after staining in each solution (a) for 12 hours (b) for 7 days.

After a seven-day immersion in staining agents, the color changes are enhanced. Again, there is a significant difference in mean values for INV compared to its competitors for coffee (Brunner-Langer, $p < 0.0001$ for INV-CC and INV-MTM) and red wine (Brunner-Langer, $p < 0.0001$ for INV-CC and INV-MTM). A seven-day exposure to tea created high mean values of

$\Delta E \pm$ standard deviation from baseline for the three brands (ΔE INV \pm SD = 23.01 ± 3.24 ; ΔE CC \pm SD = 19.28 ± 3.51 ; ΔE MTM \pm SD = 21.21 ± 2.98) without any statistically significant difference between them. (Fig. 18)

The comparisons of the mean values of ΔE between T3 and T1 showed that the Retainer Brite® tablet combined with the sonic bath cleaned the INV (t-test, p 2-tailed = 0.012) and MTM (t-test, p 2-tailed = 0.024) aligners exposed to wine during 12 hours significantly more than the INV crystals. (Fig. 19)

The comparisons of the mean values of ΔE between T3 and T2 did not demonstrate any interaction between brands and cleansers. However, we observed that the mean values of color change for the cleaning of the aligners exposed 7 days to tea were important (ΔE INV \pm SD = 19.60 ± 4.13 ; ΔE CC \pm SD = 17.29 ± 3.80 ; ΔE MTM \pm SD = 20.09 ± 2.93) although there was no statistically significant difference between them. (Fig. 19)

The measurements of the color changes between T3 and T0 for the 12-hour immersion groups showed that the INV shells exposed to coffee or red wine were significantly more stained even after a cleaning by either technique compared to CC and MTM (coffee: Brunner-Langer, p = 0.0010 for INV-CC and p < 0.0001 for INV-MTM / wine: Brunner-Langer, p < 0.0001 for both INV-CC and INV-MTM). (Fig. 19)

For the 7-day exposure groups (T3-T0), we observed that the INV aligners immersed in coffee or red wine were significantly more stained than the other two brands after a cleansing cycle (Brunner-Langer, p < 0.0001 for INV-CC and INV-MTM for both coffee and red wine). The INV aligners were also more stained than CC or MTM after a 7-day exposure to black tea followed by a cleaning, but to a lesser extent. (two-way ANOVA, p = 0.001 for INV-CC and p < 0.001 for INV-MTM). (Fig. 19)

No relevant statistically significant variation of ΔE was noted between the CC and the MTM aligners for the different time intervals.

ATR-FTIR confirmed that the INV and CC appliances are made of a polyurethane-based material(115, 116), whereas the MTM aligners are a PETG-based polyester(117). (Fig. 20) The FTIR spectrum of CC aligners shares features with that of polyetherurethane, but only a 63% match, which may indicate differences in polymer chain lengths, specific tailored functionalities or the presence of additives.

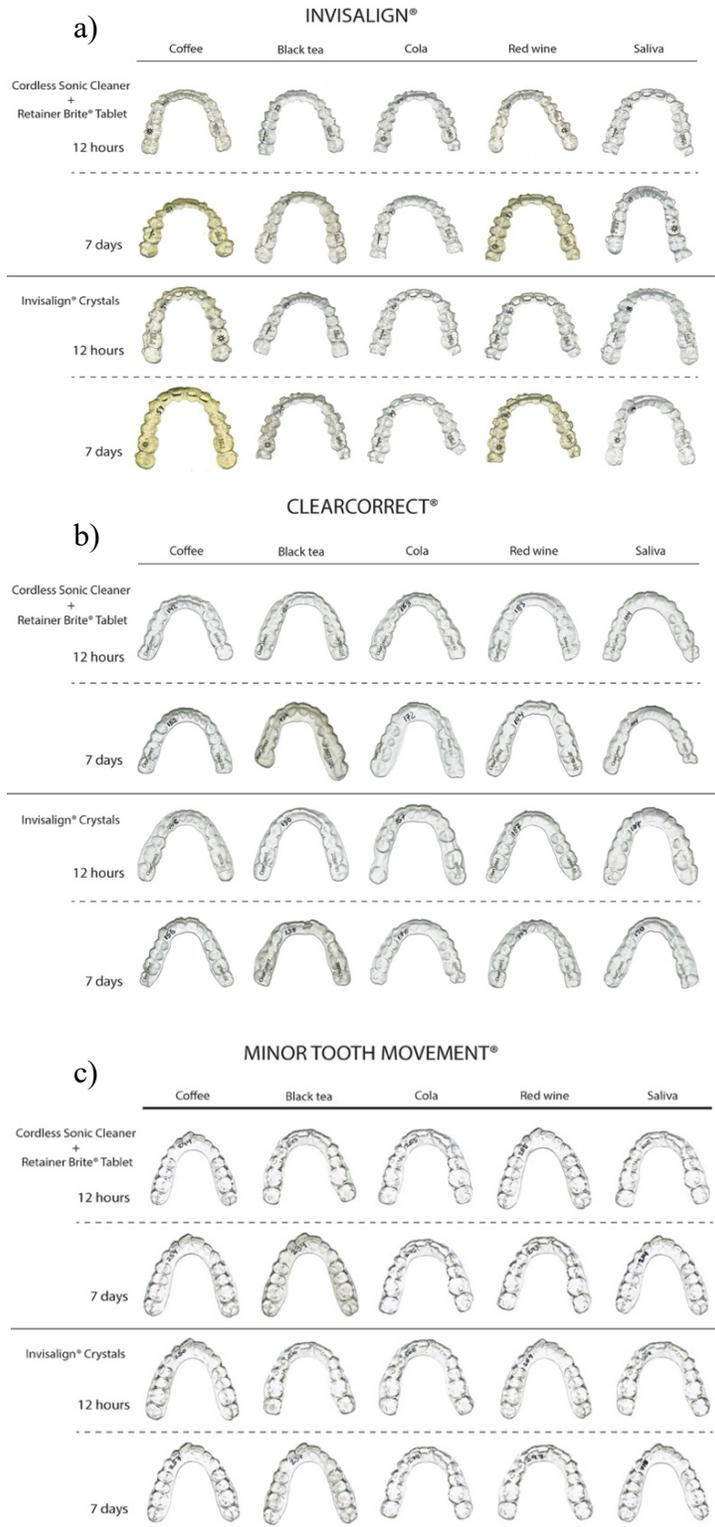


Figure 19. Photographs of the aligners after staining and cleansing cycles by either the Invisalign® crystals or the Retainer Brite® tablet combined with the Cordless Sonic Cleaner (a) Invisalign® (b) ClearCorrect® (c) Minor Tooth Movement®

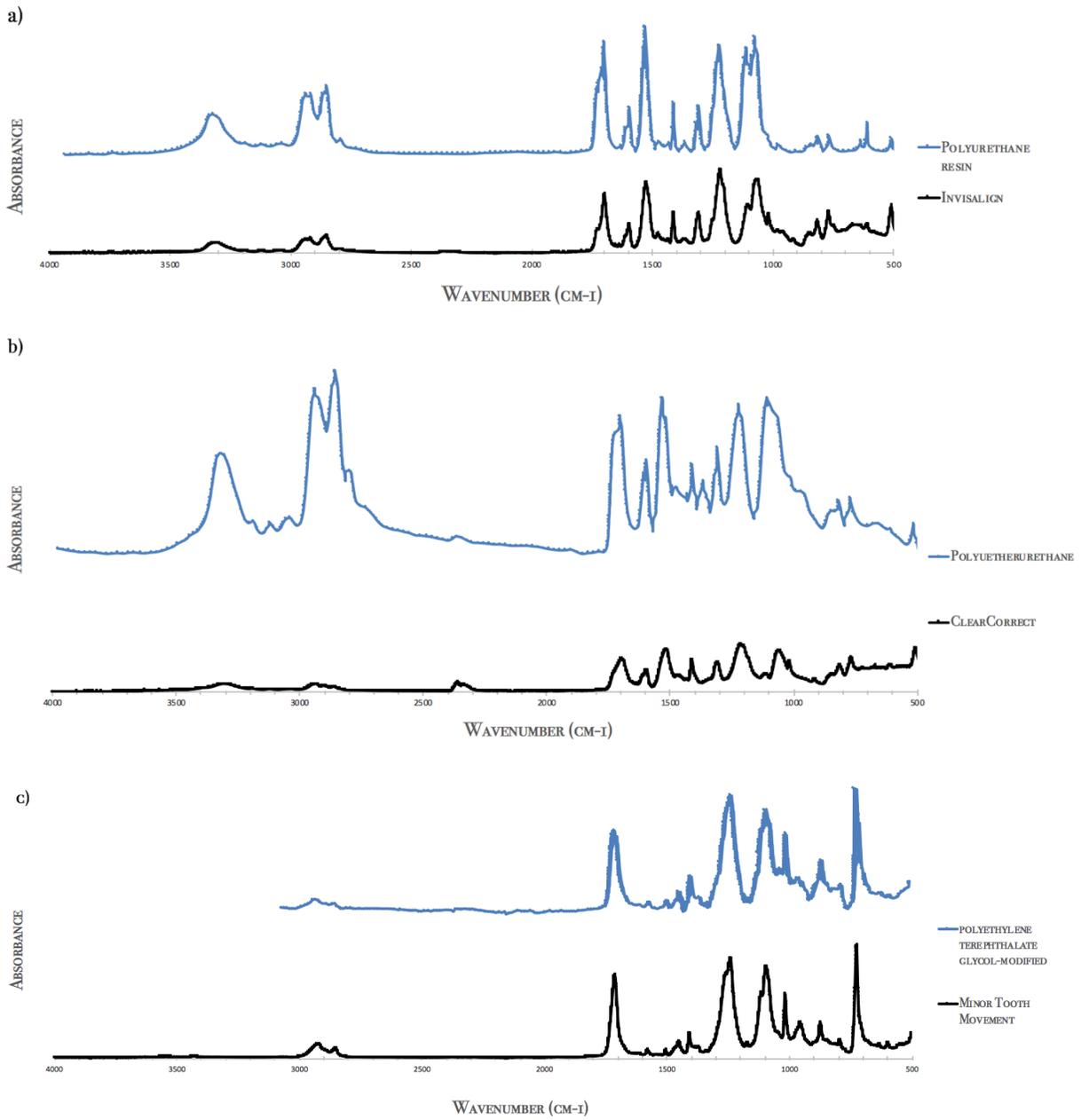


Figure 20. FTIR spectra of the aligner polymers. (a) Invisalign® (b) ClearCorrect® (c) Minor Tooth Movement®. FTIR: Fourier transformation infrared

Discussion

Polyurethane has interesting features like high elasticity, flexibility, chemical resistance, oxidation resistance, mechanical strength and ease of processing.(17, 118) In a previous study on mechanical and chemical properties of aligners, thermoplastic polyurethane used in the INV devices showed high hardness and elastic modulus but less creep resistance.(95) PETG, used in MTM, demonstrates high wear resistance, transparency, high strength, high dimensional stability and solvent resistance.(95, 117) FTIR analysis of INV aligners shows the following characteristic molecular bands: NH (3307 cm^{-1}), CH (2917 cm^{-1} , 2851 cm^{-1} , 1413 cm^{-1} , 1017 cm^{-1} and 915 cm^{-1}), aromatic CH (1596 cm^{-1} , 816 cm^{-1} and 769 cm^{-1}), C=O of NCO (1698 cm^{-1}), C=O (1309 cm^{-1}), N-H and C=O of NCO (1526 cm^{-1}), C-O (1219 cm^{-1}) and C-O-C (1104 cm^{-1} and 1064 cm^{-1}). The CC spectra have multiple molecular bands in common with those of INV : NH (3305 cm^{-1}), CH (2935 cm^{-1} , 2860 cm^{-1} , 1412 cm^{-1} , 1017 cm^{-1} and 914 cm^{-1}), aromatic CH (1596 cm^{-1} , 813 cm^{-1} and 766 cm^{-1}), C=O of NCO (1697 cm^{-1}), C=O (1308 cm^{-1}), N-H and C=O of NCO (1515 cm^{-1}), C-O (1216 cm^{-1}) and C-O-C (1112 cm^{-1} and 1059 cm^{-1}). For the MTM aligners made of PETG-based material, their molecular bands can be described as: asymmetrical aliphatic CH (2852 cm^{-1}), symmetrical aliphatic CH (2921 cm^{-1}), other aliphatic CH (1407 cm^{-1} , 1016 cm^{-1} and 725 cm^{-1}), C=O (1712 cm^{-1}), aromatic CH (1504 cm^{-1}) and C-C-O (1241 cm^{-1} and 1094 cm^{-1}).

To our knowledge, few articles exist on the comparison of the color stability or transparency of thermoplastic orthodontic aligners among different brands on the market.(12, 17-19), with no studies conducted on CC or MTM brands.

An earlier study showed significant color changes within the Vivera® retainers by spectrophotometry.(19) Those retention appliances, also manufactured by Align Technology®, are made of polyurethane blended with methylene diphenyl diisocyanate and 1,6-hexanediol.(20) Coffee also caused color changes in those retainers, to a lesser degree, as well as tea and red wine after a seven-day immersion.(19) This study by Zafeiriadis et al. identified that the precision of their spectrophotometric measurements constituted a limitation.(19) Moreover, they did not compare aligners from different companies unlike in Liu et al.(17, 19) Indeed, the Liu study compared INV aligners with two Chinese brands.(17) However, contrary to our protocol, they employed distilled water as a control and washed their samples in a ultrasonic cleaner after all 12-hour or 7-day exposures, likely affecting their colorimetric

measurements.(17) Indeed, their NBS values following a 7-day immersion in black tea for their INV aligners were much less important than ours (notwithstanding the fact that the black tea used was different in the two studies).(17) Indeed, we showed that cleaning cycles (admittedly more aggressive than those used by Liu et al.) definitely removed black tea pigments. For the interpretation of the clinical data, according to various articles, a ΔE value superior to 3.3 is visually appreciable by a nonskilled person, which means that the color change is unacceptable in the context of aligners worn for aesthetic reasons.(119, 120) If the ΔE value is smaller than 1, it is considered clinically undetectable (values between 1 and 3.3 are deemed clinically acceptable).(119, 120)

We hypothesize that the INV aligners' surface porosity, combined with the polar nature of polyurethane, can explain their staining susceptibility compared to CC (also polyurethane) and MTM (PETG) aligners. Indeed, untreated polyurethane has been shown to be a natively porous material.(121) Increased water absorption would encourage the penetration of pigments from the external environment into the polymer.(17, 121, 122) At first, the water molecules are linked to the surface of the aligner before being internalized within the plastic.(122) The interactions between water and polyurethane are facilitated by the fact that this material contains polar carbamate groups -NHCOO- that encourages hydrophilic links with pigments from the aqueous solutions.(17, 118) Furthermore, different grades exist among polyurethanes, which could explain the differences between INV and CC. The polyols that are contained in polyurethane are mainly divided into polyethers and polyesters.(118) Ester groups in polyester polyols have an important polarity, promoting the formation of hydrogen bonds, whereas ether groups are more resistant to hydrolysis and contain more flexible segments.(118)

Upon cleaning with either the INV crystals or the Retainer Brite tablets, aligners from all 3 brands that had been exposed to tea for 7 days reverted almost back to their initial color. This indicates that the two techniques have a good stain-removal potential for the staining compounds in tea, as the differences between T3 and T2 could be easily observed by a nonskilled individual.

The INV appliances stained via exposure to coffee or red wine (12 hours or 7 days) still presented a marked color change after cleaning by either method. We can definitely affirm that the cleaners have a better stain-removal potential for tea than for other chromogenic agents, such as those found in coffee and red wine.

As our study is *in vitro*, it does not exactly represent a normal 7-day aging in a real oral environment. Our aligners were not exposed to oral bacteria or enzymes, to functions (chewing, removal, reinsertion) or parafunctions (bruxism).(18, 19) Moreover, the possibility that different polymers saturate following exposure to staining agents over long times could be studied in order to better understand the obtained results.

One of the main clinical interests in doing this research was to give practitioners guidelines regarding dietary instructions for their patients during their orthodontic treatment. Staining agents like coffee, tea and red wine should be especially avoided with the INV appliances. Further studies are required to permit continued evaluation of the optical properties of those appliances *in vivo*, in order to better depict the real environment in which they are utilized.

Conclusions

Invisalign® appliances are more prone to pigmentation after a twelve-hour or a seven-day exposure to coffee or red wine compared to the ClearCorrect® or Minor Tooth Movement® devices. For its part, black tea caused marked extrinsic stains on the surface of the three different brands of aligners, but these could be readily cleaned away. Neither of the two cleaning methods showed a clinically greater stain-removal potential over the other after immersion into staining agents.

Abbreviations

ΔE : delta E (color change) ; ATR: Attenuated Total Reflectance ; CC: ClearCorrect

CIELAB: Commission Internationale de l'Eclairage ;

FTIR: Fourier-transform infrared spectroscopy ; INV: Invisalign ;

MTM: Minor Tooth Movement ;NBS: National Bureau of Standards ;

PETG: polyethylene terephthalate glycol-modified

DECLARATIONS

Acknowledgements

ClearCorrect LLC and Dentsply Sirona© freely offered the specimens required for our study without any right to review our results before publication. We would like to thank Mr. Wendell Raphael and Dr. Faezeh Sabri for their help with the spectrophotometry and FTIR analyses and Mr. Antoine Stoll for his precious help throughout the whole project.

Funding

This study was mainly funded by the Paul-Geoffrion Fund from the Université de Montréal, with partial support from the National Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC). Instrumentation at Polytechnique Montreal was acquired through the Canadian Fund for Innovation (CFI).

Authors' contributions

GB obtained the study specimens and conducted the staining and cleaning procedures. GB measured color changes of the devices by colorimetry and determined the composition of the polymers by spectrophotometry. JRT and AM helped in the design of the whole study concept and proofread the manuscript. PR performed the statistical analysis. PR and GB interpreted the data. All authors read and approved the final manuscript.

Availability of data and materials

The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Ethics approval and consent to participate

Not applicable.

Consent for publication

Not applicable.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

4.3 Résultats complémentaires

Pour obtenir de l'information additionnelle sur les données brutes ayant mené aux conclusions de l'article, les annexes 1 à 11 sont à consulter. Un but secondaire de cette recherche consistait à identifier les polymères constituant la surface interne et externe de chacune des trois marques. Cette étape a été réalisée par spectrophotométrie à lumière infrarouge tel que discuté préalablement. Voici les spectres superposés des surfaces interne et externe pour chacune des trois marques. On constate que pour chacune de ces dernières prise séparément, la composition interne et externe des échantillons semble correspondre au même polymère puisque les pics d'absorption se situent pratiquement aux mêmes endroits. Il est important de se souvenir que pour Invisalign® et ClearCorrect®, les gouttières sont formés de polyuréthane alors que les coquilles Minor Tooth Movement® sont plutôt conçues à base de polyéthylène téréphtalate glycolisé.

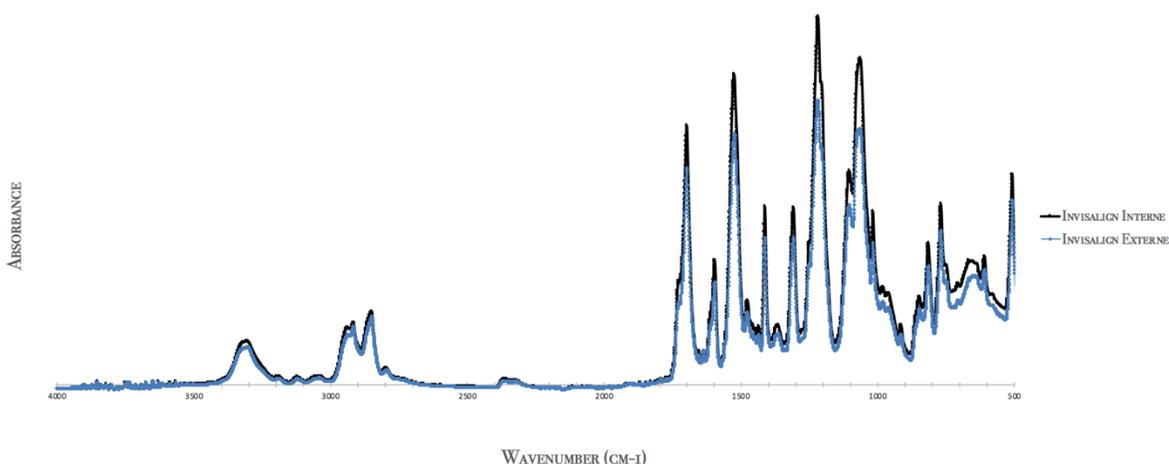


Figure 21 : Spectre ATR-FTIR des surfaces externe et interne d'un échantillon Invisalign®

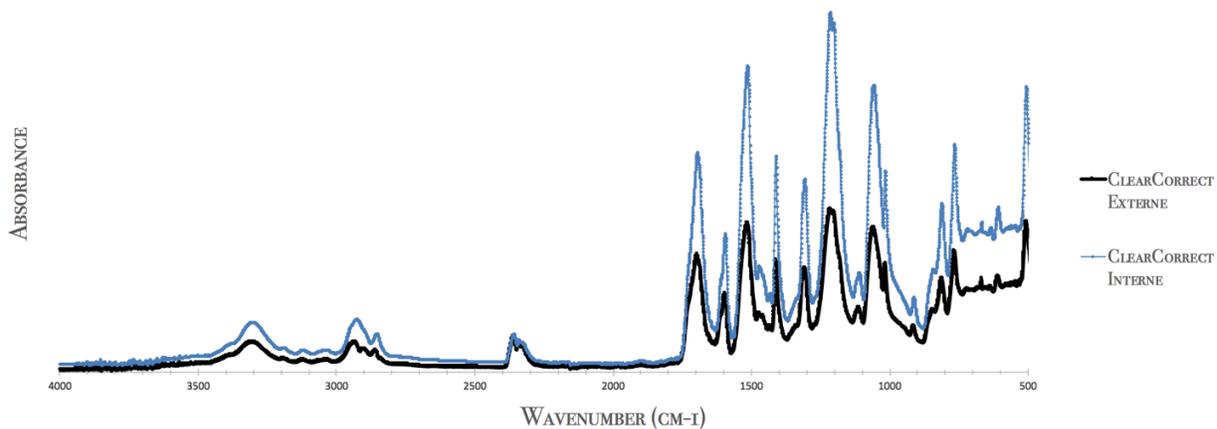


Figure 22 : Spectre ATR-FTIR des surfaces externe et interne d'un échantillon ClearCorrect®

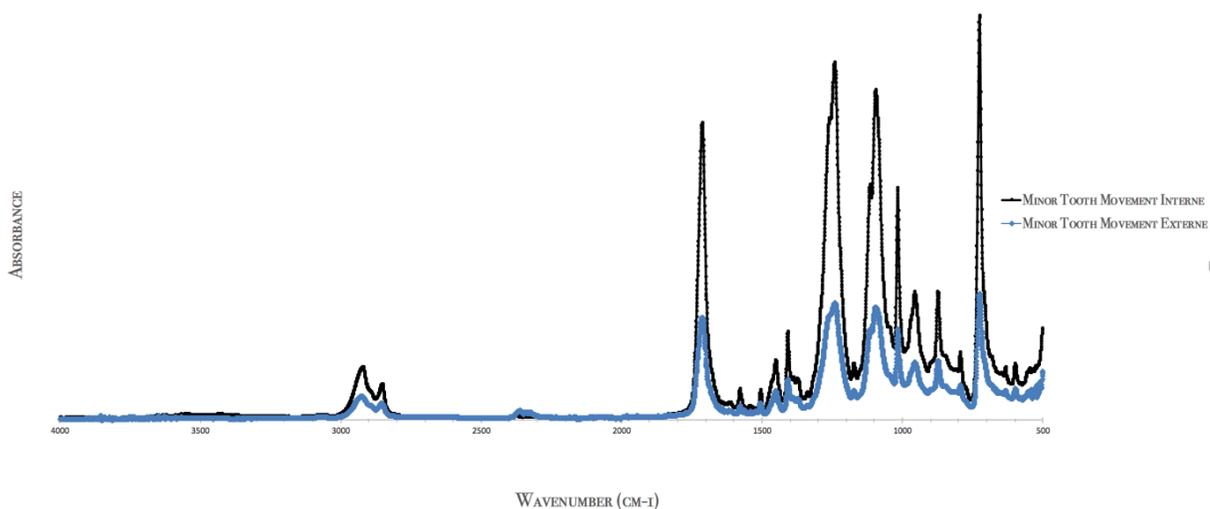


Figure 23 : Spectre ATR-FTIR des surfaces externe et interne d'un échantillon Minor Tooth Movement®

De plus, pour chacun des cinq substrats évalués, nous avons vérifié, grâce aux deltas E, si la coloration après cent soixante-huit heures (sept jours) de trempage correspondait ou non à une accentuation proportionnelle de la teinte des coquilles selon le temps. Pour y parvenir, nous avons comparé la valeur réelle de delta E après une semaine d'immersion à la valeur extrapolée de la même période calculée à partir de la valeur des douze premières heures de

trempage multipliée par quatorze. Les figures du thé noir sont présentées ci-dessous (voir les annexes 12 à 15 pour les graphiques additionnels des autres solutions). Nous sommes conscients que les coquilles qui ont trempé respectivement pendant douze heures et sept jours ne sont pas les mêmes, mais nous considérons intéressant de comparer ces résultats malgré tout.

Figure 24 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans le thé entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

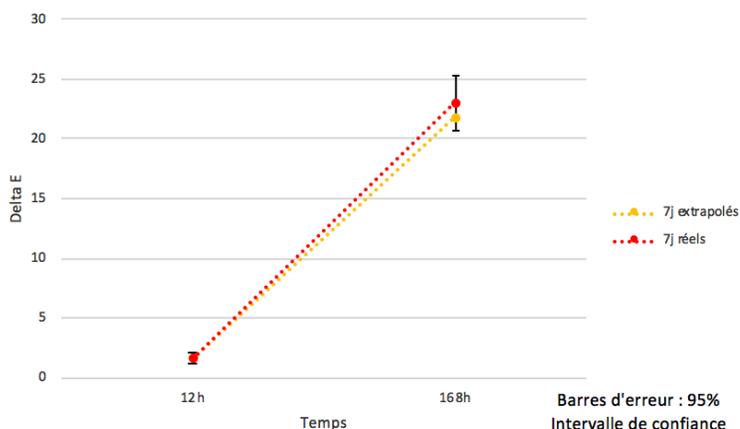


Figure 25 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans le thé entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

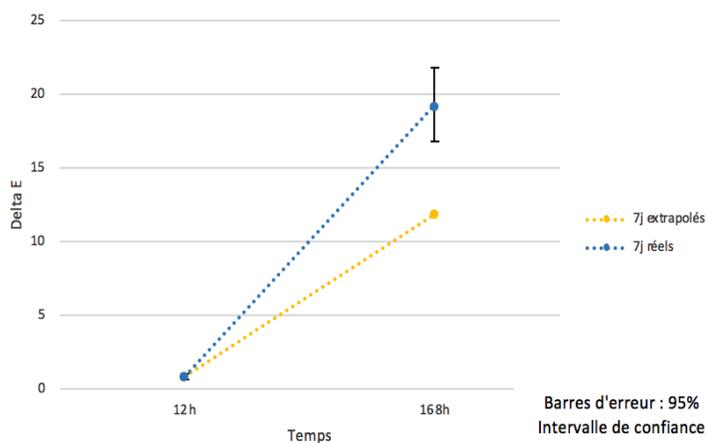
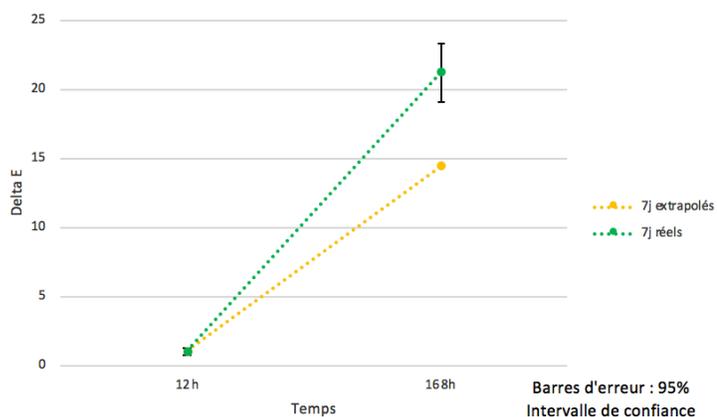


Figure 26 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans le thé entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée



Les graphiques obtenus montrent certains phénomènes. Le plus important est que nous semblons observer un effet cumulatif linéaire pour le thé, tandis que ce n'est pas le cas pour les autres substrats. En effet, pour le thé, les droites réelles en comparaison avec celles extrapolées sont les plus similaires (surtout dans le cas de la marque Invisalign®). Nous supposons que cette situation peut s'expliquer par le fait que les taches du thé sur les coquilles thermoplastiques sont extrinsèques. Ainsi, plus le temps s'accroît, plus la teinte des coquilles augmente puisque le dépôt des particules de thé contre le polymère des trois marques s'accroît, diminuant progressivement la clarté des gouttières. En ce qui concerne le café et le vin rouge (voir annexes 12 et 15), on observe plutôt une apparence de saturation en pigments dans le changement de couleur des trois marques de gouttières à un moment qui se situe entre T0 et T2. Il faudrait davantage d'expérimentations pour identifier à quel moment s'effectue cette possible saturation.

Il est important de spécifier qu'il avait été envisagé en début de projet d'évaluer la transmittance et l'absorbance des trois différentes marques à l'étude à l'aide du polymère pur de chaque compagnie sous forme aplanie et intacte. Des mesures d'absorbance avait été prélevées par spectrophotométrie à lumière visible. Le logiciel employé était le OceanView 1.5.0 2013 combiné avec la source lumineuse DH-Mini, les fibres optiques QP600-1-XSR et le support à cuvette CUV-UV de 1 cm. Il s'agit tous de produits de la compagnie OceanOptics (Largo, Floride, États-Unis). La cuvette employée était formée de polystyrène avec un trajet optique de 10 mm. La résolution du logiciel était de 50 nm. Le nombre de numérisations combinées en moyenne était de 10 et le spectre des valeurs prises en termes de longueurs d'onde s'étendait de 200 à 1050 nm. Il est important de noter que nous n'avions que les échantillons aplanis des marques ClearCorrect® et Minor Tooth Movement® puisque ces deux manufacturiers avaient bien voulu nous les fournir gratuitement contrairement à la troisième qui n'avait pas accepté de les donner ou de les vendre. Une tentative d'aplatissement par presse hydraulique des coquilles Invisalign® intactes a été effectuée, mais le résultat a mené à l'obtention d'une feuille de polymère davantage opaque que la coquille originale puisque ces aligneurs sont constitués à partir d'un composé multicouche qui s'est mélangé sous la chaleur et la pression.

Les échantillons aplanis de ClearCorrect® et Minor Tooth Movement® ont, quant à eux, été utilisés tels que reçus (T0) et après une exposition de sept jours (T2) à l'un des cinq mêmes substrats que pour la phase de colorimétrie afin d'en mesurer leur absorbance. Nous supposons qu'il aurait été possible d'obtenir des résultats concluants en supprimant les valeurs obtenues à T0 de celles obtenues à T2 afin d'identifier quelles longueurs d'onde étaient absorbées entre ces deux moments. Nous espérons donc identifier la couleur du spectre visible obtenue après exposition des coquilles en plus de l'importance de l'impact des changements de teinte sur la transmission de la lumière, donc de la clarté des appareils. Des essais différents pour prélever les absorbances ont donné des résultats peu concluants. Une difficulté provenait notamment de l'incapacité à stabiliser les sondes sans support pour prélever les données des échantillons aplanis. En effet, le moindre déplacement des fibres influençait les valeurs. Ainsi, nous jugions que l'emploi du support Cuv-All-UV était essentiel pour standardiser la distance des sondes et leur emplacement relatif. Or, le fait que le support à cuvette sert généralement pour l'évaluation de substances liquides a aussi compliqué la prise de données. En effet, considérant qu'il fallait stabiliser le segment aplani du polymère pour s'assurer que le rayon traversait toujours la même épaisseur de matériau à 90 degrés, l'emploi d'une cuvette en plastique pour laquelle une mise à zéro préalable était effectuée devenait essentiel. Cependant, avec la cuvette en place, nos résultats n'étaient pas davantage probants, nous laissant interpréter les valeurs comme du «bruit» perçu par les instruments. Au sens physique, il n'y avait rien à interpréter comme tel. Nous supposons que le rayon incident n'était pas suffisant pour traverser à la fois l'épaisseur du matériau et la cuvette de plastique. Il aurait possiblement fallu se procurer un support avec les sondes extrêmement rapprochées et stables pour parvenir à de meilleurs résultats, mais dans tous les cas, nous n'aurions eu que deux compagnies à comparer au lieu de trois.

Chapitre 5. Discussion

5.1 Vérification des hypothèses

Nous avons avancé comme première hypothèse de recherche que certaines compagnies de coquilles présenteraient des changements de coloration plus marqués que d'autres au contact de différents substrats. En effet, au contact du café instantané et du vin rouge après douze heures et sept jours d'immersion, la marque Invisalign® a subi des changements de coloration marqués statistiquement par rapport aux deux autres groupes étudiés.

Comme deuxième hypothèse de recherche, il avait été suggéré que les deux techniques de nettoyage n'auraient pas le même potentiel de retrait des taches créées. Nous ne pouvons affirmer que cliniquement, il y ait eu une différence de résultats entre les deux produits nettoyants. La seule différence statistique significative entre les deux produits concernait les coquilles Invisalign® et Minor Tooth Movement® qui étaient, selon les chiffres, mieux nettoyées par le bain sonore combiné au comprimé Retainer Brite® après douze heures de trempage dans le vin. Or, à nos yeux, les moyennes étaient trop peu distinctes pour affirmer qu'une réelle différence clinique pouvait être constatée. Cependant, il est important de noter que les deux produits ont bien performé de façon similaire pour le retrait de taches extrinsèques observées après une immersion dans le thé noir de sept jours, et ce, chez toutes les marques de coquilles à l'étude. Il est important d'ajouter que les coquilles Invisalign®, en comparaison aux deux autres marques, sont restées statistiquement plus tachées après douze heures et sept jours de trempage dans le café ou le vin rouge malgré le nettoyage par l'un ou l'autre des produits prévus à cet effet.

Enfin, la troisième hypothèse avançait que le type de polymère allait différer d'une marque de coquilles à l'autre. En effet, les coquilles Invisalign® et ClearCorrect® sont toutes deux formées d'un polymère à base de polyuréthane pour leurs surfaces internes et externes. Pour ce qui est du produit Minor Tooth Movement®, ce dernier est formé d'un copolyester, c'est-à-dire du polyéthylène téréphtalate glycolisé, sur ses surfaces interne et externe.

5.2 Intérêt clinique

Il y a un intérêt clinique réel qui découle de ce projet de recherche. Les bénéfices sont autant pour les patients que pour les orthodontistes les traitant.

- Selon la marque de coquilles thermoplastiques utilisée par le praticien, le patient peut mieux connaître quel produit il peut consommer pour maintenir ses coquilles les plus esthétiques possibles lors de son traitement sans se priver d'autres qui sont moins dommageables pour le polymère.
- Le patient peut être mieux renseigné sur le degré de changement de coloration des coquilles en fonction du temps d'exposition à divers produits colorants de notre alimentation afin de mieux prévoir les changements de teinte le cas échéant.
- L'orthodontiste peut aussi décider de réduire le nombre de jours de port des coquilles si ses patients peuvent les porter en continu lors des repas sans risque d'engendrer des changements de coloration. Cela pourrait constituer une réduction considérable du temps de traitement pour les patients.

5.3 Limitations de l'étude

Il est important de souligner les limites rencontrées par cette étude :

- Il s'agit d'une étude in vitro ; elle ne représente pas fidèlement ce qui se déroule en milieu buccal aqueux avec les enzymes présentes et les changements de température drastiques.
- Un seul individu a effectué les expérimentations et la prise de mesures de coloration et de composition de surface à l'aide respectivement du logiciel Adobe Photoshop® et du spectrophotomètre à rayons infrarouges de type Thermo Fisher Nicolet iS5.
- Nous avons rencontré une limitation d'approvisionnement de matériau provenant de l'une des trois marques que nous voulions évaluées. Cela a causé en partie l'élimination d'une portion du projet de recherche à l'aide du spectrophotomètre à lumière visible.
- À l'aide du logiciel Adobe Photoshop®, le même pixel d'image n'a pas été nécessairement employé sur la même coquille aux différents temps d'analyse (T0, T1 ou T2 et T3).

- Les gouttières thermoplastiques n'étaient pas nécessairement positionnées à plat de la même façon d'une numérisation à l'autre en raison des formes d'arcades asymétriques et des numérisations communes avec des coquilles combinées différemment, ce qui a pu modifier le point d'appui des aligneurs sur la surface de numérisation.
- Un délai prévisible entre la fin des immersions dans les substrats colorés ou de contrôle et le début des nettoyages a pu entraîner une cristallisation des taches et, par le fait même, un retrait des dépôts moindre à l'aide des produits nettoyants testés à cet effet.
- Nous avons limité nos immersions à une seule marque de produits alors qu'un panoplie de types de café, de thé, de vin rouge ou de cola existe. La composition de ces solutions peut donc varier grandement d'une marque à l'autre et offrir des résultats différents. Il ne faut donc pas généraliser nos résultats obtenus au type de produit employé, mais bien à la marque utilisée.
- Il se pourrait que l'épaisseur du polymère formant les coquilles ne soit pas uniforme en tout point de chaque échantillon d'aligneurs et que cette épaisseur ne soit pas identique d'une marque à l'autre. Ainsi, une épaisseur de plastique variable a pu possiblement avantager ou désavantager une marque de coquille par rapport à une autre.

5.4 Avenues de recherche

Il serait intéressant d'apporter les modifications suivantes à l'étude actuelle pour la bonifier :

- Reproduire l'étude en recueillant plus de cinq points par échantillon pour faire une moyenne possiblement plus représentative.
- Réaliser une étude *in vivo* portant sur les habitudes de consommation réelles de différents individus en demandant aux candidats de consommer leurs repas pendant une semaine en conservant leurs coquilles en tout temps. Le fait d'exposer les coquilles à des aliments divers de température plus variable, le tout baignant dans la salive naturelle, pourrait engendrer des résultats distincts.
- Réaliser une étude *in vitro* reproduisant plus véritablement la consommation hebdomadaire d'un Canadien en exposant les trois marques de coquilles à une même alimentation plus variée et réelle pourrait modifier les résultats obtenus.
- Comparer les marques déjà évaluées à d'autres qui sont apparues sur le marché depuis le début de cette étude.

- Mesurer les mêmes valeurs de colorimétrie que celles de cette étude, mais à l'aide d'instruments distincts que sont le numériseur Epson® Perfection V700 et le logiciel Adobe Photoshop®.
- Évaluer d'autres propriétés du plastique thermoplastique des coquilles avant et après leur immersion dans diverses solutions, que ce soit leur stabilité dimensionnelle, leur élasticité ou leur malléabilité par exemple.
- Reproduire cette même étude, mais en employant des substrats alimentaires différents (par exemple, en utilisant un autre type de café ou de vin) et en évaluant aussi les effets du tabagisme et autres substances inhalées sur la coloration des appareils.
- Reproduire cette même étude en demandant à la personne recueillant les données de colorimétrie de reprendre les mêmes mesures aux mêmes endroits sur les échantillons de gouttières à un deuxième moment et vérifier la fiabilité intra-examineur.
- Reproduire cette même étude en demandant à une deuxième personne de participer à la cueillette des données de colorimétrie aux mêmes endroits sur les échantillons de gouttières et vérifier la fiabilité inter-examineurs.
- Identifier l'élastomère intégré dans le matériau multicouche SmartTrack afin de possiblement expliquer les différences de stabilité de couleur entre ce produit et celui Zendura, tous deux formés de polyuréthane. Il faudrait donc déterminer si les contaminants peuvent diffuser jusqu'à cette couche intermédiaire constituant les produits étudiés de la marque Invisalign®.
- Évaluer le niveau de porosité de surface des différents polymères utilisés par les compagnies par microscopie conventionnelle ou électronique à balayage.

5.5 Sources de financement

Pour la réalisation des manipulations, il a fallu se procurer divers instruments et produits. C'est le Fonds Paul-Geoffrion qui a remboursé la majeure partie du montant investi pour ces expérimentations. Un support de moindre importance a été fourni par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. Il est important de souligner que les instruments de Polytechnique Montréal ont été acquis par la Fondation canadienne pour l'innovation.

Chapitre 6. Conclusion

Notre objectif principal était de comparer la résistance aux changements de couleur de trois marques de coquilles thermoplastiques américaines populaires exposées à l'une des quatre solutions colorantes ou à la solution contrôle de notre étude. À la suite d'une immersion de douze heures dans le café instantané ou le vin rouge, les coquilles de la marque Invisalign® se sont significativement plus colorées que celles des marques ClearCorrect® ou Minor Tooth Movement®. Les changements de couleur après sept jours d'exposition dans le café ou le vin rouge ont aussi engendré des résultats statistiquement significatifs pour la marque Invisalign® par rapport aux deux autres étudiées, mais avec des différences de teinte accrues. Pour ce qui est du thé noir, malgré une variation importante des paramètres L^* , a^* et b^* d'un pixel à l'autre, on peut affirmer qu'il y a eu un dépôt extrinsèque important sur les trois marques de gouttières évaluées après sept jours d'immersion dans cette solution.

Un but secondaire était de comparer l'efficacité de deux types de nettoyeurs populaires à redonner de la clarté et à nettoyer les taches des gouttières par colorimétrie. Les deux méthodes de nettoyage étudiées présentaient un potentiel de retrait de taches accru pour celles extrinsèques du thé noir après sept jours d'exposition. En effet, puisque les changements de couleur excédaient de beaucoup la valeur de 3,3 entre T_3 et T_2 , et ce, pour chaque marque, on devine que les changements de teinte après nettoyage étaient facilement observables par un individu non-expérimenté pour ce substrat. Pour ce qui est des deltas E entre T_3 et T_0 après douze heures d'exposition dans le café et le vin rouge, les coquilles Invisalign® sont restées statistiquement plus colorées que les deux autres marques évaluées. Après sept jours d'exposition, l'écart entre T_3 et T_0 présentait aussi des résultats statistiquement significatifs entre la marque Invisalign® et les deux autres pour le café et le vin rouge, mais avec une différence plus marquée qu'après 12 heures. Le thé engendrait également une différence significative entre la marque Invisalign® et les deux autres à la suite d'une semaine d'exposition et d'un nettoyage subséquent, mais dans une moindre mesure. En résumé, on peut retenir que le produit de la compagnie Align Technology® est celui qui retrouve le moins sa teinte initiale après une exposition de douze ou de cent soixante-huit heures dans le café ou

dans le vin suivie d'un nettoyage, que ce soit par les cristaux Invisalign® ou par le Retainer Brite® combiné au bain sonore.

Un but tertiaire de l'expérience était de confirmer le type de polymère qui compose la surface externe et interne des trois différentes marques d'aligneurs par spectrophotométrie infrarouge. Des spectres ATR-FTIR d'un matériau à base de polyuréthane ont été observés pour la marque Invisalign® et ClearCorrect® sur les surfaces externes et internes. Des spectres ATR-FTIR de polyéthylène téréphtalate glycolisé étaient plutôt représentatifs de la marque Minor Tooth Movement®, et ce, sur les côtés interne et externe du produit.

Bibliographie

1. Cooper-Kazaz R, Ivgi I, Canetti L, Bachar E, Tsur B, Chaushu S, et al. The impact of personality on adult patients' adjustability to orthodontic appliances. *Angle Orthod.* 2013;83(1):76-82.
2. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J.* 2017;62 Suppl 1:58-62.
3. Eliades T, Brantley W. *Orthodontic Applications of Biomaterials : A Clinical Guide.* 1^e éd; Woodhead Publishing; 2017. 318 p.
4. Rosvall MD, Fields HW, Ziuchkovski J, Rosenstiel SF, Johnston WM. Attractiveness, acceptability, and value of orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009;135(3):276.e1-12; discussion -7.
5. Walton DK, Fields HW, Johnston WM, Rosenstiel SF, Firestone AR, Christensen JC. Orthodontic appliance preferences of children and adolescents. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010;138(6):698.e1-12; discussion -9.
6. Baron P. Les appareils orthodontiques invisibles et presque invisibles. *Orthod Fr.* 2014;85(1):59-91.
7. Mai W, He J, Meng H, Jiang Y, Huang C, Li M, et al. Comparison of vacuum-formed and Hawley retainers: a systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2014;145(6):720-7.
8. Boyd RL, Oh H, Fallah M, Vlaskalic V. An update on present and future considerations of aligners. *J Calif Dent Assoc.* 2006;34(10):793-805.
9. Brascher AK, Zuran D, Feldmann RE, Jr., Benrath J. Patient survey on Invisalign® treatment compared the SmartTrack® material to the previous aligner material. *J Orofac Orthop.* 2016;77(6):432-8.
10. Drake CT, McGorray SP, Dolce C, Nair M, Wheeler TT. Orthodontic tooth movement with clear aligners. *ISRN dentistry.* 2012;2012:657973.
11. Lombardo L, Martini M, Cervinara F, Spedicato GA, Oliverio T, Siciliani G. Comparative SEM analysis of nine F22 aligner cleaning strategies. *Prog Orthod.* 2017;18(1):26.
12. Gracco A, Mazzoli A, Favoni O, Conti C, Ferraris P, Tosi G, et al. Short-term chemical and physical changes in invisalign appliances. *Aust Orthod J.* 2009;25(1):34-40.
13. Schuster S, Eliades G, Zinelis S, Eliades T, Bradley TG. Structural conformation and leaching from in vitro aged and retrieved Invisalign appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2004;126(6):725-8.
14. White DW, Julien KC, Jacob H, Campbell PM, Buschang PH. Discomfort associated with Invisalign and traditional brackets: A randomized, prospective trial. *Angle Orthod.* 2017;87(6):801-8.
15. Graber LW, Vanarsdall RL, Vig KWL, Huang GJ. *Orthodontics : Current Principles And Techniques.* 6^e éd. St. Louis, Missouri; Elsevier; 2017. 1016 p.
16. Tsomos G, Ludwig B, Grossen J, Pazera P, Gkantidis N. Objective assessment of patient compliance with removable orthodontic appliances: a cross-sectional cohort study. *Angle Orthod.* 2014;84(1):56-61.
17. Liu CL, Sun WT, Liao W, Lu WX, Li QW, Jeong Y, et al. Colour stabilities of three types of orthodontic clear aligners exposed to staining agents. *Int J Oral Sci.* 2016;8(4):246-53.

18. Lombardo L, Arreghini A, Maccarrone R, Bianchi A, Scalia S, Siciliani G. Optical properties of orthodontic aligners--spectrophotometry analysis of three types before and after aging. *Prog Orthod.* 2015;16:41.
19. Zafeiriadis AA, Karamouzou A, Athanasiou AE, Eliades T, Palaghias G. In vitro spectrophotometric evaluation of Viverra clear thermoplastic retainer discolouration. *Aust Orthod J.* 2014;30(2):192-200.
20. Agarwal M, Wible E, Ramir T, Altun S, Viana G, Evans C, et al. Long-term effects of seven cleaning methods on light transmittance, surface roughness, and flexural modulus of polyurethane retainer material. *Angle Orthod.* 2018;88(3):355-62.
21. Fang D, Zhang N, Chen H, Bai Y. Dynamic stress relaxation of orthodontic thermoplastic materials in a simulated oral environment. *Dent Mater J.* 2013;32(6):946-51.
22. Proffit WRF, H.W.; Sarver, D.M. *Contemporary Orthodontics.* 5^e éd; Elsevier; 2017. 754 p.
23. Masella RS, Meister M. Current concepts in the biology of orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006;129(4):458-68.
24. Jiang N, Guo W, Chen M, Zheng Y, Zhou J, Kim SG, et al. Periodontal Ligament and Alveolar Bone in Health and Adaptation: Tooth Movement. *Front Oral Biol.* 2016;18:1-8.
25. Asiry MA. Biological aspects of orthodontic tooth movement: A review of literature. *Saudi J Biol Sci.* 2018;25(6):1027-32.
26. ResearchGate. Schematic diagram of tooth movement. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-tooth-movement-Applying-orthodontic-force-to-the-tooth-causes_fig2_260396769 2018.
27. Align Technology. FDA clears expanded labeling for the invisalign system. <http://investor.aligntech.com/releasedetail.cfm?releaseid=358665>. 2009.
28. Zheng M, Liu R, Ni Z, Yu Z. Efficiency, effectiveness and treatment stability of clear aligners: A systematic review and meta-analysis. *Orthod Craniofac Res.* 2017;20(3):127-33.
29. Tooth Positioner. <http://blog.afond.fr/tooth-positioner-individualises-imprimes-direct>.
30. Ke Y, Zhu Y, Zhu M. A comparison of treatment effectiveness between clear aligner and fixed appliance therapies. *BMC Oral Health.* 2019;19(1):24.
31. Grunheid T, Gaalaas S, Hamdan H, Larson BE. Effect of clear aligner therapy on the buccolingual inclination of mandibular canines and the intercanine distance. *Angle Orthod.* 2016;86(1):10-6.
32. Lombardo L, Arreghini A, Ramina F, Huanca Ghislazoni LT, Siciliani G. Predictability of orthodontic movement with orthodontic aligners: a retrospective study. *Prog Orthod.* 2017;18(1):35.
33. Align Technology. Questions les plus fréquentes. <https://www.invisalign.fr/fr/FAQs/Pages/FAQ.aspx>. 2018.
34. Align Technology. Présentation du Système Invisalign. <https://www.invisalign.fr/fr/Pages/Home.aspx>. 2018.
35. Dentsply Sirona. Straight Talk on MTM® Clear•Aligner for Patients. <http://www.mtmclearaligner.com/pub/FAQs>. 2018.
36. Align Technology. Itero scanner and orthocad services. <http://www.aligntech.com/solutions/itero>. 2018.
37. Align Technology. Material Safety Data Sheet - SmartTrack Aligner Material. 2015.
38. Gao L, Wichelhaus A. Forces and moments delivered by the PET-G aligner to a maxillary central incisor for palatal tipping and intrusion. *Angle Orthod.* 2017;87(4):534-41.

39. Align Technology. The Invisalign Difference. <https://provider.invisalign.com/innovation/the-invisalign-difference>. 2019.
40. Align Technology. SmartTrack FAQ. 2012. 4.
41. Align Technology. Align Technology introduces one-week aligner wear for invisalign(R) teen and full products. <http://investor.aligntech.com/static-files/589c420c-844c-4cdb-9376-6cd32982a9c6>. 2016.
42. Align Technology. Frequently asked questions. <https://www.invisalign.ca/frequently-asked-questions>. 2018.
43. Kleem MA. Invisalign. <https://www.maggiikleemdds.com/invisalign.html>.
44. ClearCorrect <http://blog.clearcorrect.com/post/Tech-tip-Aligner-material-QA.aspx>. 2013.
45. Bay Materials, LLC. Material Safety Data Sheet - Zendura. 2013.
46. ClearCorrect. Tech Tip : Retainer materials. <http://blog.clearcorrect.com/post/Retainer-materials.aspx>. 2012.
47. Bay Materials LLC. Zendura - properties & applications <https://www.zenduradental.com/pages/properties>. 2018.
48. ClearCorrect. Show Off Your Smile. <https://clearcorrect.com>.
49. ClearCorrect. Affordable & doctor-friendly. <https://clearcorrect.com/doctors/>.
50. Dentsply Raintree Essix Inc. Material Safety Data Sheet -Essix Ace Plastics. . 2008.
51. Dental B. Orthodontics, Braces & Aligners. <https://bayridgedentalcare.com/orthodontics/>.
52. Kumar MS, Ajay R, Miskeen Sahib SA, Chittrarasu M, Navarasu M, Ragavendran N, et al. Color Stability Assessment of Two Different Composite Resins with Variable Immersion Time Using Various Beverages: An In vitro Study. J Pharm Bioallied Sci. 2017;9(Suppl 1):S161-s5.
53. Reinhardt JW, Balbierz MM, Schultz CM, Simetich B, Beatty MW. Effect of Tooth-Whitening Procedures on Stained Composite Resins. Oper Dent. 2018.
54. Zanjani VA, Ghasemi A, Torabzadeh H, Jamali M, Razmavar S, Baghban AA. Bleaching effect of ozone on pigmented teeth. Dent Res J (Isfahan). 2015;12(1):20-4.
55. Shamszadeh S, Sheikh-Al-Eslamian SM, Hasani E, Abrandabadi AN, Panahandeh N. Color Stability of the Bulk-Fill Composite Resins with Different Thickness in Response to Coffee/Water Immersion. International journal of dentistry. 2016;2016:7186140.
56. CNBC. This is the best time to have your cup of coffee. <https://www.cnbc.com/2017/10/06/this-is-the-best-time-to-have-your-cup-of-coffee.html>. 2017.
57. Coffee Association of Canada. Canadian Coffee Consumption 2017. https://www.coffeeassoc.com/wp-content/uploads/2017/11/CanadianCoffee2017_webfonts.pdf. 2017.
58. Statista. How many cups of coffee (7 oz), on average, do you drink per day? <https://www.statista.com/statistics/250230/americans-daily-coffee-consumption/>. 2018.
59. Statista. Average number of cups of coffee consumed per day among coffee drinkers in Canada from 2008 to 2016. <https://www.statista.com/statistics/452671/number-of-cups-of-coffee-consumed-per-day-among-coffee-drinkers-canada/>. 2018.
60. Statistiques Canada. Findings. <https://www.statcan.gc.ca/pub/82-003-x/2008004/article/10716/6500244-eng.htm>. 2015.
61. World Tea News. Per Capita Tea. <http://worldteanews.com/news/per-capita-tea>. 2014.

62. Twinings's. Brewing the perfect cup. <https://www.twiningsusa.com/our-expertise/preparing-our-teas/brewing-the-perfect-cup>. 2018.
63. The Chief Public Health Officer. Alcohol consumption in Canada. <http://healthycanadians.gc.ca/publications/departement-ministere/state-public-health-alcohol-2015-etat-sante-publique-alcool/alt/state-phac-alcohol-2015-etat-aspc-alcool-eng.pdf>. 2015.
64. National Post. How we drink: Here's everything you need to know about Canadians' overall boozy habits. <http://nationalpost.com/life/how-we-drink-from-how-much-to-how-often-heres-everything-you-need-to-know-about-canadians-boozy-habits>. 2015.
65. Ordre des Pharmaciens du Québec. Les niveaux de consommation d'alcool à faible risque. https://www.opq.org/doc/media/1570_38_fr-ca_0_educ_alcool_opq.pdf. 2013.
66. Éduc'alcool. Les Québécois et l'alcool. 2017.
67. Forbes. The World's Biggest Wine Drinkers. <https://www.forbes.com/sites/niallmccarthy/2016/05/17/the-worlds-biggest-wine-drinkers-infographic/#533d2a7d7a57>. 2016.
68. The Washington Post. Think you drink a lot? This chart will tell you. https://www.washingtonpost.com/news/wonk/wp/2014/09/25/think-you-drink-a-lot-this-chart-will-tell-you/?utm_term=.e345e0b8d8e9. 2014.
69. Statista. Soft drink consumption per capita in Canada from 2005 to 2018 (in liters). <https://www.statista.com/statistics/452971/soft-drink-consumption-per-capita-in-canada/>. 2018.
70. Global News. Soft drinks an increasingly hard sell to Canadian consumers. <https://globalnews.ca/news/1642238/soft-drinks-an-increasingly-hard-sell-to-canadian-consumers/>. 2014.
71. Aykut-Yetkiner A, Wiegand A, Attin T. The effect of saliva substitutes on enamel erosion in vitro. *J Dent*. 2014;42(6):720-5.
72. Dawes C, Pedersen AM, Villa A, Ekstrom J, Proctor GB, Vissink A, et al. The functions of human saliva: A review sponsored by the World Workshop on Oral Medicine VI. *Arch Oral Biol*. 2015;60(6):863-74.
73. Pharmaservices. Biotène OralBalance - Tube 50 g. <https://www.pharmaservices.fr/hygiene/biotene-dentifrice-gel-tube-75-ml>. 2018.
74. Biotène®. Biotène® OralBalance Moisturizing Gel. <https://www.biotene.com/dry-mouth-products/moisturizing-gel/>.
75. Haralur SB. Effect of Age on Tooth Shade, Skin Color and Skin-Tooth Color Interrelationship in Saudi Arabian Subpopulation. *Journal of international oral health : JIOH*. 2015;7(8):33-6.
76. Wasilewski Mde S, Takahashi MK, Kirsten GA, de Souza EM. Effect of cigarette smoke and whiskey on the color stability of dental composites. *Am J Dent*. 2010;23(1):4-8.
77. Karakoca Nemli S, Bankoglu Gungor M, Bagkur M, Turhan Bal B, Kasko Arici Y. In vitro evaluation of color and translucency reproduction of maxillofacial prostheses using a computerized system. *The journal of advanced prosthodontics*. 2018;10(6):422-9.
78. Photoshop Buzz. What Is Lab Color? - Photoshop Colour Mode. <http://www.photoshopbuzz.com/what-is-lab-color-photoshop/>. 2017.
79. Perez Mdel M, Saleh A, Yebra A, Pulgar R. Study of the variation between CIELAB delta E* and CIEDE2000 color-differences of resin composites. *Dent Mater J*. 2007;26(1):21-8.
80. Delta E, Delta H, Delta T : What does it mean?

81. Hollis S, Eisenbeisz E, Versluis A. Color stability of denture resins after staining and exposure to cleansing agents. *J Prosthet Dent.* 2015;114(5):709-14.
82. Matney JE, Parker BC, Neck DW, Henkelmann G, Rosen, II. Evaluation of a commercial flatbed document scanner and radiographic film scanner for radiochromic EBT film dosimetry. *J Appl Clin Med Phys.* 2010;11(2):3165.
83. Alnawaf H, Yu PK, Butson M. Comparison of Epson scanner quality for radiochromic film evaluation. *J Appl Clin Med Phys.* 2012;13(5):3957.
84. Amar-Mamou I. Comportement colorimétrique des auxiliaires élastomériques esthétiques en fonction du temps en Orthodontie (étude in vitro). Paris: Université Denis Dideot - Paris 7; 2004.
85. Chemistry LibreTexts. Spectrophotometry. https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Kinetics/Reaction_Rates/Experimental_Determination_of_Kinetics/Spectrophotometry. 2015.
86. Wikipedia. Cercle chromatique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle_chromatique. 2018.
87. Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Caoutchouc et des plastiques. Spectrophotométrie infrarouge (IRTF). <http://www.lrcpc.com/fr/qui-sommes-nous/moyens-dessais/item/spectrophotometrie-infrarouge-irtf>. 2018.
88. PerkinElmer. Polymer Identification Using Mid Infrared Spectroscopy. https://www.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/APP_PolymerIdentificationMidInfaredSpectroscopy.pdf. 2011.
89. NanoQAM - Centre de Recherche sur les NanoMatériaux et l'Énergie. Spectromètre FTIR-ATR (FTIR-ATR). <http://www.nanoqam.uqam.ca/equipement.php?id=15&lang=fr>. 2018.
90. Huntsman. Elastomers : A guide to thermoplastic polyurethanes (TPU).
91. American Chemistry Council. Introduction to Polyurethanes: Thermoplastic Polyurethane. <https://polyurethane.americanchemistry.com/polyurethanes/Introduction-to-Polyurethanes/Applications/Thermoplastic-Polyurethane/>. 2018.
92. Han D, Chen G, Xiao M, Wang S, Chen S, Peng X, et al. Biodegradable and Toughened Composite of Poly(Propylene Carbonate)/Thermoplastic Polyurethane (PPC/TPU): Effect of Hydrogen Bonding. *Int J Mol Sci.* 2018;19(7).
93. Fondis Electronic. Polyuréthane thermoplastique (TPU).
94. Mi HY, Salick MR, Jing X, Jacques BR, Crone WC, Peng XF, et al. Characterization of thermoplastic polyurethane/polylactic acid (TPU/PLA) tissue engineering scaffolds fabricated by microcellular injection molding. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl.* 2013;33(8):4767-76.
95. Alexandropoulos A, Al Jabbari YS, Zinelis S, Eliades T. Chemical and mechanical characteristics of contemporary thermoplastic orthodontic materials. *Aust Orthod J.* 2015;31(2):165-70.
96. Harper CA. *Modern Plastics Handbook* 2000.
97. Chanda M, Roy SK. *Plastics Technology Handbook*. 4^e éd; CRC Press; 2006. 896 p.
98. Chen T, Zhang W, Zhang J. Alkali resistance of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene glycol-co-1,4-cyclohexanedimethanol terephthalate) (PETG) copolyesters: The role of composition. 2015;120(*Polym Degrad Stab*):232-43.
99. TERMIUM Plus - Gouvernement du Canada. Polyethylene terephthalate glycol. <http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha->

- [fra.html?lang=fra&i=1&index=ent&srchtxt=POLYETHYLENE%20TEREPHTHALATE%20GLYCOL](#). 2018.
100. Fondis Electronic. Polyéthylène téréphtalate glycolisé (PETG).
 101. Bouchez R. Clinical Success in Invisalign Orthodontic Treatment; Quintessenz Verlag; 2011.
 102. Moshiri S, Araujo EA, McCray JF, Thiesen G, Kim KB. Cephalometric evaluation of adult anterior open bite non-extraction treatment with Invisalign. *Dental Press J Orthod.* 2017;22(5):30-8.
 103. Wible E, Agarwal M, Altun S, Ramir T, Viana G, Evans C, et al. Long-term effects of different cleaning methods on copolyester retainer properties. *Angle Orthod.* 2018;89(2):221-7.
 104. Dentsply Sirona. Retainer Brite® Dental Appliance Cleaner. http://essix.com/orstore/downloads/retainer_brite_instructions.pdf. 2018.
 105. Dentsply Sirona. Cordless Sonic Cleaner. <https://www.essix.com/orstore/ShowItem.aspx?productID=RB-USC>. 2018.
 106. Dentsply Sirona. Retainer Brite® Cleaning Tablets. <http://essix.com/orstore/ShowItem.aspx?productID=RB-92-CASE>. 2018.
 107. Albanna RH, Farawanah HM, Aldrees AM. Microbial evaluation of the effectiveness of different methods for cleansing clear orthodontic retainers: A randomized clinical trial. *Angle Orthod.* 2017;87(3):460-5.
 108. Amazon. Retainer Brite & Sonic Cleaner. <https://www.amazon.co.uk/Retainer-Cleaner-Cleaning-Batteries-Included/dp/B00GRBB1Z4>. 2018.
 109. Align Technology. Official Invisalign Cleaning System. <https://www.invisalignaccessories.com>. 2018.
 110. Levrini L, Mangano A, Margherini S, Tenconi C, Vigetti D, Muollo R, et al. ATP Bioluminometers Analysis on the Surfaces of Removable Orthodontic Aligners after the Use of Different Cleaning Methods. *International journal of dentistry.* 2016;2016:5926941.
 111. Align Technology. Cleaning Crystals Instructions For Use. 2016-2017.
 112. Invisalign Cleaning Crystals for Aligners and Retainers. <https://www.qoo10.sg/item/INVISALIGN-INVISALIGN-CLEANING-CRYSTALS-FOR-ALIGNERS-AND-RETAINERS/656797895?ar=Y>.
 113. Wible E, Agarwal M, Altun S, Ramir T, Viana G, Evans C, et al. Long-term effects of various cleaning methods on polypropylene/ethylene copolymer retainer material. *Angle Orthod.* 2019;89(3):432-7.
 114. Brunner E, Domhof S, Langer F. Nonparametric analysis of longitudinal data in factorial experiments. New York; J. Wiley; 2002. 261 p.
 115. Polyetherurethane [En ligne]. [cité le 20 août 2019]. Hummel Polymer Sample Library ; Thermo Fisher Scientific Inc. for Nicolet FT-IR.
 116. Polyurethane resin [En ligne]. [cité le 20 août 2019]. HR Nicolet Sampler Library ; Thermo Fisher Scientific Inc. for Nicolet FT-IR.
 117. Paszkiewics S, Szymczyk A, Pawlikowska D, Irska I, Taraghi I, Pilawka R, et al. Synthesis and characterization of poly(ethylene terephthalate-co-1,4-cyclohexanedimethylene terephthalate)-block-poly(tetramethylene oxide) copolymers. *RCS Advances.* 2017;7(66):41745-54.

118. Cong L, Yang F, Guo G, Ren M, Shi J, Tan L. The use of polyurethane for asphalt pavement engineering applications: A state-of-the-art review. *Const Build Mater.* 2019;225:1012-25.
119. Colombo M, Cavallo M, Miegge M, Dagna A, Beltrami R, Chiesa M, et al. Color stability of CAD/CAM Zirconia ceramics following exposure to acidic and staining drinks. *Journal of clinical and experimental dentistry.* 2017;9(11):e1297-e303.
120. Wieckiewicz M, Opitz V, Richter G, Boening KW. Physical properties of polyamide-12 versus PMMA denture base material. *BioMed research international.* 2014;2014:150298.
121. Fernandes AB, Ruellas AC, Araujo MV, Sant'Anna EF, Elias CN. Assessment of exogenous pigmentation in colourless elastic ligatures. *J Orthod.* 2014;41(2):147-51.
122. Ryokawa H, Miyazaki Y, Fujishima A, Miyazaki T, Maki K. The mechanical properties of dental thermoplastic materials in a simulated intraoral environment. *Orthod Waves.* 2006;65(2):64-72.

Annexe 1

Tableau 4 : Comparaison des valeurs moyennes de changements de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T1 (douze heures d'immersion) et T0 (temps initial)

$\Delta E=T1-T0$	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	IC*	Moy	S	IC	Moy	S	IC	Moy	S	IC	Moy	S	IC
Invisalign	7,12	2,27	a	0,92	0,34	a	0,90	0,27	ab	1,56	0,65	a	5,66	0,43	a
ClearCorrect	0,98	0,25	b	0,88	0,32	a	1,20	0,51	a	0,85	0,29	b	1,47	0,25	b
Minor Tooth Movement	0,91	0,32	b	0,65	0,33	a	0,63	0,29	b	1,03	0,36	b	0,90	0,26	c

Moy = moyenne ; S = écart-type ; IC = comparaison inter-groupes ; * = test de Brunner-Langer employé

Les comparaisons inter-groupes des différences de couleur selon la marque de gouttières ont été obtenues grâce au test des comparaisons multiples de Tukey. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les marques d'aligneurs dans la solution concernée entre ces deux temps de comparaisons (ici, $\Delta E=T1-T0$). ($P<0,05$)

Tableau 5 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T1 (douze heures d'immersion) et T0 (temps initial)

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC
Invisalign	6,55	2,09	b	0,84	0,32	e	0,82	0,25	e	1,43	0,60	e	5,20	0,40	c
ClearCorrect	0,90	0,23	e	0,60	0,30	e	1,10	0,47	e	0,78	0,26	e	1,35	0,23	e
Minor Tooth Movement	0,83	0,29	e	0,60	0,30	e	0,58	0,27	e	0,94	0,33	e	0,83	0,24	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

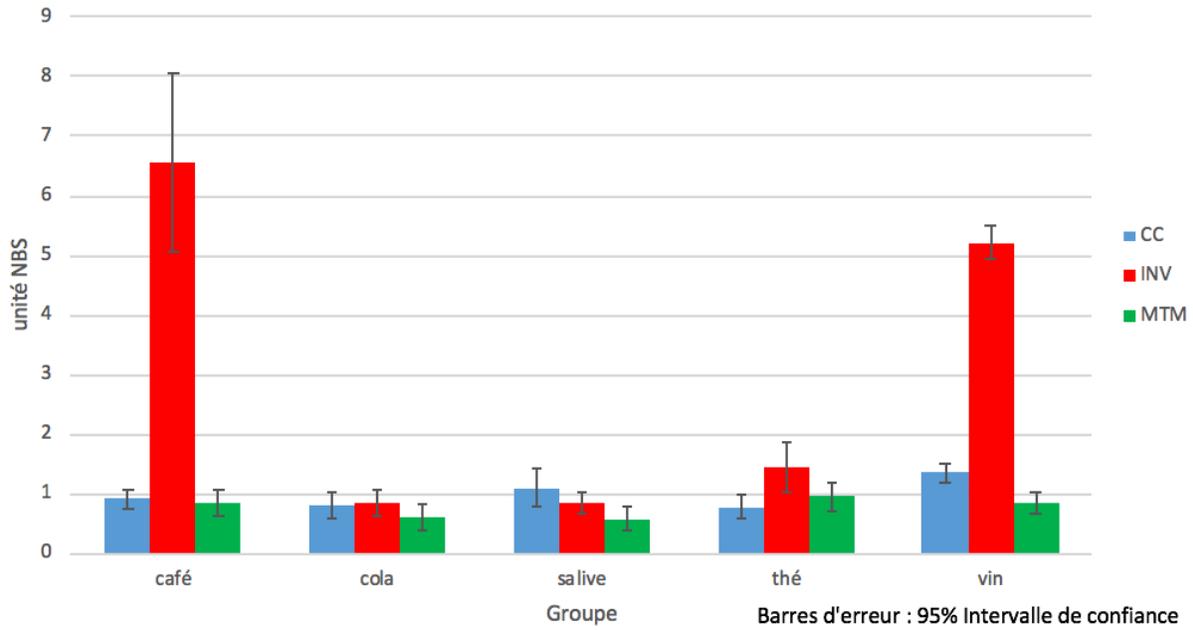


Figure 27 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T1 (douze heures d'immersion) et T0 (temps initial)

Annexe 2

Tableau 6 : Comparaison des valeurs moyennes de changements de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T2 (sept jours d'immersion) et T0 (temps initial)

$\Delta E=T2-T0$	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	IC*	Moy	S	IC	Moy	S	IC*	Moy	S	IC	Moy	S	IC*
Invisalign	27,76	4,99	a	0,74	0,27	a	1,06	0,18	b	23,01	3,24	a	15,75	2,99	a
ClearCorrect	1,97	0,67	b	0,87	0,26	a	1,33	0,57	b	19,28	3,51	a	1,22	0,47	b
Minor Tooth Movement	1,45	0,42	b	0,78	0,21	a	0,66	0,23	a	21,21	2,98	a	0,81	0,42	b

Moy = moyenne ; S = écart-type ; IC = comparaison inter-groupes ; * = test de Brunner-Langer employé

Les comparaisons inter-groupes des différences de couleur selon la marque de gouttières ont été obtenues grâce au test des comparaisons multiples de Tukey. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les marques d'aligneurs dans la solution concernée entre ces deux temps de comparaisons (ici, $\Delta E=T2-T0$). ($P<0,05$)

Tableau 7 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T2 (sept jours d'immersion) et T0 (temps initial)

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC*
Invisalign	25,54	4,59	a	0,68	0,25	e	0,98	0,17	e	21,17	2,98	a	14,49	2,75	a
ClearCorrect	1,36	0,62	e	0,80	0,24	e	1,22	0,52	e	17,74	3,23	a	1,12	0,43	e
Minor Tooth Movement	1,33	0,38	e	0,72	0,19	e	0,61	0,21	e	19,51	2,74	a	0,74	0,39	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

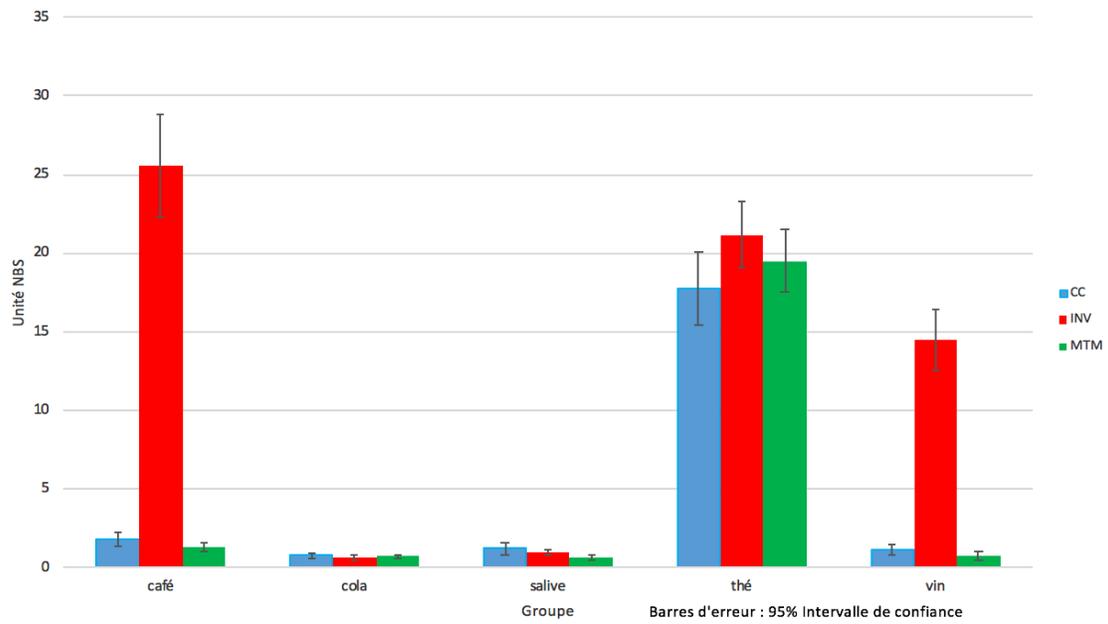


Figure 28 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T2 (sept jours d'immersion) et T0 (temps initial)

Annexe 3

Tableau 8 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage) et T1 (douze heures d'immersion)

$\Delta E=T3-T1$	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	IC	Moy	S	IC	Moy	S	IC	Moy	S	IC	Moy	S	IC
Marque															
Invisalign	1,46	0,47	a	0,57	0,29	a	0,47	0,20	a	1,21	0,43	a	1,31	0,98	N/A
ClearCorrect	1,25	0,33	a	0,86	0,30	a	0,57	0,37	a	1,00	0,20	a	1,96	0,32	N/A
Minor Tooth Movement	1,22	0,35	a	0,65	0,27	a	0,57	0,11	a	1,11	0,46	a	1,18	0,32	N/A

Moy = moyenne ; S = écart-type ; IC = comparaison inter-groupes ; N/A = non-applicable

Les comparaisons inter-groupes des différences de couleur selon la marque de gouttières ont été obtenues grâce au test des comparaisons multiples de Tukey. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les marques d'aligneurs dans la solution concernée entre ces deux temps de comparaisons (ici, $\Delta E=T3-T1$). ($P<0,05$)

Tableau 9 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par cristaux Invisalign®) et T1 (douze heures d'immersion)

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC
Invisalign	1,39	0,35	e	0,73	0,21	e	0,38	0,18	f	1,17	0,45	e	0,56	0,32	e
ClearCorrect	1,16	0,37	e	0,82	0,34	e	0,62	0,28	e	0,91	0,21	e	1,86	0,40	d
Minor Tooth Movement	1,21	0,36	e	0,54	0,26	e	0,53	0,10	e	1,26	0,38	e	0,90	0,25	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

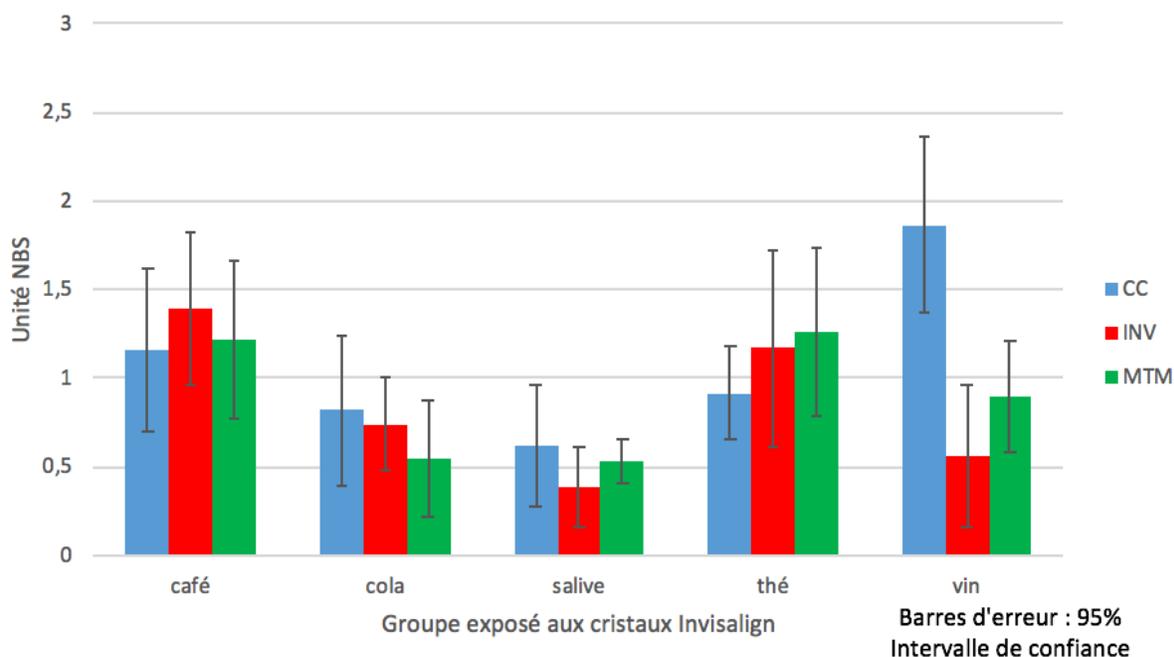


Figure 29 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T1 (douze heures d'immersion)

Tableau 10 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T1 (douze heures d'immersion)

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC
Invisalign	1,30	0,54	e	0,32	0,09	f	0,49	0,19	f	1,06	0,37	e	1,84	0,83	d
ClearCorrect	1,15	0,26	e	0,78	0,23	e	0,43	0,40	f	0,93	0,17	e	1,74	0,18	d
Minor Tooth Movement	1,03	0,28	e	0,66	0,24	e	0,51	0,12	e	0,79	0,35	e	1,28	0,19	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

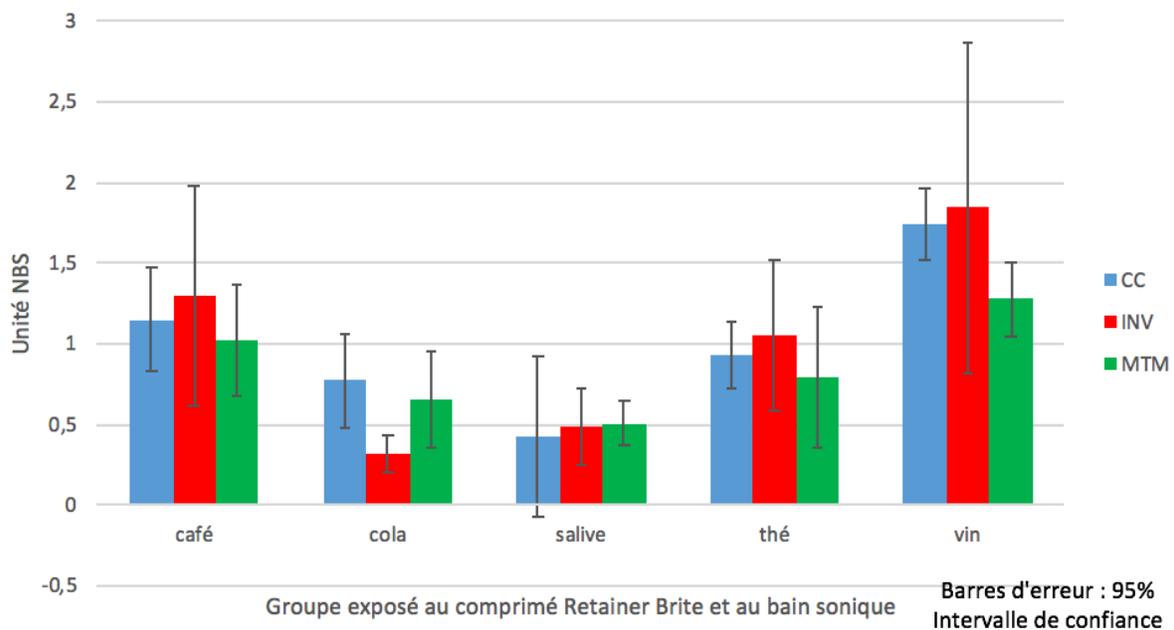


Figure 30 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par Retainer Brite®) et T1 (douze heures d'immersion)

Annexe 4

Tableau 11 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage) et T2 (7 jours d'immersion)

$\Delta E=T3-T2$	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	IC*	Moy	S	IC*	Moy	S	IC*	Moy	S	IC	Moy	S	IC
Invisalign	1,59	0,91	a	0,66	0,33	a	0,48	0,22	a	19,60	4,13	a	1,46	0,79	b
ClearCorrect	1,91	0,64	a	0,51	0,29	a	0,71	0,35	a	17,29	3,80	a	1,26	0,57	ab
Minor Tooth Movement	1,39	0,55	a	0,59	0,13	a	0,67	0,20	a	20,09	2,93	a	0,68	0,27	a

Moy = moyenne ; S = écart-type ; IC = comparaison inter-groupes ; * = test de Brunner-Langer employé

Les comparaisons inter-groupes des différences de couleur selon la marque de gouttières ont été obtenues grâce au test des comparaisons multiples de Tukey. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les marques d'aligneurs dans la solution concernée entre ces deux temps de comparaisons (ici, $\Delta E=T3-T2$). ($P<0,05$)

Tableau 12 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T2 (sept jours d'immersion)

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC*	Moy	S	RC*	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC
Invisalign	1,58	1,13	d	0,75	0,34	e	0,41	0,26	f	20,30	3,94	a	1,57	0,80	d
ClearCorrect	1,66	0,30	d	0,56	0,34	e	0,66	0,19	e	17,36	2,25	a	1,29	0,62	e
Minor Tooth Movement	1,64	0,38	d	0,48	0,08	f	0,62	0,27	e	19,34	1,85	a	0,64	0,08	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

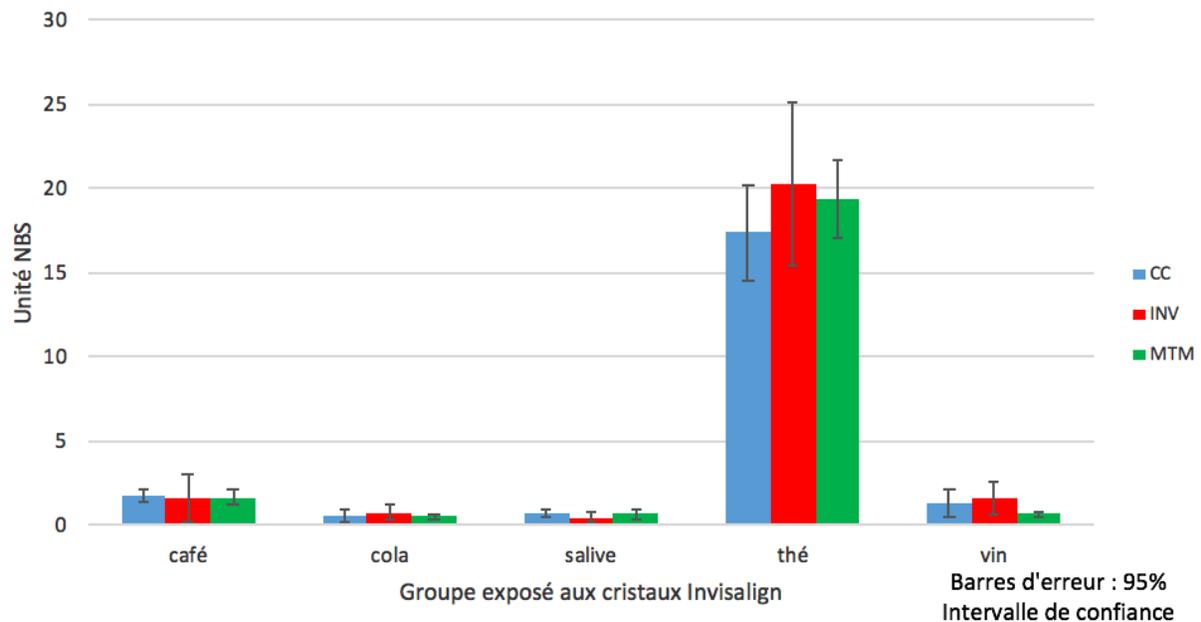


Figure 31 : Valeurs moyenne d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T2 (sept jours d'immersion)

Tableau 13 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T2 (sept jours d'immersion)

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC*	Moy	S	RC*	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC
Invisalign	1,35	0,52	e	0,47	0,18	f	0,48	0,14	f	15,76	2,02	a	1,12	0,64	e
ClearCorrect	1,86	0,81	d	0,38	0,16	f	0,65	0,45	e	14,45	4,13	a	1,04	0,44	e
Minor Tooth Movement	0,93	0,35	e	0,61	0,13	e	0,61	0,08	e	17,63	3,33	a	0,61	0,36	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

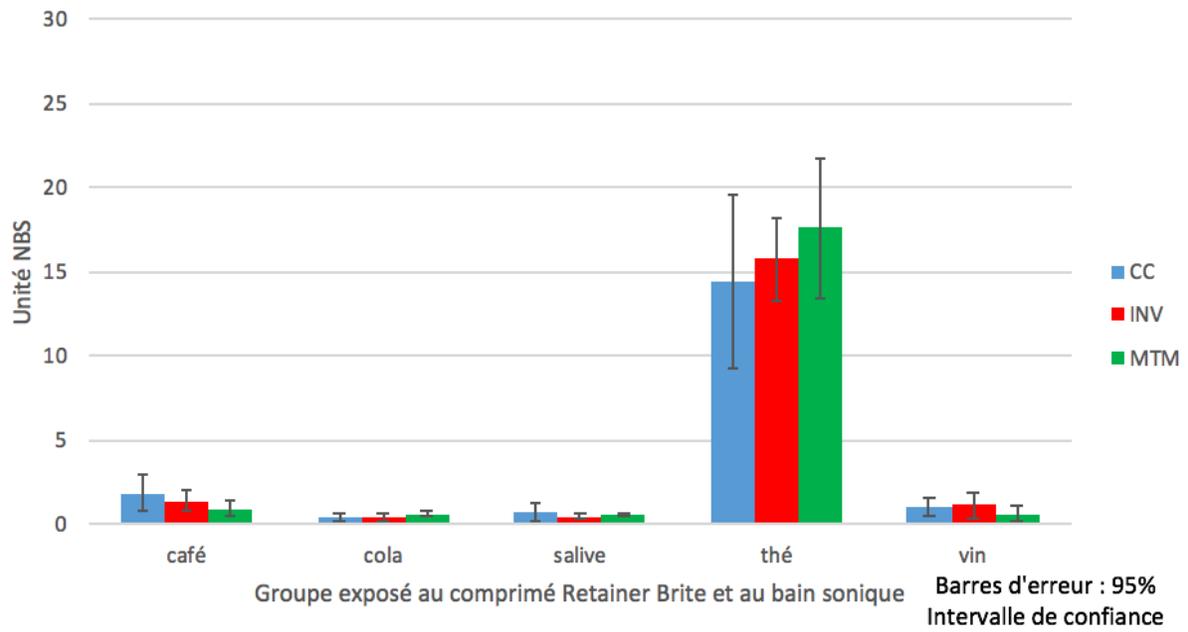


Figure 32 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par Retainer Brite®) et T2 (sept jours d'immersion)

Annexe 5

Tableau 14 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

$\Delta E=T3-T0$	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	IC*	Moy	S	IC*	Moy	S	IC	Moy	S	IC	Moy	S	IC*
Invisalign	5,89	2,46	a	1,12	0,26	b	1,08	0,39	ab	1,11	0,37	b	4,51	0,95	a
ClearCorrect	1,16	0,45	b	1,14	0,45	b	1,16	0,44	a	0,40	0,29	a	1,22	0,28	b
Minor Tooth Movement	0,67	0,27	c	0,74	0,33	a	0,71	0,24	b	0,79	0,37	b	0,83	0,27	c

Moy = moyenne ; S = écart-type ; IC = comparaison inter-groupes ; * = test de Brunner-Langer employé

Les comparaisons inter-groupes des différences de couleur selon la marque de gouttières ont été obtenues grâce au test des comparaisons multiples de Tukey. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les marques d'aligneurs dans la solution concernée entre ces deux temps de comparaisons (ici, $\Delta E=T3-T0$). ($P<0,05$)

Tableau 15 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par cristaux Invisalign®) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC*	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC*
Invisalign	5,79	2,16	c	1,12	0,26	e	0,96	0,40	e	0,88	0,24	e	4,60	0,43	c
ClearCorrect	1,10	0,29	e	0,89	0,55	e	1,08	0,41	e	0,45	0,14	f	1,16	0,30	e
Minor Tooth Movement	0,51	0,14	e	0,50	0,22	f	0,62	0,17	e	0,74	0,46	e	0,80	0,25	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

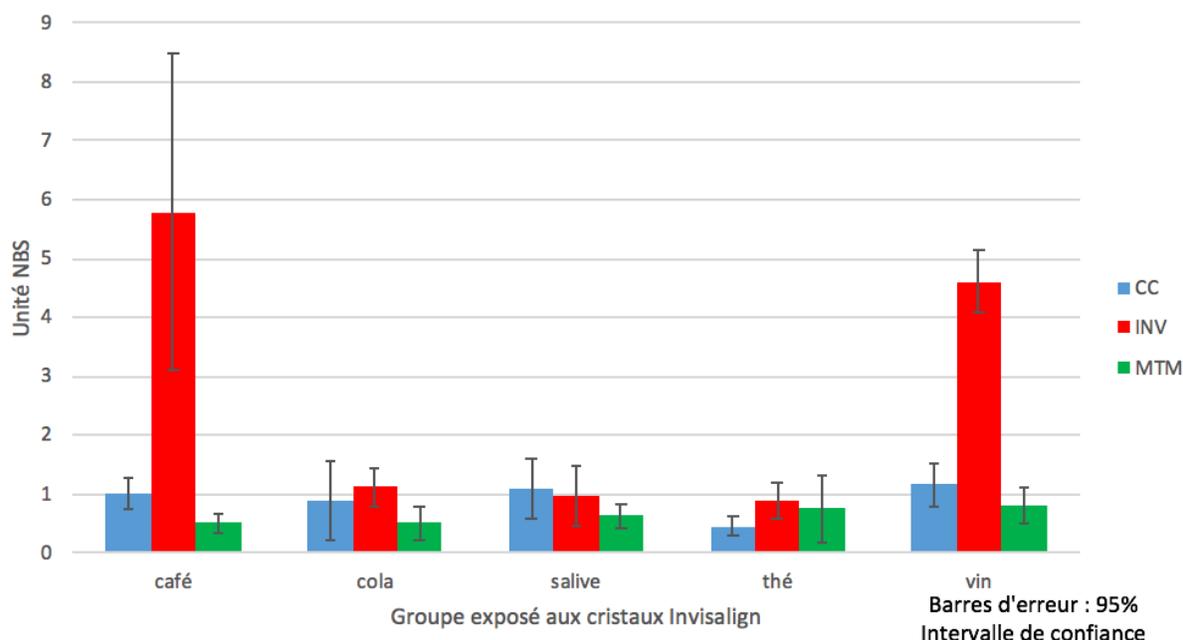


Figure 33 : Valeurs moyennes d’unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Tableau 16 : Comparaison des valeurs moyennes d’unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC*	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC*
Invisalign	5,04	2,55	c	0,93	0,20	e	1,02	0,35	e	1,17	0,39	e	3,70	1,01	c
ClearCorrect	1,04	0,55	e	1,21	0,16	e	1,06	0,45	e	0,28	0,35	f	1,09	0,23	e
Minor Tooth Movement	0,73	0,29	e	0,86	0,26	e	0,69	0,29	e	0,70	0,22	e	0,73	0,28	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

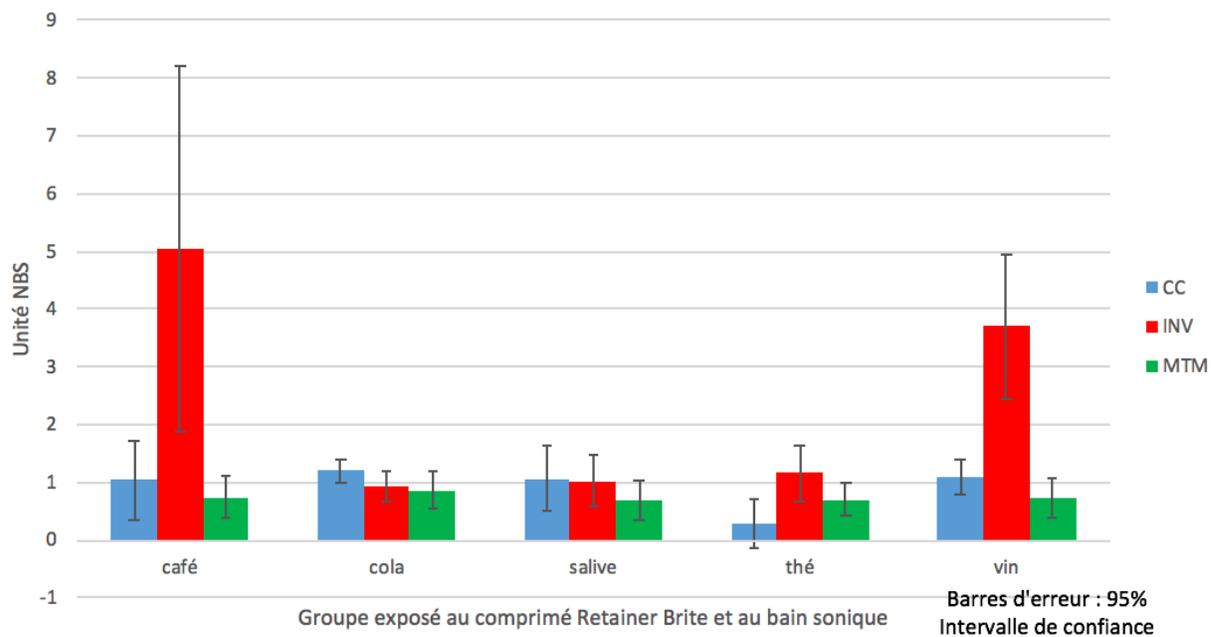


Figure 34 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de douze heures

Annexe 6

Tableau 17 : Comparaison des valeurs moyennes de changement de couleur (ΔE) de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

$\Delta E=T3-T0$	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	IC*	Moy	S	IC*	Moy	S	IC	Moy	S	IC	Moy	S	IC*
Invisalign	26,39	4,53	a	0,72	0,41	a	1,39	0,28	a	4,00	1,47	a	14,52	2,70	a
ClearCorrect	1,03	0,31	b	1,03	0,40	a	1,13	0,52	ab	2,15	0,93	b	1,10	0,54	b
Minor Tooth Movement	0,73	0,27	c	0,87	0,23	a	0,83	0,28	b	1,44	1,17	b	0,88	0,29	b

Moy = moyenne ; S = écart-type ; IC = comparaison inter-groupes ; * = test de Brunner-Langer employé

Les comparaisons inter-groupes des différences de couleur selon la marque de gouttières ont été obtenues grâce au test des comparaisons multiples de Tukey. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les marques d'aligneurs dans la solution concernée entre ces deux temps de comparaisons (ici, $\Delta E=T3-T0$). ($P<0,05$)

Tableau 18 : Comparaison des valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage par cristaux Invisalign®) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC*	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC*
Invisalign	27,44	2,30	a	0,63	0,54	e	1,23	0,28	e	2,90	1,22	d	14,57	2,07	a
ClearCorrect	0,99	0,39	e	1,04	0,38	e	0,91	0,47	e	1,28	0,57	e	1,13	0,37	e
Minor Tooth Movement	0,56	0,17	e	0,79	0,17	e	0,89	0,29	e	0,67	0,24	e	0,83	0,26	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

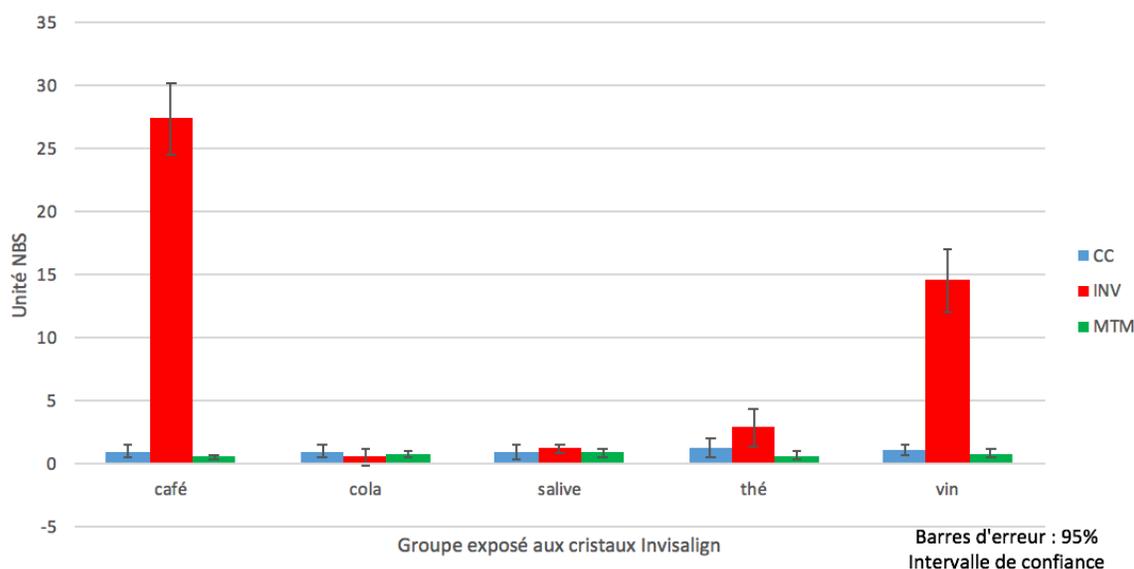


Figure 35 : Valeurs moyennes d’unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par cristaux Invisalign®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Tableau 19 : Comparaison des valeurs moyennes d’unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Marque	Café			Cola			Salive			Thé			Vin		
	Moy	S	RC*	Moy	S	RC*	Moy	S	RC	Moy	S	RC	Moy	S	RC*
Invisalign	21,11	2,94	a	0,69	0,17	e	1,33	0,25	e	4,47	1,03	c	12,15	2,43	a
ClearCorrect	0,90	0,17	e	0,85	0,37	e	1,18	0,49	e	2,68	0,35	d	0,89	0,62	e
Minor Tooth Movement	0,79	0,27	e	0,82	0,27	e	0,65	0,17	e	1,97	1,22	d	0,79	0,30	e

Moy = moyenne ; S = écart-type ; RC = remarque critique ; * = test de Brunner-Langer employé

Charte de remarques critiques : a = changement à une autre couleur ; b = changement extrêmement marqué ; c = changement marqué ; d = changement observable ; e = changement léger ; f = changement extrêmement léger

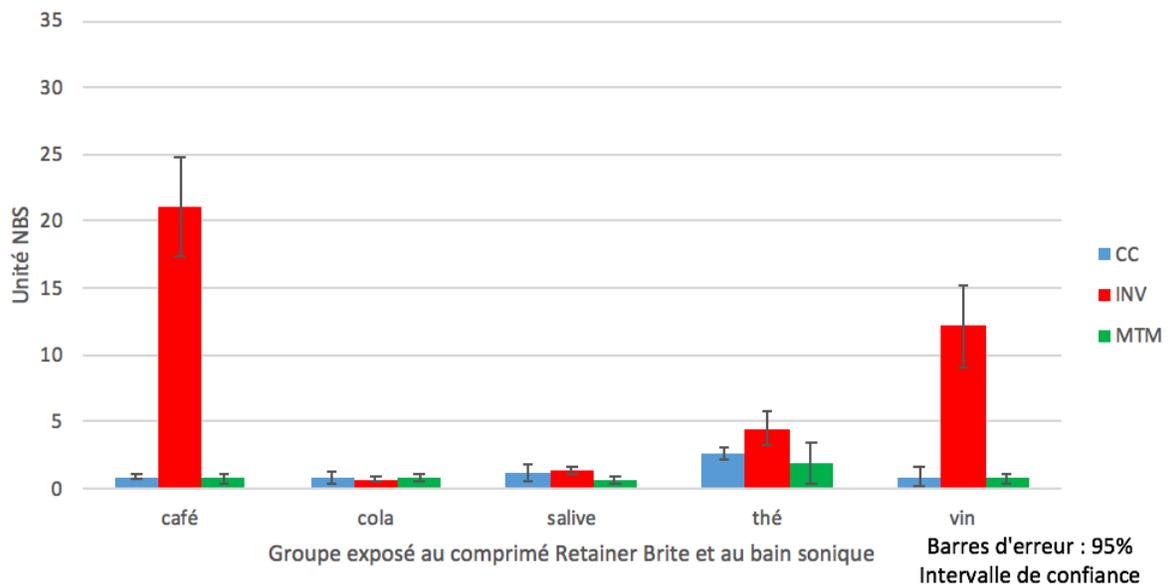


Figure 36 : Valeurs moyennes d'unités NBS de trois types de gouttières thermoplastiques dans chaque solution entre T3 (après nettoyage **par Retainer Brite®**) et T0 (temps initial) pour les immersions de sept jours

Annexe 7

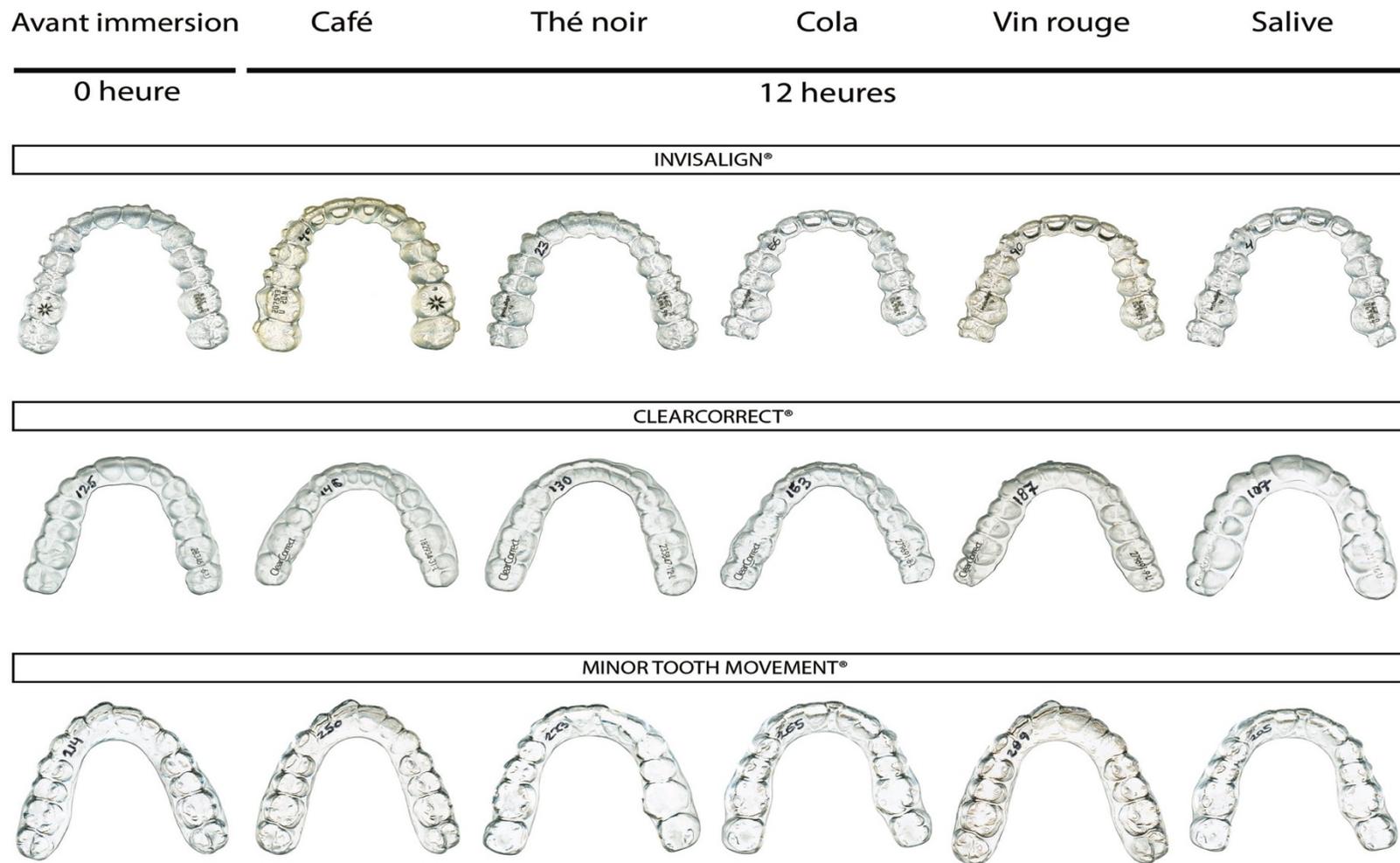


Figure 37 : Numérisations des trois marques d'aligneurs après une exposition de douze heures aux cinq substrats.

Annexe 8

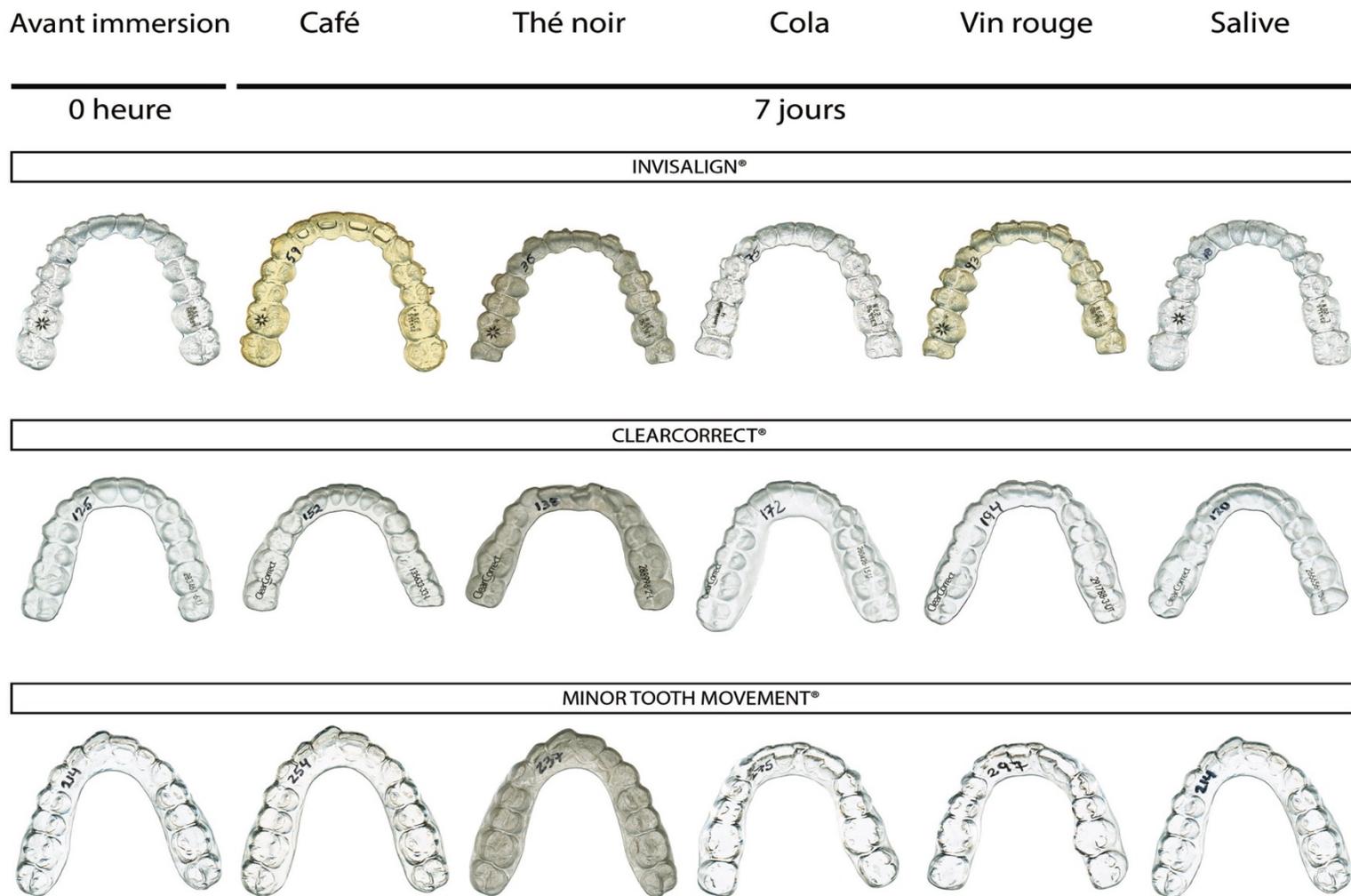


Figure 38 : Numérisations des trois marques d'aligneurs après une exposition de sept jours aux cinq substrats.

Annexe 9

INVISALIGN®

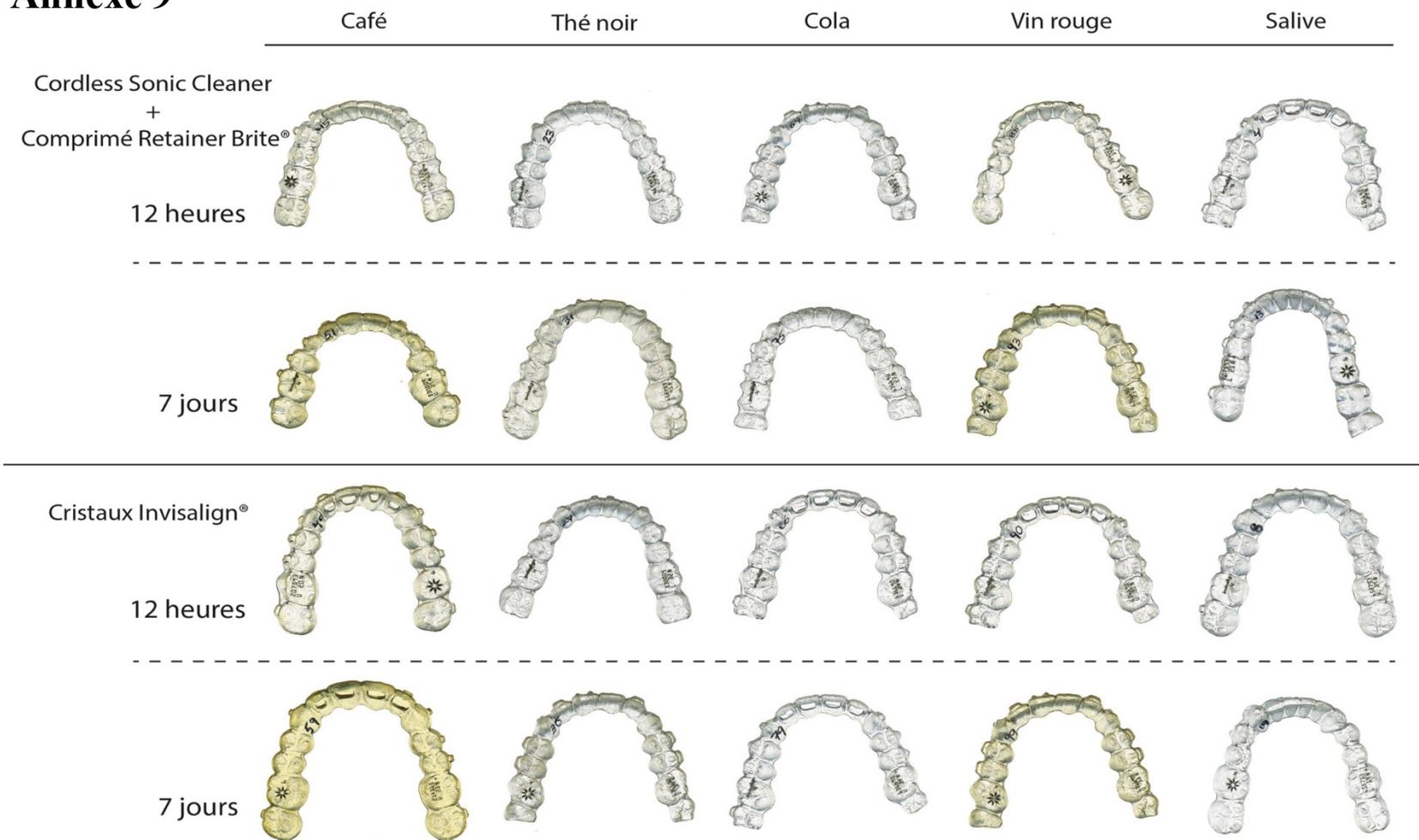


Figure 39 : Numérisations des aligneurs Invisalign® après l'exposition à l'un des deux nettoyeurs.

Annexe 10

CLEARCORRECT®

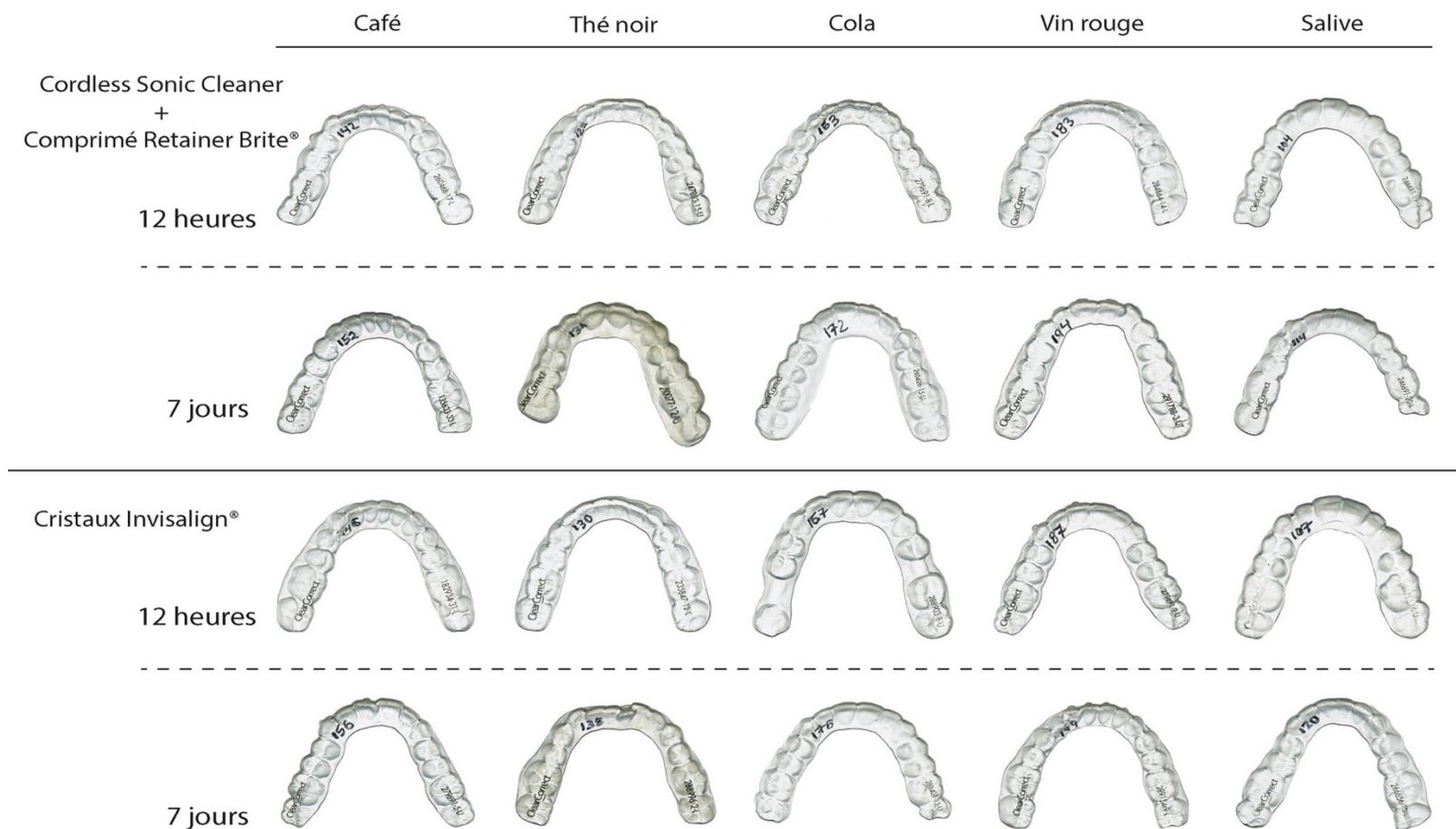


Figure 40 : Numérisations des aligneurs ClearCorrect® après l'exposition à l'un des deux nettoyants

Annexe 11

MINOR TOOTH MOVEMENT®

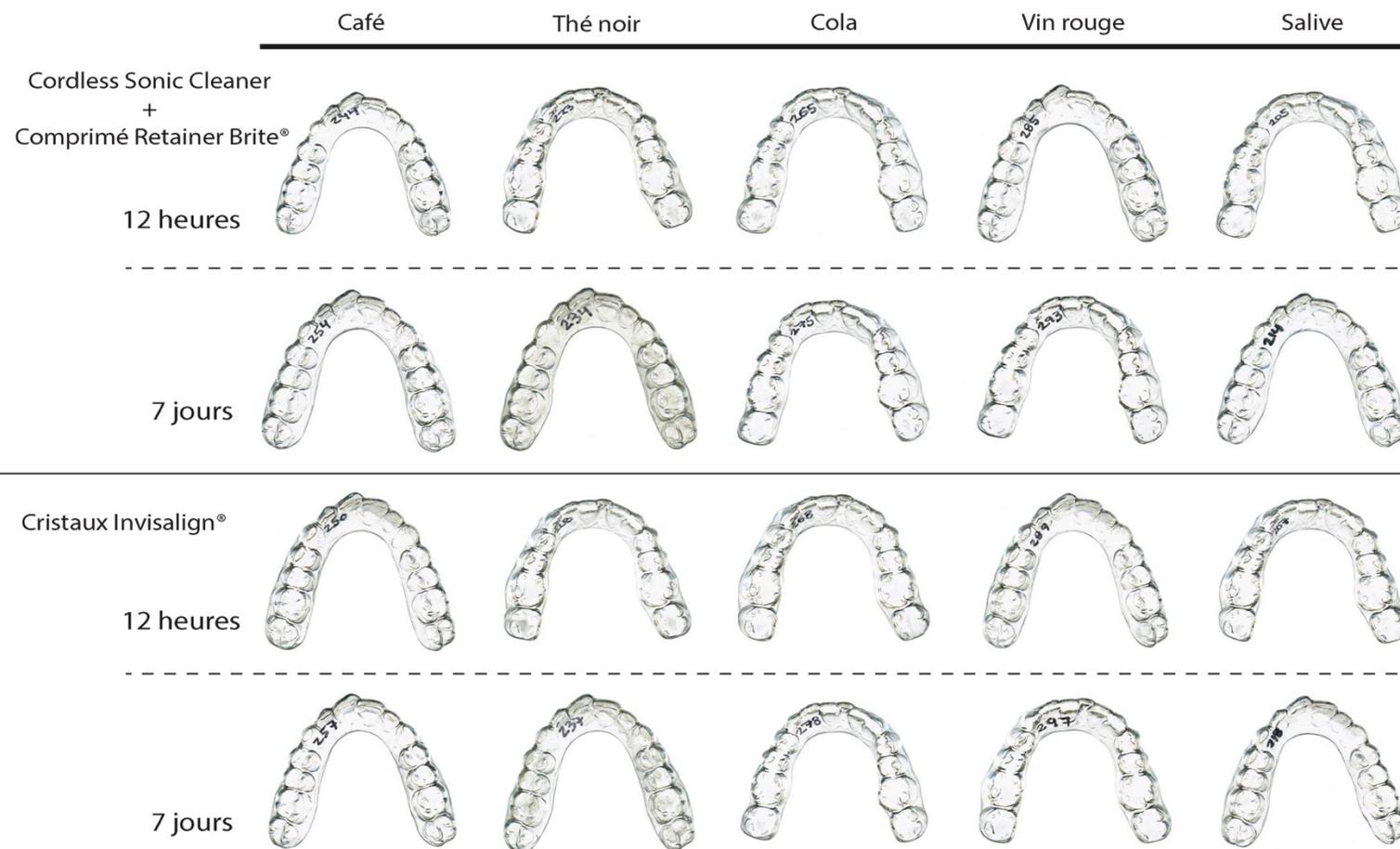


Figure 41 : Numérisations des aligneurs Minor Tooth Movement® après l'exposition à l'un des deux nettoyeurs

Annexe 12

Figure 42 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans le café entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

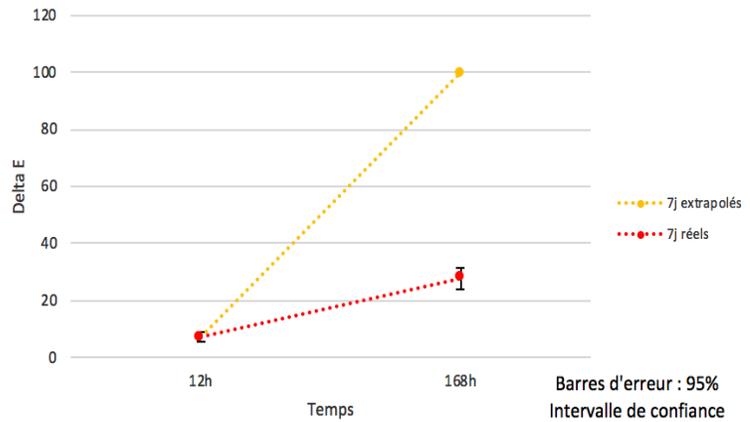


Figure 43 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans le café entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

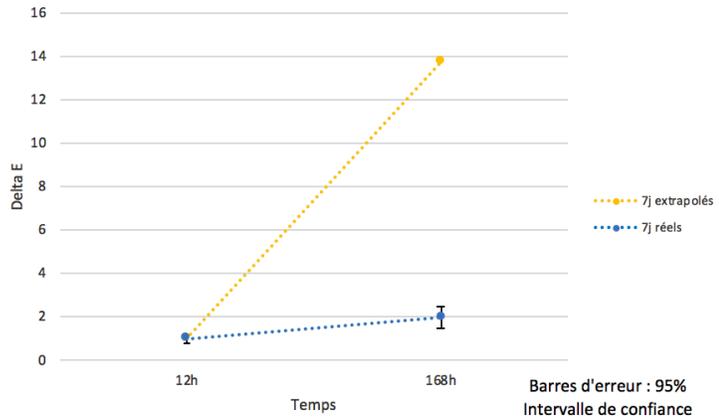
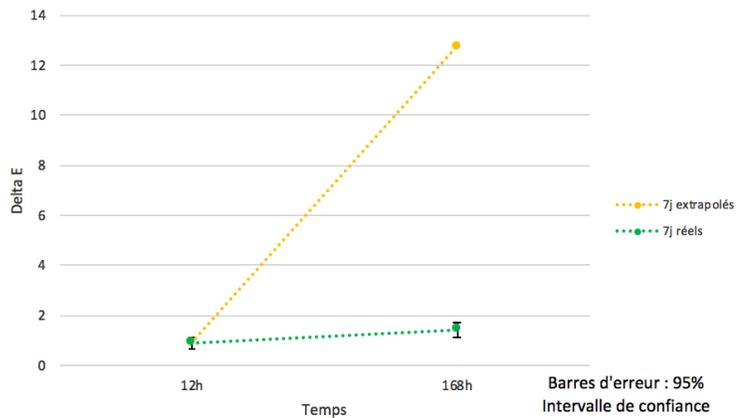


Figure 44 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans le café entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée



Annexe 13

Figure 45 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans le cola entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

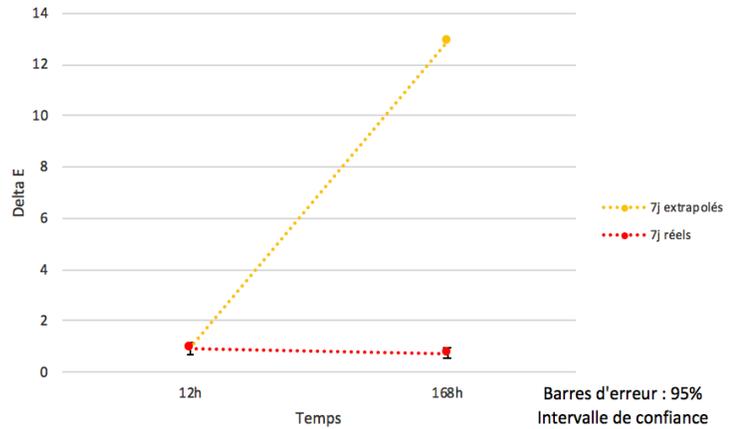


Figure 46 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans le cola entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

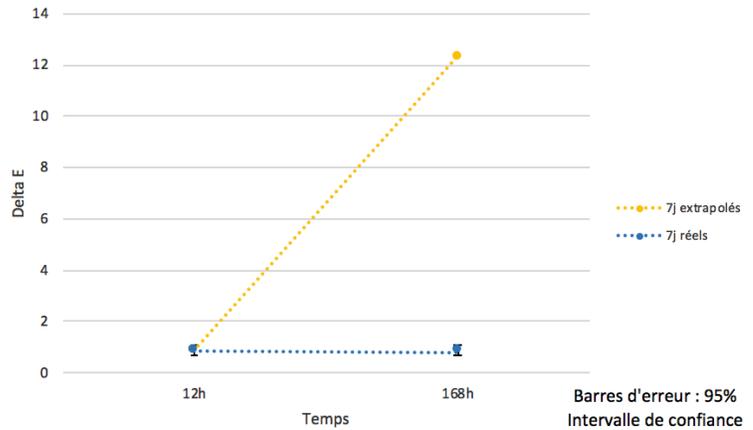
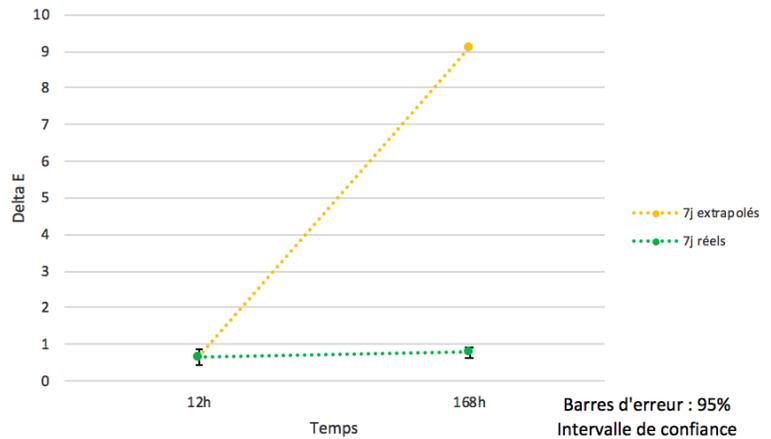


Figure 47 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans le cola entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée



Annexe 14

Figure 48 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans la salive entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

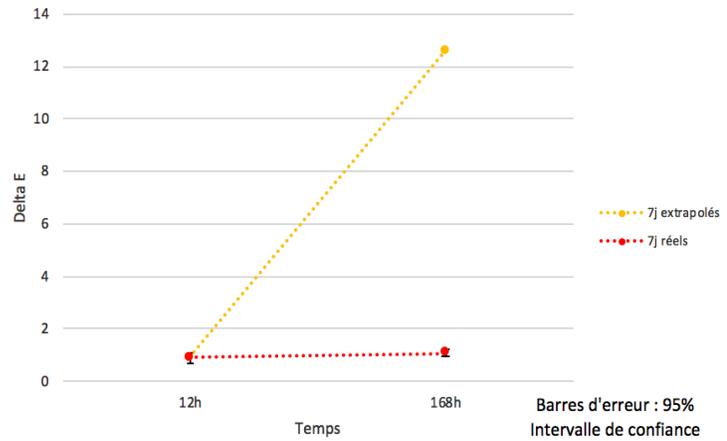


Figure 49 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans la salive entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

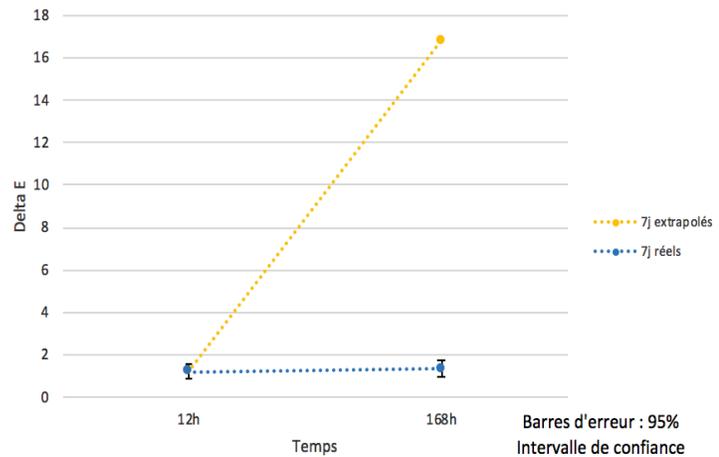
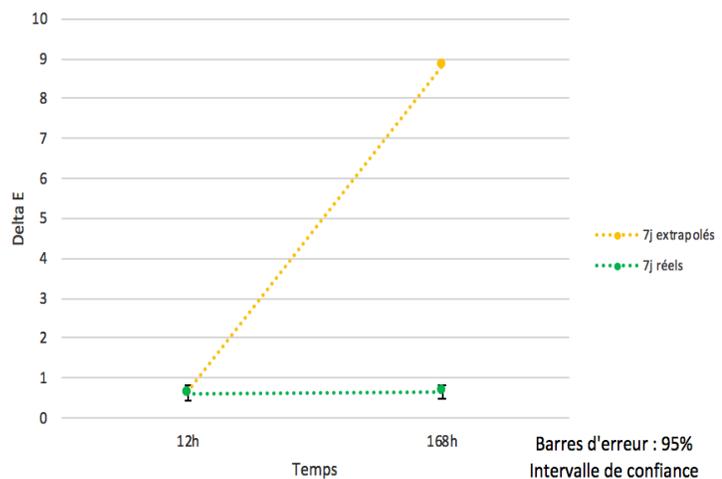


Figure 50 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans la salive entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée



Annexe 15

Figure 51 : Variation du delta E chez les coquilles Invisalign® dans le vin entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

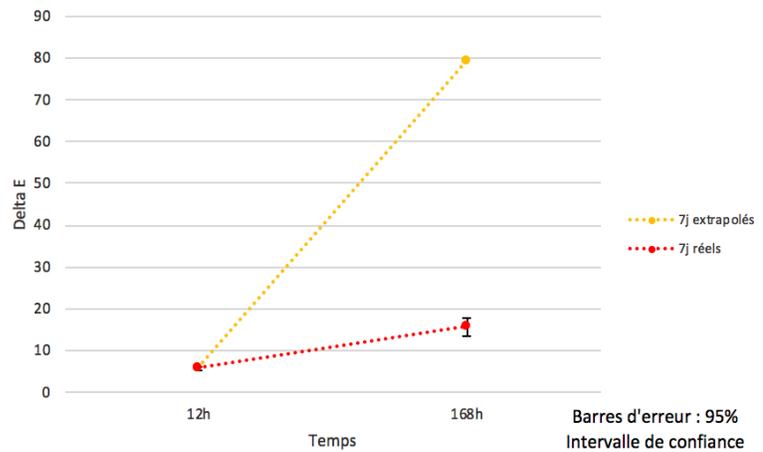


Figure 52 : Variation du delta E chez les coquilles ClearCorrect® dans le vin entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

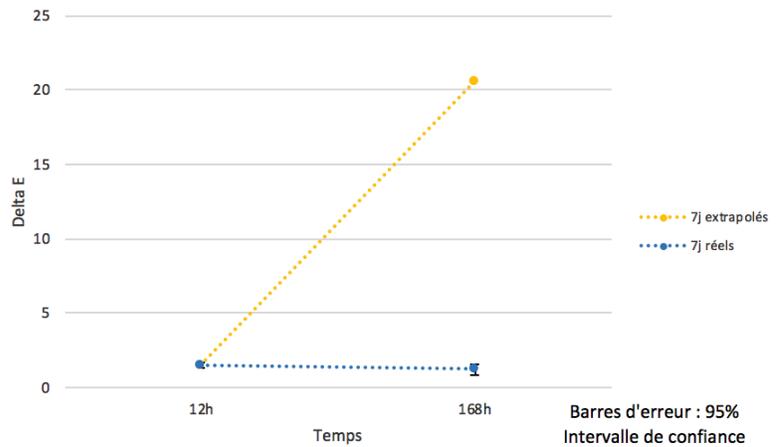


Figure 53 : Variation du delta E chez les coquilles Minor Tooth Movement® dans le vin entre les douze heures et les sept jours d'exposition réelle ou extrapolée

