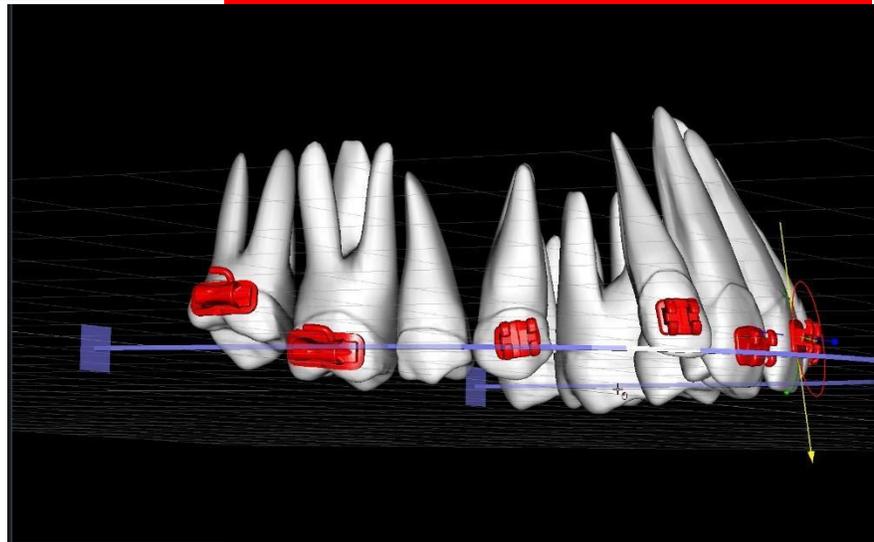


# Physique de base en Orthodontie



Dr. Jean-Marc Retrouvey, UMKC  
Dr. Katherine Kousaie, McGill

# Mécanique de base appliquée à l'orthodontie

Dr. Jean-Marc Retrouvey

Dr. Katherine Koussaie

## 1 TABLE DES MATIERES

---

2	Introduction	2
3	Mécanique de base	2
3.1	Les Trois Lois de Newton	3
3.1.1	Première Loi	3
3.2	Deuxième loi	3
3.3	Troisième loi	3
4	Concept de la force	4
4.1	Force simple:	4
4.1.1	Definition:	4
1.		5
4.1.2	Point d'application de la force	5
4.1.3	Ligne d'action avec direction et amplitude	6
4.1.4	Loi de transmissibilité de la force:	7
4.1.5	Point d'application de la force:	7
4.1.6	Centre de Masse	8
5	Centre de Résistance (CR):	9
5.1	Variabilité du centre de résistance selon le support parodontal présent	11
5.1.1	Centre de résistance pour une dent unique:	11
5.1.2	Centre de résistance pour un groupe de dents.	13
5.1.3	Combinaison de forces. Résultantes de forces et Force nette	14
6	Centre De Rotation:	16
6.1.1	Diagrammes de corps libre	17

7	Mouvements dentaires	20
7.1	Translation	20
7.2	(pure) Rotation	21
7.3	Bascule	21
7.3.1	Rotation incontrôlée:	21
7.3.2	Rotation contrôlée:	22
7.3.3	Mouvement radicaire	22
7.3.4	Intrusion/Extrusion	23
8	SYSTÈMES DE FORCE	25
8.1	Moment	25
8.2	Couple de Force	26
8.3	Ratio Moment / Force (M/F)	27
8.4	Mouvements lorsqu'on modifie les forces et les systèmes	30
8.5	Systèmes de Forces Équivalents	35
9	Ancrage	38
9.1	Applications	40
9.1.1	Rétraction de la Canine	40
9.1.2	Extrusion pour allongement de couronne clinique (ACC) et pose d'implant	41
10	Suggestion de Lectures	41

## 2 INTRODUCTION

---

L'orthodontie utilise les principes de base de la physique en ce qui concerne les corps en mouvement dans l'espace. Bien entendu, les mouvements orthodontiques sont plus compliqués du fait que ces corps en mouvement se retrouvent dans la bouche et sont soumis à des systèmes de forces plus complexes que la simple mécanique ne puisse prédire. La biomécanique est une partie importante de l'orthodontie et constitue l'étude de l'équilibre statique et des effets des forces sur les systèmes biologiques. Ce texte tentera de simplifier la biomécanique de l'orthodontie et fournira un cadre pour les applications cliniques.

## 3 MECANIQUE DE BASE

---

Quelques concepts de base méritent d'être revus dans de se plonger dans l'étude de la biomécanique en orthodontie et ses applications dans les cas cliniques. En orthodontie, on utilise les trois lois de Newton pour expliquer les effets des forces sur un objet.

### 3.1 LES TROIS LOIS DE NEWTON

Les lois de Newton décrivent le déplacement d'un objet soumis à des forces. Les deuxième et troisième lois de Newton sont les plus importantes en orthodontie.

#### 3.1.1 Première Loi

***En l'absence de friction, un corps demeure au repos ou continue son déplacement de façon uniforme et en ligne droite à moins d'être modifié par une force agissant sur lui.*** La première loi de Newton décrit essentiellement le concept d'inertie ou la réaction/résistance d'un corps au mouvement sous l'effet d'une force. (Fig. 1)



Figure 1: Première loi de Newton

### 3.2 DEUXIEME LOI

L'accélération d'un corps est dans la même direction que la force qui engendre cette accélération et dépend de l'amplitude de la force et de la masse de l'objet.

$$F_{\text{net}} = m a$$

(Force = masse x accélération)

### 3.3 TROISIEME LOI

La troisième loi de Newton stipule que pour chaque action ou force, il y a une force réactionnelle égale (en direction opposée). Selon cette loi, chaque fois que deux objets interagissent, ils exercent des forces d'action et de réaction l'un sur l'autre. Avec toute interaction, il y a une paire de forces. Les forces de cette paire (action et réaction) sont des vecteurs en ce sens qu'elles ont une taille et une direction. Le montant de la force sur le premier objet est égal au montant de la force sur le deuxième objet, et la direction de la force

sur le premier objet est dans la direction opposée à la direction de la force sur le deuxième objet.

Observez l'interaction entre les roues d'une automobile et la route. Lorsque les roues tournent, elles exercent une force sur la route. À son tour, la route exerce une force sur les roues qui est égale en amplitude et dans une direction opposée à la force que la route reçoit des roues. Dans un sens, les roues poussent la route vers l'arrière et la route pousse les roues vers l'avant (forces égales et opposées), permettant à l'automobile d'avancer.

Un exemple de systèmes d'action/réaction dans la bouche serait un système de rétraction de la canine. Le ressort tire la canine vers l'arrière avec une amplitude de force donnée. L'appareil utilisant les molaires comme ancrage engendre une force de même amplitude et en direction opposée tirant les molaires vers l'avant (Fig 2). Cela peut s'avérer être un effet secondaire indésirable. Lors de la planification du traitement, les effets secondaires indésirables doivent être pris en compte et éliminés ou à tout le moins, minimisés.

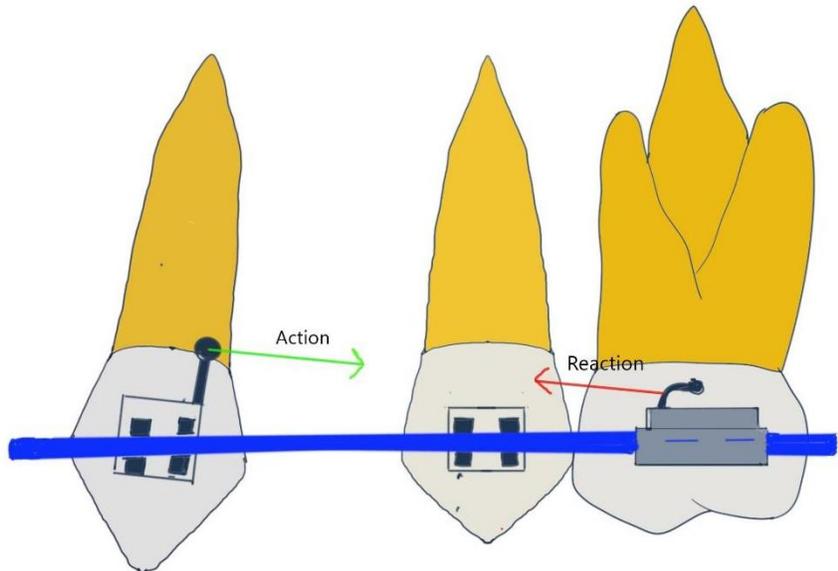


Figure 2: Les forces d'action et de réaction placent le système en équilibre. Ce croquis est simplifié.

## 4 CONCEPT DE LA FORCE

---

### 4.1 FORCE SIMPLE:

#### 4.1.1 Definition:

Une force est toute action qui entraîne un changement dans le mouvement d'un objet. Les forces sont mesurées en onces, grammes ou newtons (environ 100g/newton sur la planète terre considérant que l'accélération due à la gravité est constante et égale à  $9.807\text{m/sec}^2$ . En orthodontie, l'unité de force généralement utilisée est le gramme(2).

## Direction et amplitude de la force

Comme une force est un vecteur, sa direction est représentée par une flèche pointant dans la même direction que le mouvement de la dent.

L'amplitude est représentée par la longueur de la flèche par convention(fig 3).

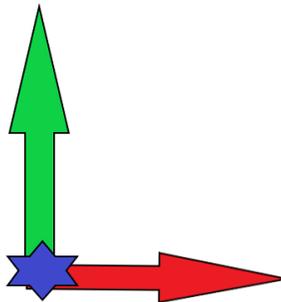


*Figure 3: Force simple illustrée avec direction et amplitude*

1.

### 4.1.2 Point d'application de la force

Le point d'application de la force est l'endroit où la force est appliquée sur l'objet et, par convention, l'origine de la flèche. L'emplacement du point d'application de la force est lié au centre de masse car cet emplacement précis déterminera la tendance de l'objet à se déplacer ou à tourner lorsque soumis à cette force.



*Figure 4: Point d'application de forces*

Dans la Figure 4, les forces représentées en rouge et vert ont un point d'application commun mais des directions différentes.

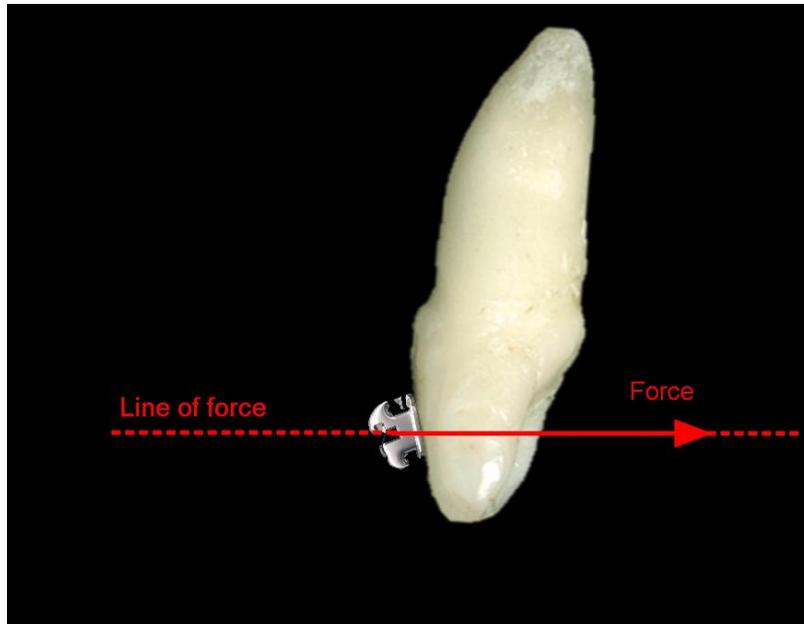


Figure 5: Une force simple appliquée sur le boîtier d'une incisive centrale. La ligne de **force/action** illustre la direction du vecteur de force

#### 4.1.3 **Ligne d'action avec direction et amplitude**

La ligne d'action est la représentation géométrique de la façon dont la force est appliquée (Wikipedia). La ligne d'action est l'axe de déplacement lorsque la force est appliquée. La direction de la force est indiquée par la flèche et la magnitude, par la longueur de cette flèche, par convention.

Deux forces de même amplitude, agissant dans le même sens et places sur la même ligne d'action auront le même effet sur un corps rigide. Dans la Figure 6, F1 et F2 auront le même effet sur le corps bleu ci-dessous. Peu importe que la F1 pousse tandis que la F2 tire, l'effet net sera identique.

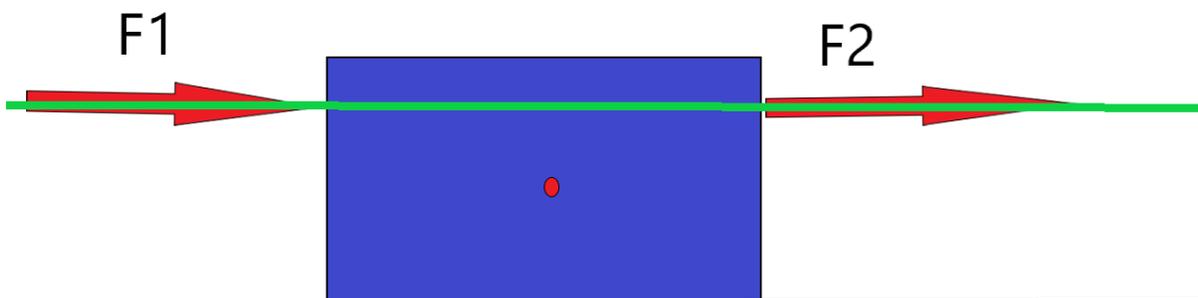
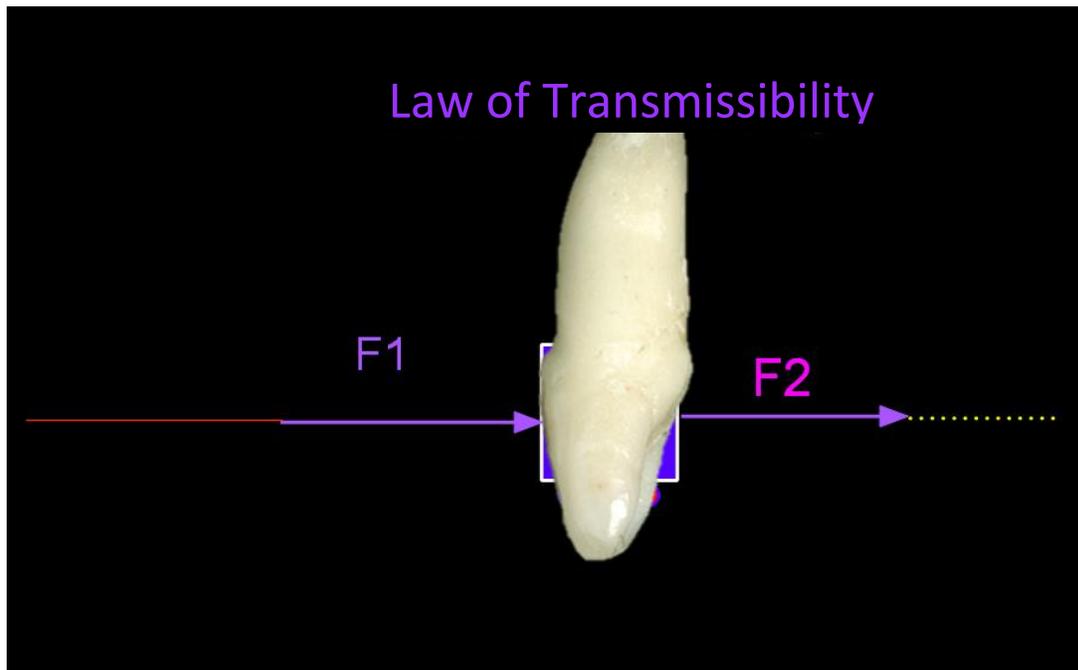


Figure 6: Ligne d'action de forces

#### 4.1.4 **Loi de transmissibilité de la force:**

L'effet d'une force sur un corps est le même, peu importe où cette force est appliquée sur la ligne d'action (Fig 7). Par exemple, si la ligne d'action est le grand axe de la dent, il importe peu que la force soit appliquée au bout incisif, au boîtier ou au cingulum. Tant que la force demeure dans la même direction et avec la même amplitude, l'effet reste le même.



*Figure 7: Loi de transmissibilité de forces: F1 et F2 auront le même effet*

#### 4.1.5 **Point d'application de la force:**

La loi de transmissibilité nous dit que des forces de même amplitude et direction ont le même effet, quel que soit l'endroit où le point d'application est situé sur la même ligne de force.

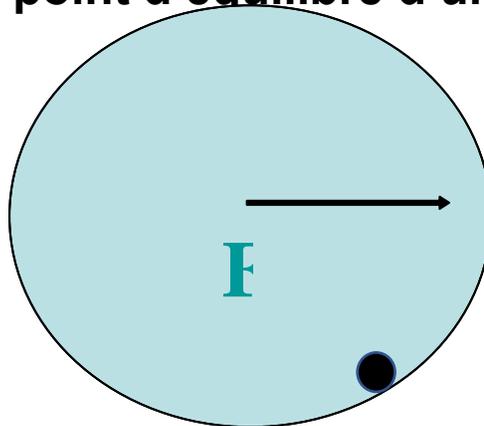
Les scalaires sont utilisés pour décrire les forces ; les scalaires ont une amplitude mais sont dénués de direction. Les vecteurs ont une amplitude et une direction (les vecteurs sont utilisés dans le diagramme du corps libre).

Corps rigides: ils ne changent pas de forme sous l'influence de forces (telles que les forces de compression et de tension). Les dents sont des corps rigides ; on ne peut pas en dire autant des tissus mous!

#### 4.1.6 Centre de Masse

Le centre de masse représente le point d'équilibre d'un système. Dans des objets simples, telle une dent, le centre de masse est un point où la position de la masse distribuée est égale à zéro. Si aucune force n'agit sur un corps de masse, il agirait comme si toute sa masse était concentrée en ce point unique (le centre de masse).

### 1. Centre of Masse: point d'équilibre d'un



*Figure 8 : Centre de Masse*

Si une force passe par le centre de masse, l'objet se déplacera dans la direction de la force sans aucune rotation (pure translation).

Ce serait la même chose pour une boîte, ou tout autre objet d'ailleurs, sur la lune (ou dans un environnement où il n'y a pas de forces agissant sur l'objet) (Fig. 9). Ce n'est évidemment pas une situation réaliste, mais plutôt un concept théorique !

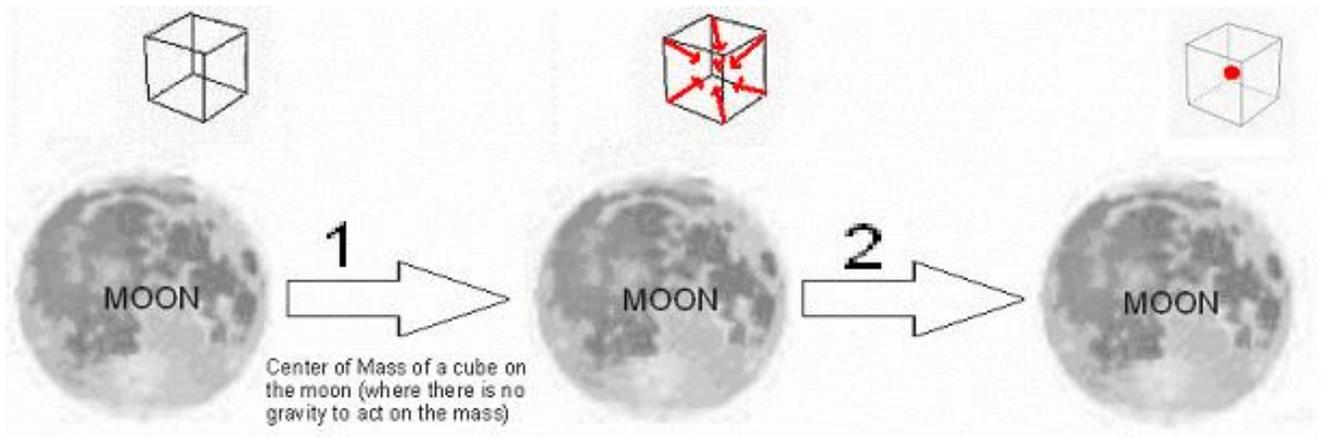


Figure 9: Centre de Masse sur la Lune

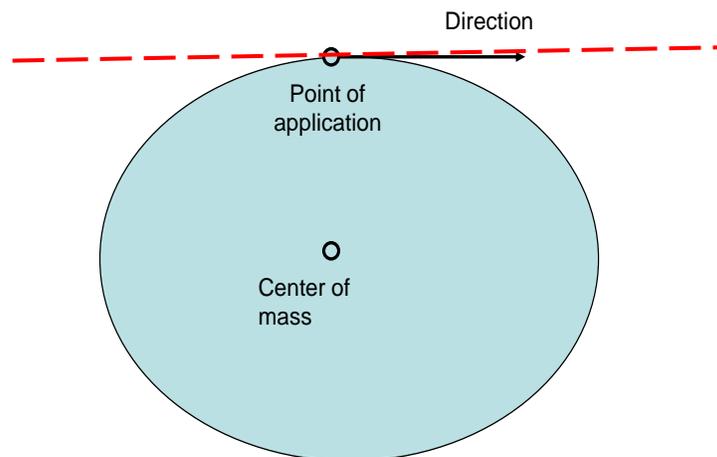


Figure 10: Ligne d'action d'une force placée à une distance du centre de masse

Si la ligne d'action d'un corps libre est éloignée du centre de résistance, une combinaison de rotation et de translation est à prévoir (Fig 10).

## 5 CENTRE DE RESISTANCE (CR):

Le centre de résistance est un concept important en orthodontie car les dents ne sont pas des corps libres, les racines étant retenues à l'os alvéolaire par le ligament parodontal. Le centre de masse et le centre de résistance ne sont pas situés au même endroit. CR est toujours situé plus apicalement que le centre de masse. C'est un point mathématique où toute résistance au déplacement est présumée concentrée. Les calculs des systèmes de force en fonction de leur capacité de translation ou de rotation s'effectuent à partir du centre de résistance.

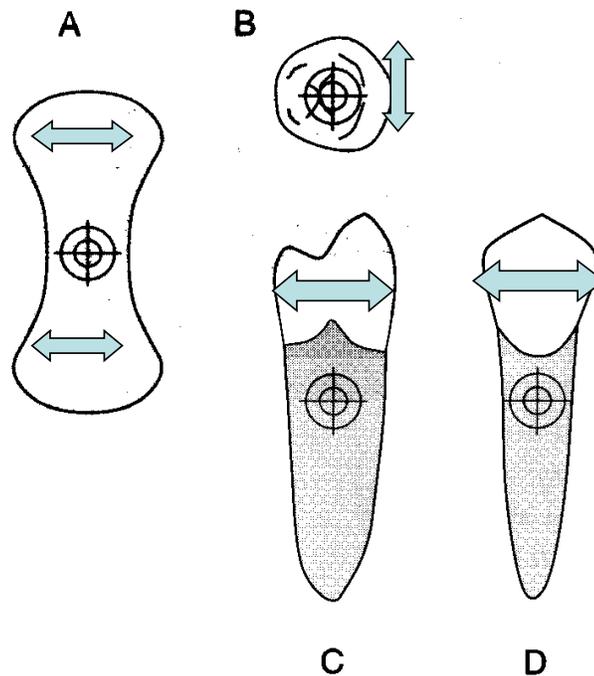


Figure 11: Position du Centre de Résistance sous différents angles de vue :  
 A. Radiculaire, B: Occlusal, C: Labio-lingual, D.: Mesio-Distal

Le centre de résistance varie pour chaque dent et selon le support parodontal présent. Il est situé à peu près à mi-chemin au niveau de la racine. (Figure 11)

Le centre de résistance tient compte de toutes les forces agissant sur un corps. Pour une dent, il comprend les forces du ligament parodontal (LPD), des vaisseaux sanguins, des os et du tissu conjonctif (Figure 12). Le centre de résistance peut être choisi pour une seule dent, ou pour un groupe de dents, si elles attachées ensemble (elles se comportent donc comme une masse plus grande).

Importance du centre de résistance : Lorsque des forces sont appliquées sur les dents, il est impératif d'évaluer leurs effets dans les 3 plans de l'espace et les mouvements résultants de la dent suite à l'application de ce système de forces.

## 5.1 VARIABILITE DU CENTRE DE RESISTANCE SELON LE SUPPORT PARODONTAL PRESENT

### Alveolar bone support

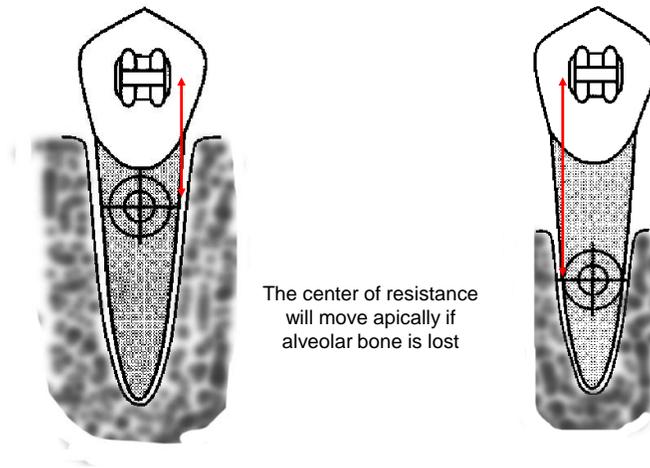
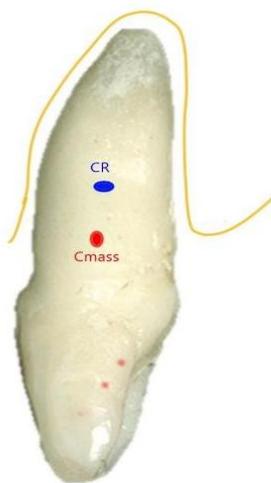


Figure 12: Le centre de résistance se déplace apicalement en présence de perte osseuse.

En présence de support parodontal réduit, la crête de l'os alvéolaire est plus apicale. Le centre de résistance de la dent se déplace considérablement plus apicalement et la distance entre le boîtier et le centre de résistance double presque (figure 12). La même force appliquée au boîtier de chacune de ces deux dents résultera un mouvement orthodontique différent. Dû à l'accroissement de la distance entre le boîtier (ligne de force) et le centre de résistance, la dent de droite présentera une rotation plus importante.

#### 5.1.1 Centre de résistance pour une dent unique:



Le centre de masse est toujours placé plus occlusalement que le centre de résistance en raison de la « résistance » du ligament parodontal et de l'os dentoalvéolaire. Cette résistance étant impossible à quantifier pour chaque dent et pour chaque patient, le centre de résistance est un concept théorique mais peut être utilisé comme moyenne pour créer des systèmes de force optimisés.

Figure 13: Centre de résistance (CR) vs Centre de masse (Cmass) d'une dent monoradiculaire

Dans les cas où le support parodontal est constant, le centre de résistance des différentes dents sera à des niveaux différents. Les canines supérieures auront un centre de résistance plus élevé tandis que les prémolaires et les incisives latérales auront un centre de résistance plus bas.

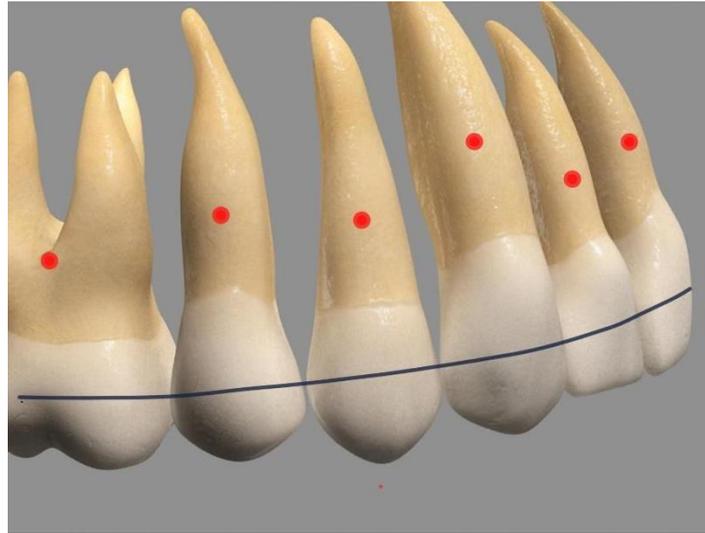


Figure 14: Position des différents centres de résistance (considérant le support parodontal identique et normal)

Il est donc évident que le centre de résistance est différent pour les dents d'anatomie différentes avec des racines de longueur différentes, par exemple entre les incisives et les molaires, ou entre les prémolaires et les canines. Sa position varie également avec la hauteur de l'os alvéolaire, de sorte qu'elle sera différente chez un enfant par rapport à un adulte avec une maladie parodontale (le centre de résistance se déplace plus apicalement chez les adultes avec perte osseuse) (Fig 14).

Le centre de résistance peut aussi être décrit comme le point sur un corps où une force simple appliquée à ce point précis résulte en une translation pure (Fig 15).

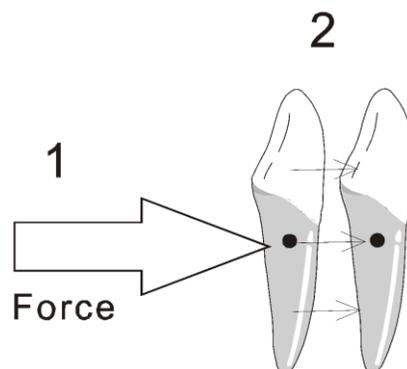


Figure 15: Les forces agissant au centre de résistance engendrent une translation pure

### 5.1.2 Centre de résistance pour un groupe de dents.

Lorsque les dents sont liées ensemble par des boîtiers et des fils, un nouveau centre de résistance est créé et le groupe de dents est désormais considéré comme un seul objet.

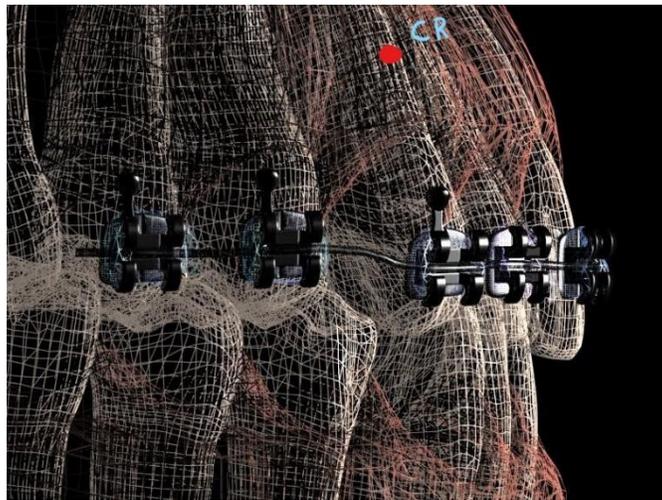


Figure 16: Centre de résistance pour un groupe de dents

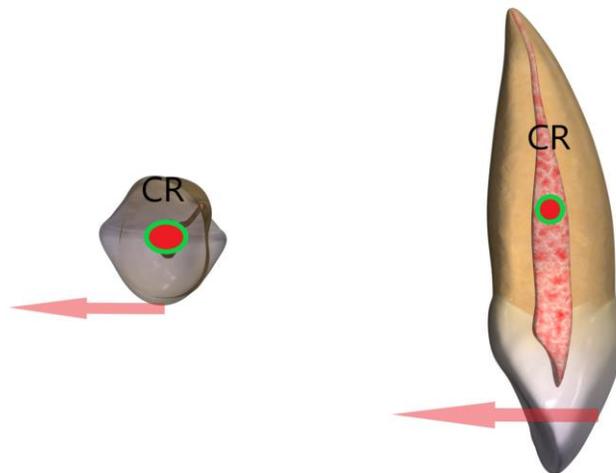


Figure 17: La ligne de force est toujours à une distance du centre de résistance lorsqu'une force est appliquée sur le boîtier

### 5.1.3 Combinaison de forces. Résultantes de forces et Force nette

En orthodontie, la combinaison de forces dans les trois plans de l'espace est fréquemment utilisée et il est utile de calculer la force nette (ou la force résultante). On utilise la règle du parallélogramme pour calculer la somme des vecteurs.

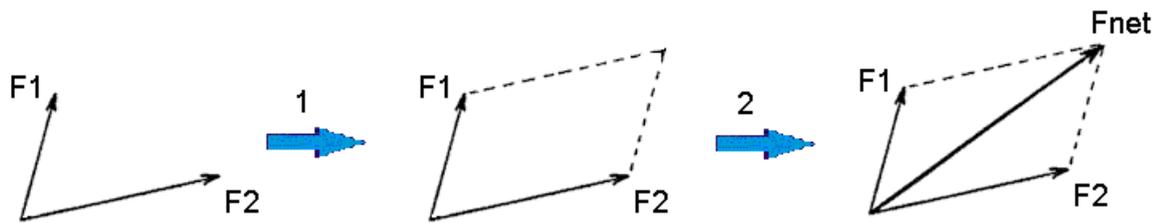


Figure 18. Règle du parallélogramme

Il est important de se rappeler que la force ( $F_{net}$ ) est la force nette qui est la somme vectorielle de toutes les forces ( $F_1$  et  $F_2$ ). La règle du parallélogramme nous permet de calculer la force nette : Les forces  $F_1$  et  $F_2$  sont des vecteurs et possèdent une amplitude et une direction. Lorsque  $F_1$  et  $F_2$  sont placées en angle l'un par rapport à l'autre, on crée un parallélogramme en dessinant les côtés adjacents à  $F_1$  et  $F_2$ , parallèles à  $F_2$  et  $F_1$  respectivement. La diagonale créée à partir du parallélogramme représente la force  $F_{net}$  (Fig 18).

Calcul de la somme de 2 vecteurs (Se référer au lien suivant pour des explications détaillées):  
<https://www.mathstopia.net/vectors/parallelogram-law-vector-addition>)

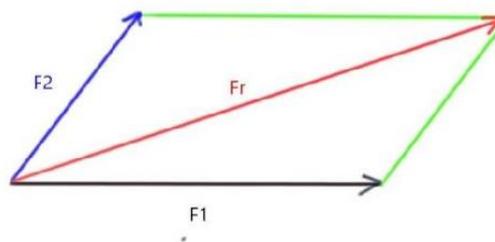


Figure 19: Calcul de la somme de deux vecteurs.

Pour calculer l'amplitude de la force résultante  $F_r$ , on utilise la formule  $F_r = F_1 + F_2$

On prolonge la ligne d'action de  $F_1$  pour créer un triangle rectangle OXR et ajouter les angles  $\alpha$  et  $\beta$ .

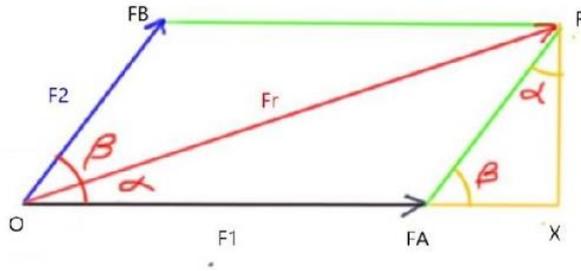


Figure 20: Prolongement du parallélogramme.

Calcul de l'amplitude de FR:

$$FR^2 = OX^2 + RX^2$$

$$OX = OFA + FAX \text{ ou}$$

$$FR^2 = (OFA + FAX)^2 + RX^2$$

On sait que Cosinus  $\beta$  ( $\cos\beta$ ) = côté adjacent à angle  $\beta$ /hypoténuse

On sait que Sinus  $\beta$  ( $\sin\beta$ ) =  $RX/F2$

Après développement,

$$FAX/F2 = \cos\beta \text{ ou } FAX = F2\cos\beta \text{ et } \sin\beta = RX/F2 \text{ ou } RX = F2\sin\beta$$

$$FR^2 = (F1 + F2\cos\beta)^2 + F2\sin\beta^2$$

$$\text{Après substitution des valeurs: } FR = \sqrt{F1^2 + 2F1F2\cos\beta + F2\cos\beta^2 + F2\sin\beta^2}$$

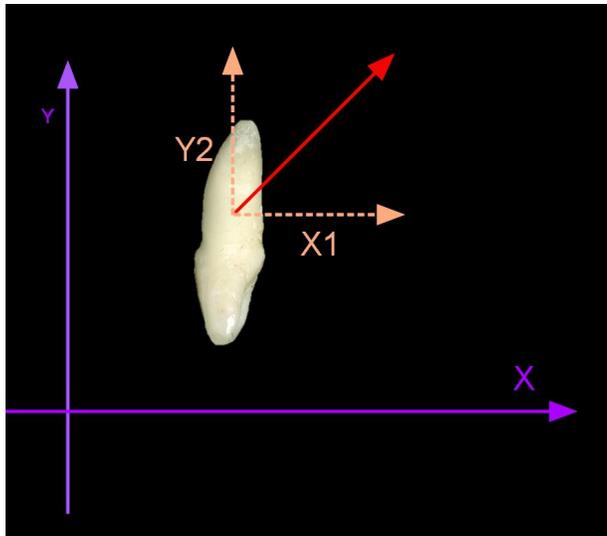


Figure 21: Force résultante (Force Nette) quand les forces appliquées sont à 90 degrés

Lorsque les forces sont placées à 90 degrés, l'équation se simplifie et devient :

$$FR = \sqrt{FX1^2 + FY2^2}$$

## 6 CENTRE DE ROTATION:

---

Le centre de rotation est le point autour duquel un objet tourne. Le centre de rotation varie selon l'emplacement du centre de résistance et la force appliquée sur l'objet. Une rotation pure se produit lorsque le centre de rotation est situé au centre de résistance. Une translation pure se produit lorsque le centre de rotation est situé à l'infini du centre de résistance.

Le centre de rotation est le point autour duquel l'objet pivote. Cela varie en fonction de l'emplacement du centre de résistance et de la force appliquée à l'objet. La rotation pure se produit lorsque le centre de rotation est au centre de la résistance. La translation pure se produit lorsque le centre de rotation est à une distance infinie du centre de résistance.

Pour identifier le centre de rotation autour duquel la rotation de la dent se produit, (Fig 22), choisissez deux points quelconques sur la dent (ou l'objet) et tracez une ligne entre les positions avant et après la rotation de chaque point. Le point d'intersection entre les droites perpendiculaires est le centre de rotation.

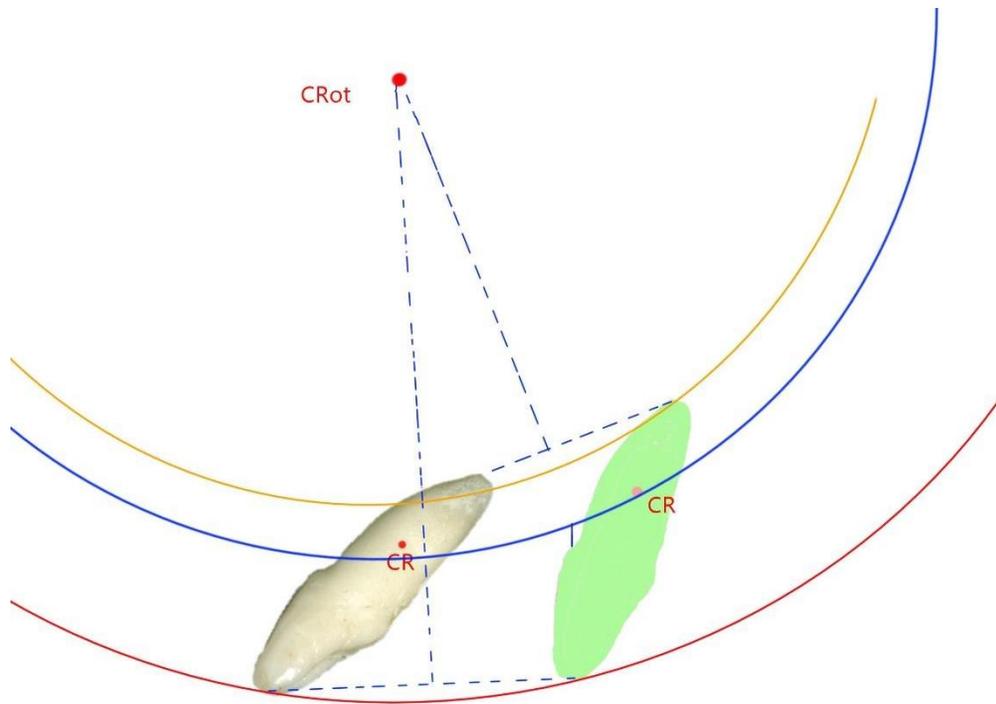


Figure 22: Méthode pour localiser le centre de rotation

### Diagrammes de corps libre

Les diagrammes de corps libre aident à prédire l'effet de différentes forces agissant sur un corps en même temps (force nette) ou à séparer une force en ses composantes.

Un exemple de diagramme de corps libre, avec  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_{net}$  (rappelez-vous la règle du parallélogramme) (Fig.23).

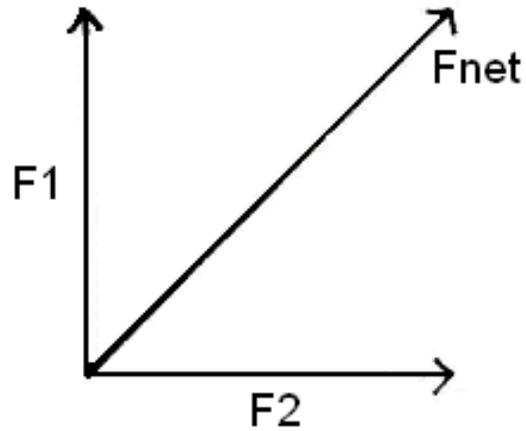


Figure 23: Diagramme de corps libre

Un exemple clinique de l'utilisation d'un diagramme de corps libre est l'arc d'intrusion et des élastiques.

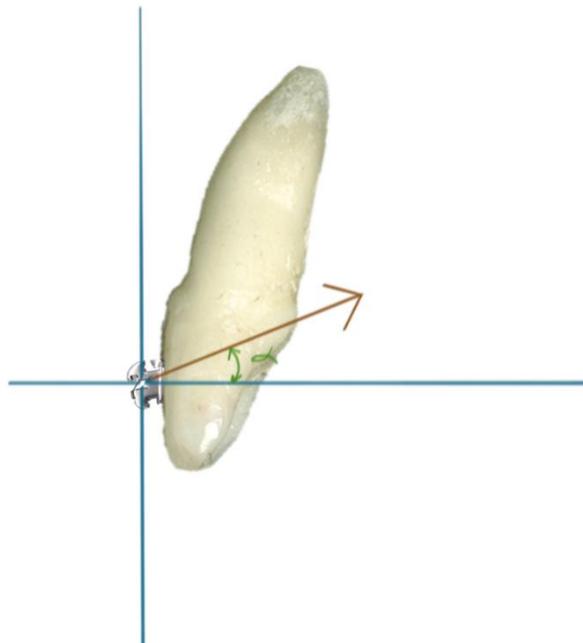


Figure 24: Force simple pour intruder et rétracter une incisive supérieure

Une force  $F$  est appliquée avec des composantes intrusives et rétrusives. Si on connaît l'ampleur de la force appliquée et son angulation, on peut calculer l'ampleur des forces intrusives et rétrusives par simple trigonométrie (Fig 24-25)

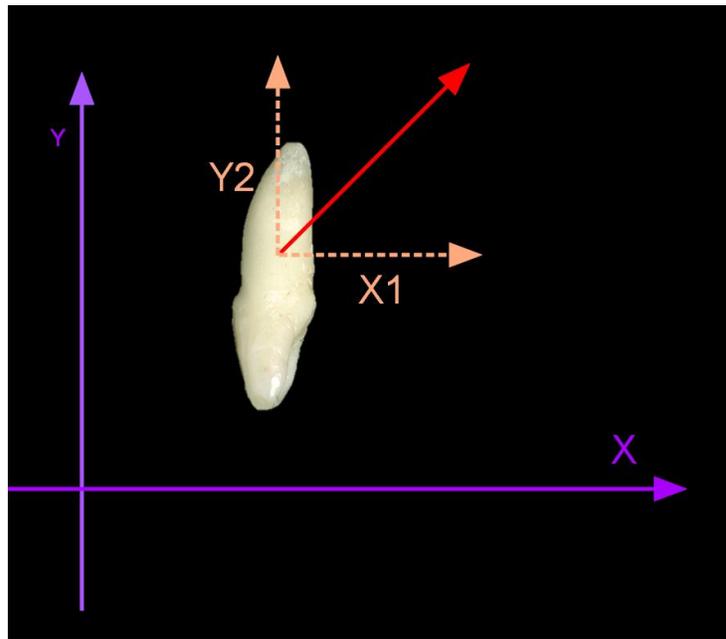
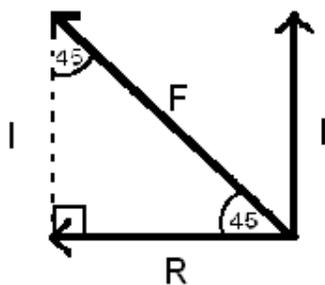


Figure 25: Diagramme de corps libre et forces générées par un appareil de traction extra-orale

Si  $F_{net} = 500g$ , on peut calculer la force I (force intrusive) et force R (force rétrusive) en utilisant la règle du triangle rectangle (Fig 26)



$$\sin 45 = \frac{I}{F}$$

$$\begin{aligned} I &= F \sin 45 \\ &= 500 \sin 45 \\ &= 353 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\cos 45 = \frac{R}{F}$$

$$\begin{aligned} R &= F \cos 45 \\ &= 500 \cos 45 \\ &= 353 \text{ g} \end{aligned}$$

Figure 26: Calcul des forces intrusives et rétrusives utilisant la règle du triangle rectangle

Ainsi, une force de 500g appliquée dans la direction de  $F_{nette}$  équivaut à une force de 353g dans la direction de I et 353g dans la direction de R lorsque ces forces sont appliquées simultanément au même point sur un objet.

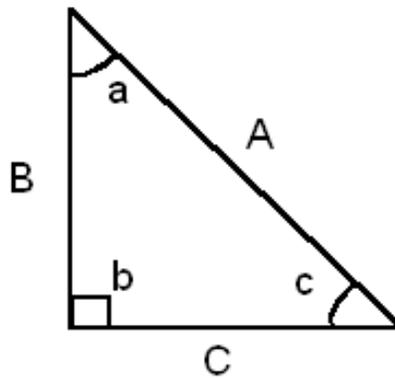


Figure 26: Calculs trigonométriques

## 7 MOUVEMENTS DENTAIRES

Les dents se déplacent dans les trois dimensions de l'espace. Il est important de connaître les différents types de mouvements possibles lors de la planification d'un traitement pour évaluer les mouvements dentaires souhaitables et indésirables.

### 7.1 TRANSLATION

Durant la translation, tous les points d'un corps se déplacent dans la même direction et avec la même amplitude (Fig. 28). Le centre de rotation est effectivement à une distance infinie de la dent puisqu'il n'y a pas de rotation.

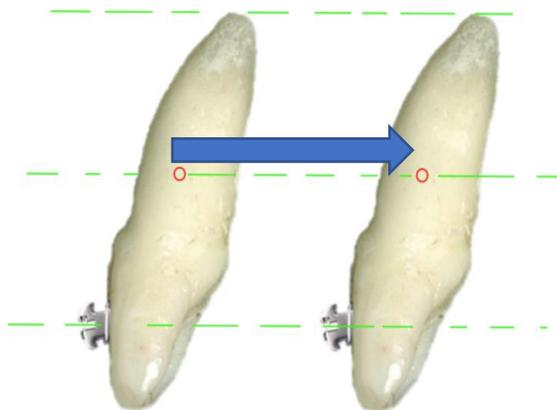


Figure 28 : Translation d'une incisive centrale

## 7.2 (PURE) ROTATION

Une rotation pure se produit lorsqu'un corps tourne autour du centre de résistance (CR) (c'est-à-dire lorsque le centre de rotation est au centre de résistance (Fig 29)).

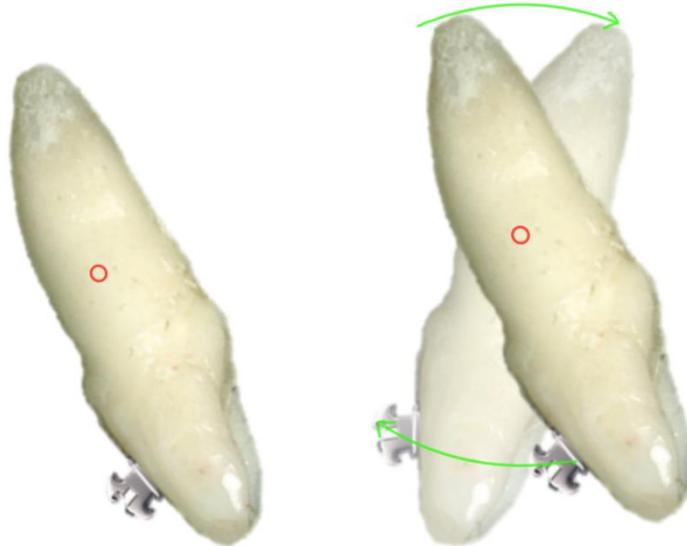


Figure 29 : Pure Rotation

## 7.3 BASCULE

Le mouvement de bascule dépend du point d'application de la force sur la dent.

### 7.3.1 **Rotation incontrôlée :**

Lorsqu'une force est appliquée sur la couronne, la couronne se déplace dans une direction tandis que la racine se déplace dans l'autre. Dans ce cas, le centre de rotation est proche ou apical du centre de résistance, de sorte que la dent tourne autour de CR (Fig 30).

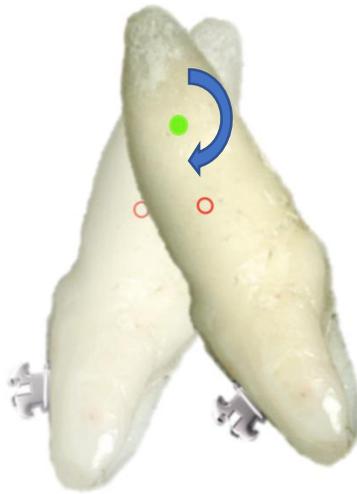


Figure 30: Bascule incontrôlée

### 7.3.2 Rotation contrôlée :

Le centre de rotation (Crot) est à l'apex de la dent. Ce mouvement implique un moment et une force. La dent tourne autour du Crot (Fig. 31).

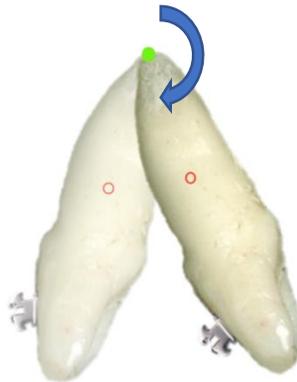


Figure31 : Bascule contrôlée

Par exemple, dans la correction d'une malocclusion de Classe II, Division I avec proclination antérieure maxillaire, l'utilisation d'une bascule incontrôlée pourrait entraîner la perforation de la plaque osseuse buccale, alors que la rotation contrôlée entraînera le mouvement de la couronne uniquement sans perforation de la plaque osseuse buccale par la racine.

### 7.3.3 Mouvement radiculaire

Le mouvement radiculaire se produit lorsque le centre de rotation (CR) est situé au bout incisif ou tout près. La rotation s'effectue autour de ce point (Fig 32). Ainsi, la couronne se déplace moins que la racine. Les mouvements radiculaires prennent plus de temps

que les mouvements de couronne en raison de la résorption osseuse nécessaire au mouvement.

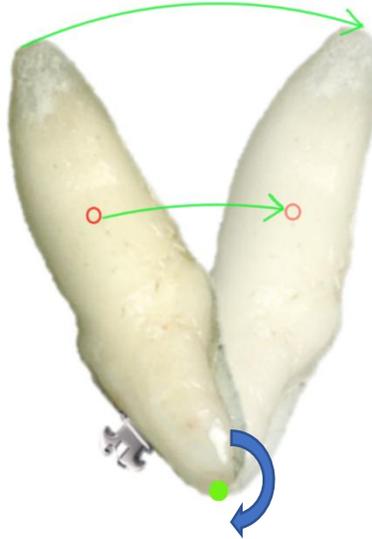


Figure 32: Mouvement radiculaire

#### 7.3.4 Intrusion/Extrusion

L'intrusion et l'extrusion impliquent un mouvement le long de l'axe long de la dent (Fig. 33, Fig. 34). Rappelons-nous que dans le mouvement de translation (fig.28), le centre de rotation est à l'infini (aucune rotation). En d'autres termes, la dent tourne autour d'un point qui est à une distance infinie de telle sorte qu'on ne voit aucune rotation, uniquement un mouvement de translation ou d'intrusion / extrusion.

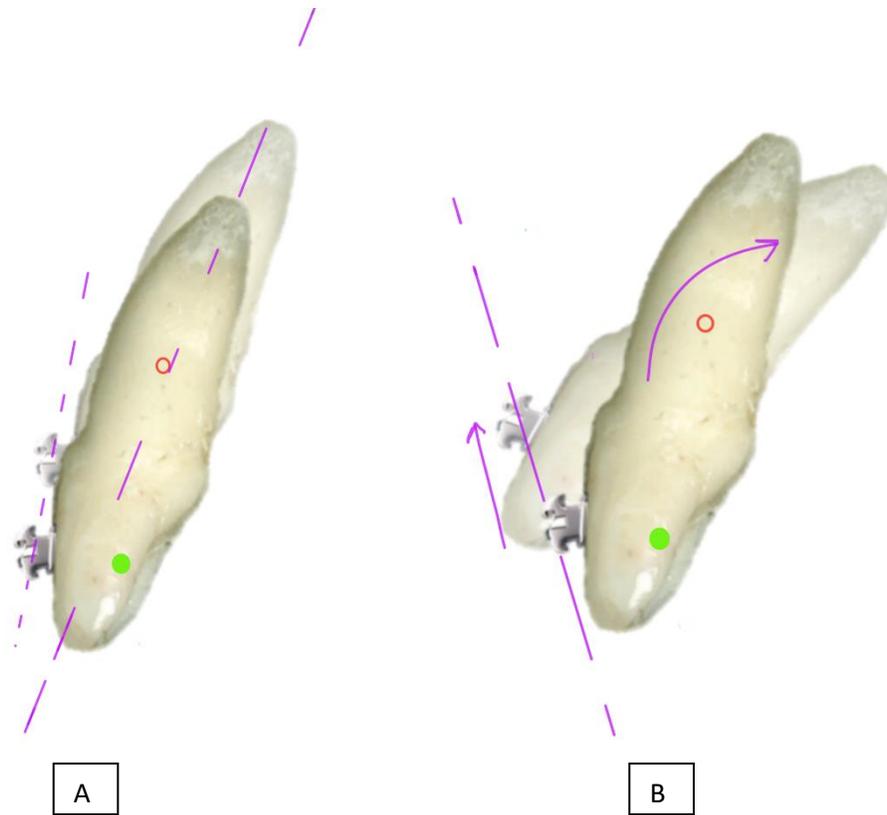


Figure 33: A. Intrusion d'une incisive. B. Intrusion relative d'une incisive

**Intrusion:** Dans la figure 33A, (dans cet exemple, les effets indésirables d'intrusion ne sont pas pris en compte: tandis qu'une dent est intrudée, les dents adjacentes sont extrudées à moins qu'elles ne soient fixées. Reportez-vous à la discussion sur l'ancrage). L'intrusion relative est le résultat de la proclination et de l'intrusion (Fig 33B)

**Extrusion:** dans l'exemple suivant (Fig. 34), les effets indésirables de l'extrusion ne sont pas pris en compte: alors qu'une dent est extrudée, les dents adjacentes sont légèrement intrudées à moins qu'elles ne soient fixées. (Référez-vous à la discussion sur l'ancrage)

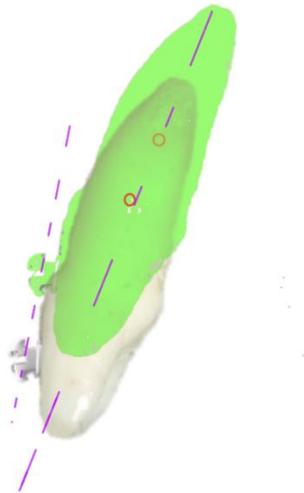


Figure 34: Extrusion d'une incisive

## 8 SYSTÈMES DE FORCE

---

Pour comprendre comment créer les mouvements dentaires voulus, il faut examiner les systèmes de force. Les systèmes de force sont constitués d'un moment et d'une force et leur ratio détermine le type de mouvement produit. Cette section couvrira le moment, le couple de force, le ratio moment / force et les mouvements générés lorsqu'on modifie les forces et les systèmes.

### 8.1 MOMENT

Le moment est la tendance de la force exercée sur un corps à engendrer une rotation. Pour calculer le moment d'une force, multipliez l'amplitude de la force par sa distance perpendiculaire au centre de résistance autour duquel le moment se produit (Fig 35).

$$M = F \times d$$

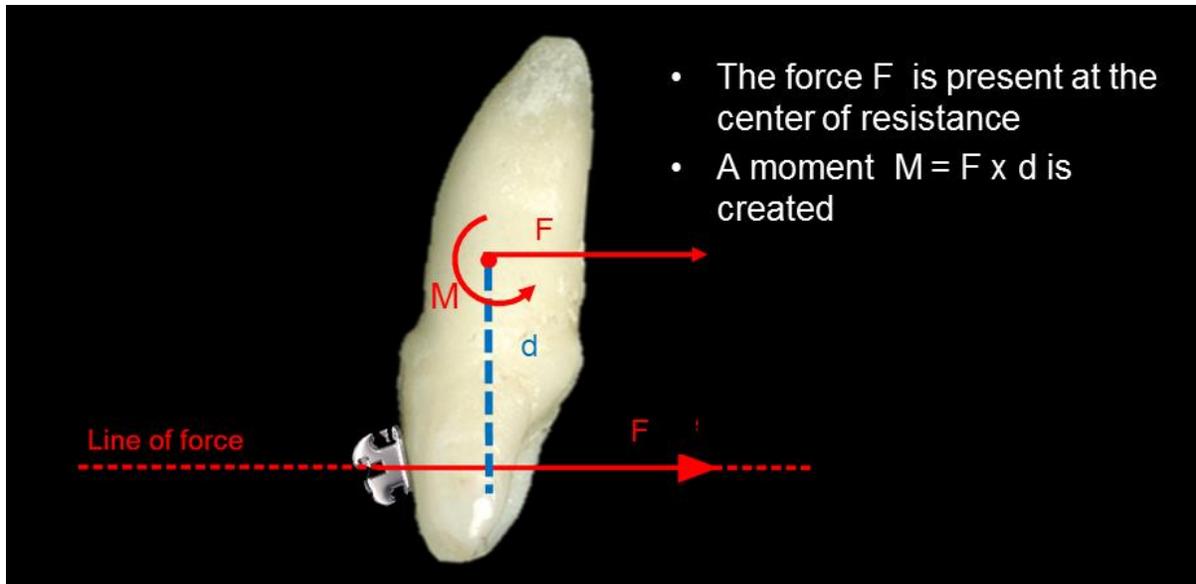


Figure 35: Moment produit par une force appliquée à une distance du centre de résistance

## 8.2 COUPLE DE FORCE

Un couple est un moment pur et se produit lorsque deux forces ( $F_1$ ,  $F_2$  égales et opposées) sont séparées par une distance perpendiculaire. Pour calculer le moment du couple de forces, considérez les forces séparément.

Exemple :  $F_1$  et  $F_2$  ne produisent pas d'effets de translation car ils sont de directions égales et opposées, et donc s'annulent. Les moments des forces ne s'annulent pas car ils produisent une rotation dans le même sens (imaginez la rotation autour du centre de résistance lorsque les forces sont appliquées à partir de  $F_1$  et  $F_2$ ). Pour trouver le moment total de ce système, additionnez les moments ; ceci est un couple de forces. Le couple de force est indépendant du point d'application des forces sur le corps (ou la dent). Prenons l'exemple suivant du couple de forces (Fig. 36)

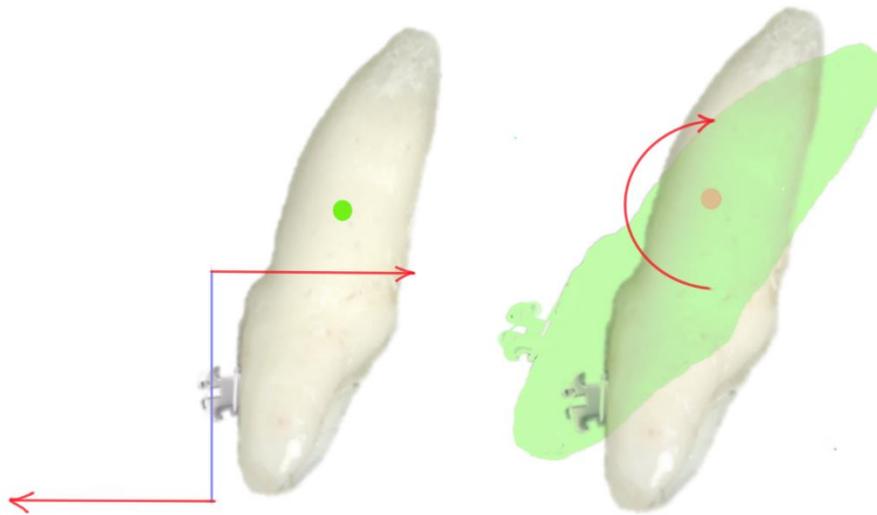


Figure 36: Couple de forces: exemple 1

Puisque le couple de forces est indépendant du point d'application des forces sur le corps, le même résultat que l'exemple ci-dessus peut être obtenu en plaçant les forces F1 et F2 dans un nouvel emplacement (les nouveaux emplacements dans l'exemple suivant sont plus biologiquement et cliniquement semblables).

**En conclusion, peu importe où un couple agit sur une dent, le moment net sur ce système sera égal à une force multipliée par la distance entre les forces.**

### 8.3 RATIO MOMENT / FORCE (M/F)

Le ratio moment / force combine les mouvements de translation et de rotation. Le ratio est déterminé par l'amplitude de la force multipliée par la distance perpendiculaire au centre de résistance d'une dent ou d'un groupe de dents (Fig 37).

Les exemples suivants démontrent la bascule contrôlée d'une dent en utilisant des mouvements combinés de translation et de rotation (force simple et moment) (Fig 38, Fig 39).

# Moment to force ratio

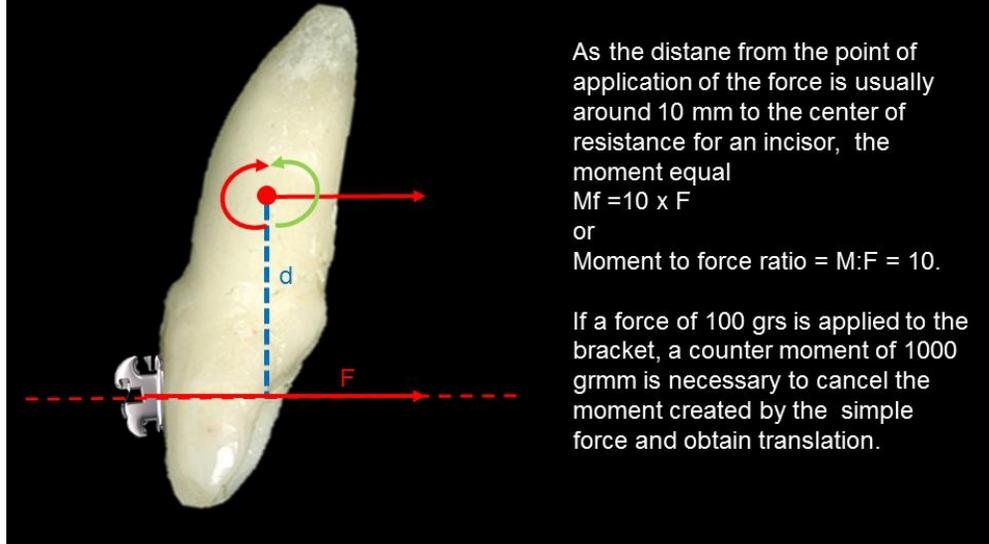


Figure 37: Ratio moment/force pour une translation

Controlled Tipping:  
If we want the following movement:

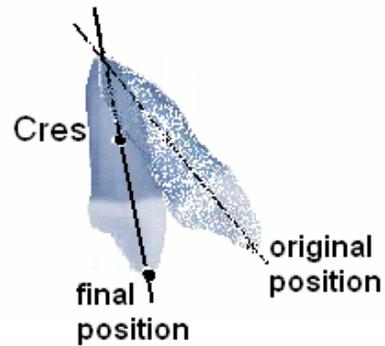
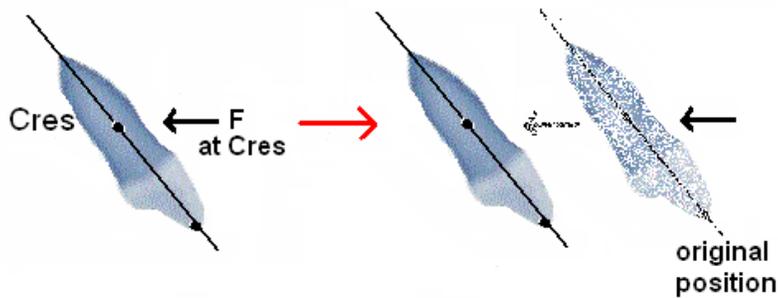


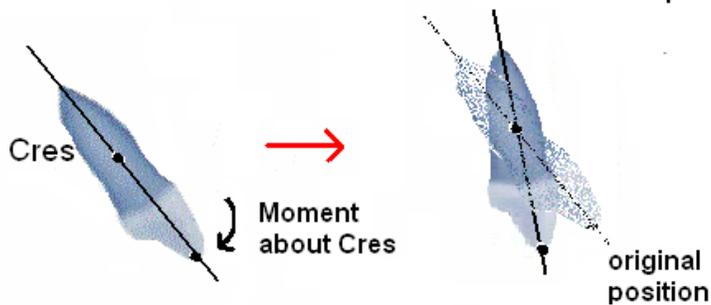
Figure 38: Mouvement désiré

Break up the movement into its translation and rotation component parts

Translation:



Rotation:



Result:

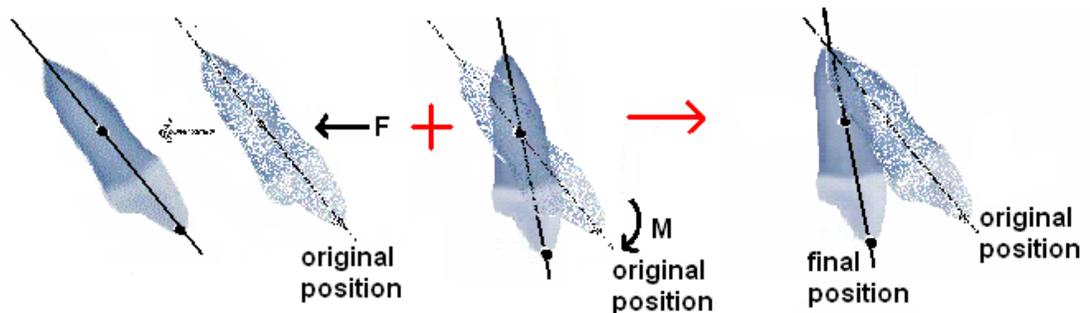


Figure 39: Combinaison de translation et de rotation pour obtenir une bascule contrôlée

En modifiant le rapport  $M / F$ , différents centres de rotation peuvent être produits. La figure 40 montre les effets de la modification du rapport  $M / F$  sur la bascule contrôlée. Si le rapport  $M / F$  est diminué ( $M$  est constant ou diminué et  $F$  augmenté), alors on obtient davantage de translation car le centre de rotation se déplace vers l'apex de la dent (en d'autres termes, loin du centre de résistance, vers l'infini). Si le rapport  $M / F$  est augmenté ( $M$  est augmenté ou  $F$  est diminué), on aura plus de rotation puisque le centre de rotation se déplacera vers le centre de résistance (en d'autres termes, il se déplace plus incisif par rapport à sa position antérieure).

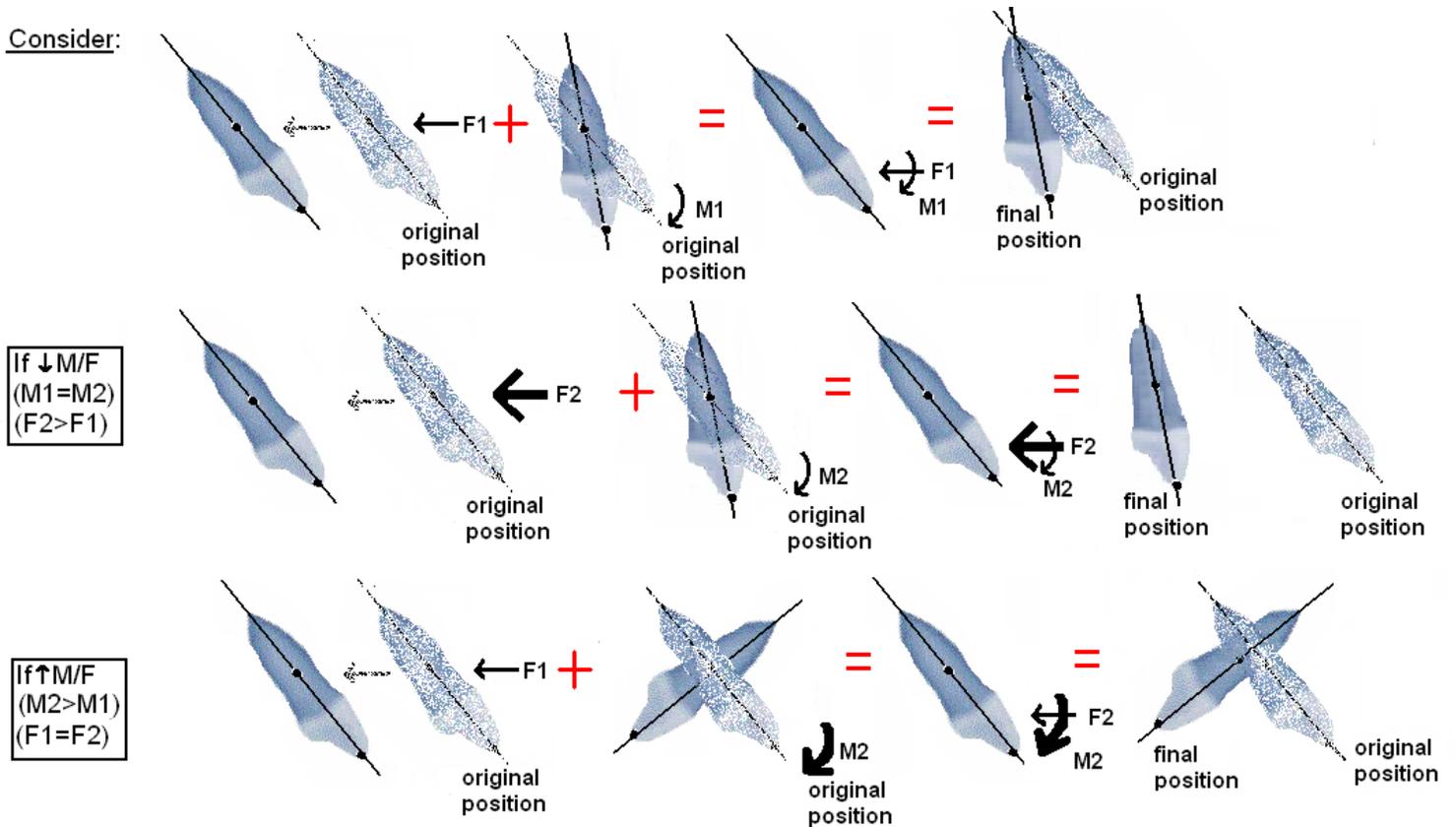


Figure 40: Effets des changements du ratio moment/force (M/F)

#### 8.4 MOUVEMENTS LORSQU'ON MODIFIE LES FORCES ET LES SYSTEMES

Nous pouvons appliquer les connaissances acquises des systèmes de force équivalents à un exemple réel tel que la rétraction des incisives. En utilisant une molaire comme ancrage, on ne peut simplement placer un fil droit entre l'incisive et la molaire et utiliser une boucle dans le fil avec un élastique pour rétracter l'incisive car ce système entraînera une bascule incontrôlée des deux dents (le Centre de rotation sera au Centre de résistance). (Fig 41)

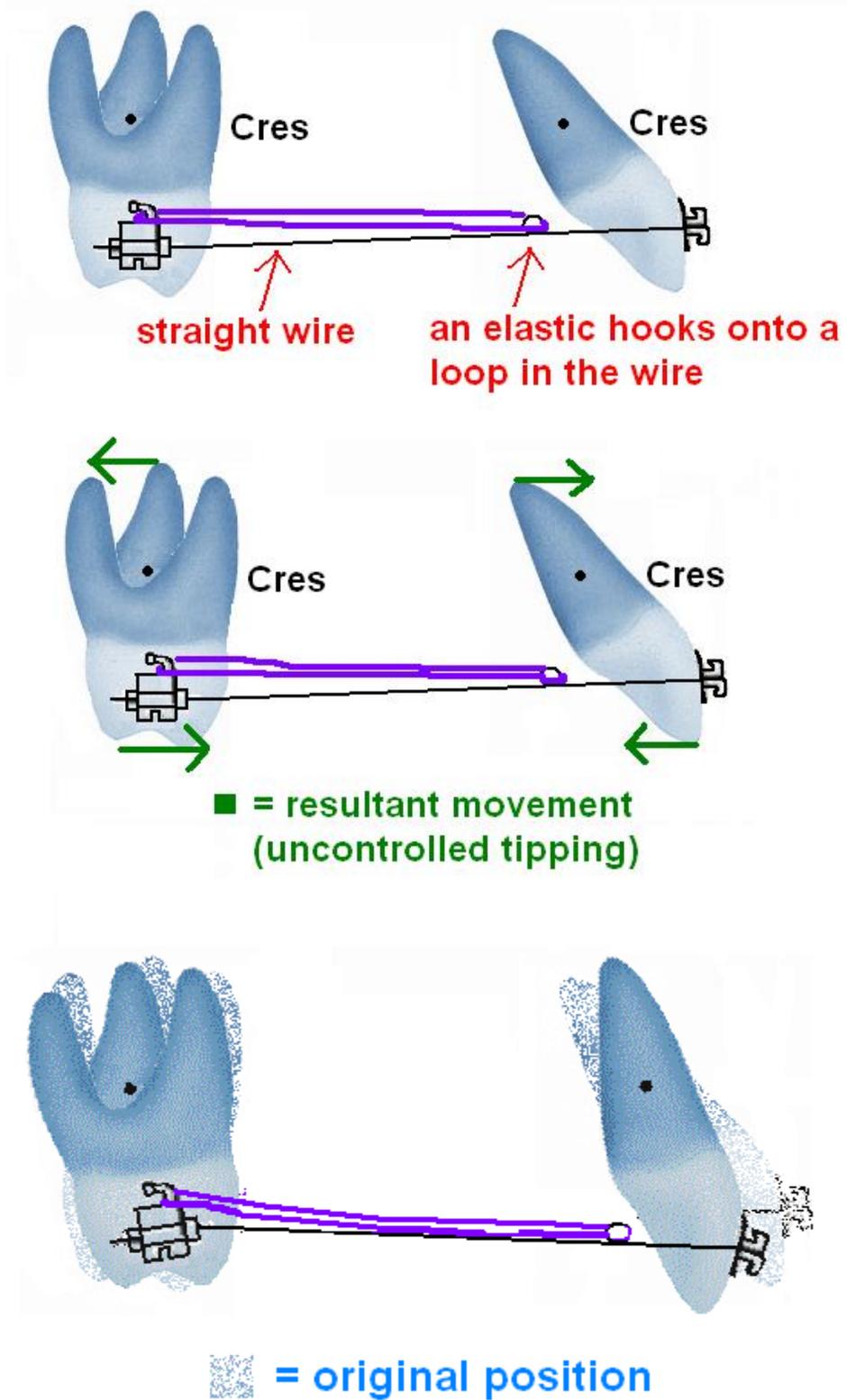


Figure 41: Rétraction d'une incisive utilisant un élastique sur une boucle dans le fil: engendre une bascule incontrôlée

Pour contrôler le mouvement, il faut ajouter un moment à la couronne pour contrer le moment créé par la force, pour produire un mouvement de translation aussi pur que possible (revoir les systèmes de force équivalents). On peut créer un moment à la couronne de la dent en pliant le fil à un endroit tel où la dent aura tendance à tourner (de manière contrôlée) lorsque le fil est en place. L'exemple suivant illustre ce concept (Fig 42).

In order to produce a moment as well as a force, a bend in the wire is necessary

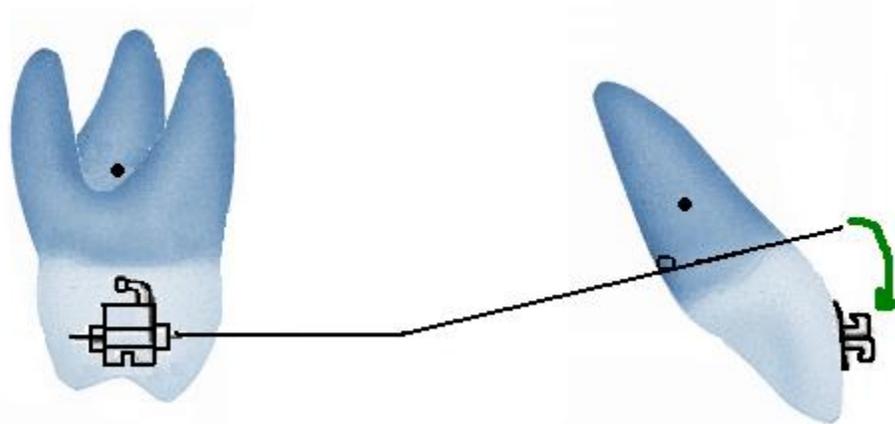


Figure 42: Production d'un moment avec un pli dans le fil et une force avec la boucle dans le fil

Pour que le fil s'insère dans la fente du boîtier sur l'incisive, le fil doit être légèrement forcé en place. Une fois en place avec l'élastique, il exerce les forces suivantes sur les deux dents en question ( $F_m$ ,  $M_m$  sont la force et le moment sur la molaire;  $F_i$ ,  $M_i$  sont la force et le moment sur l'incisive).

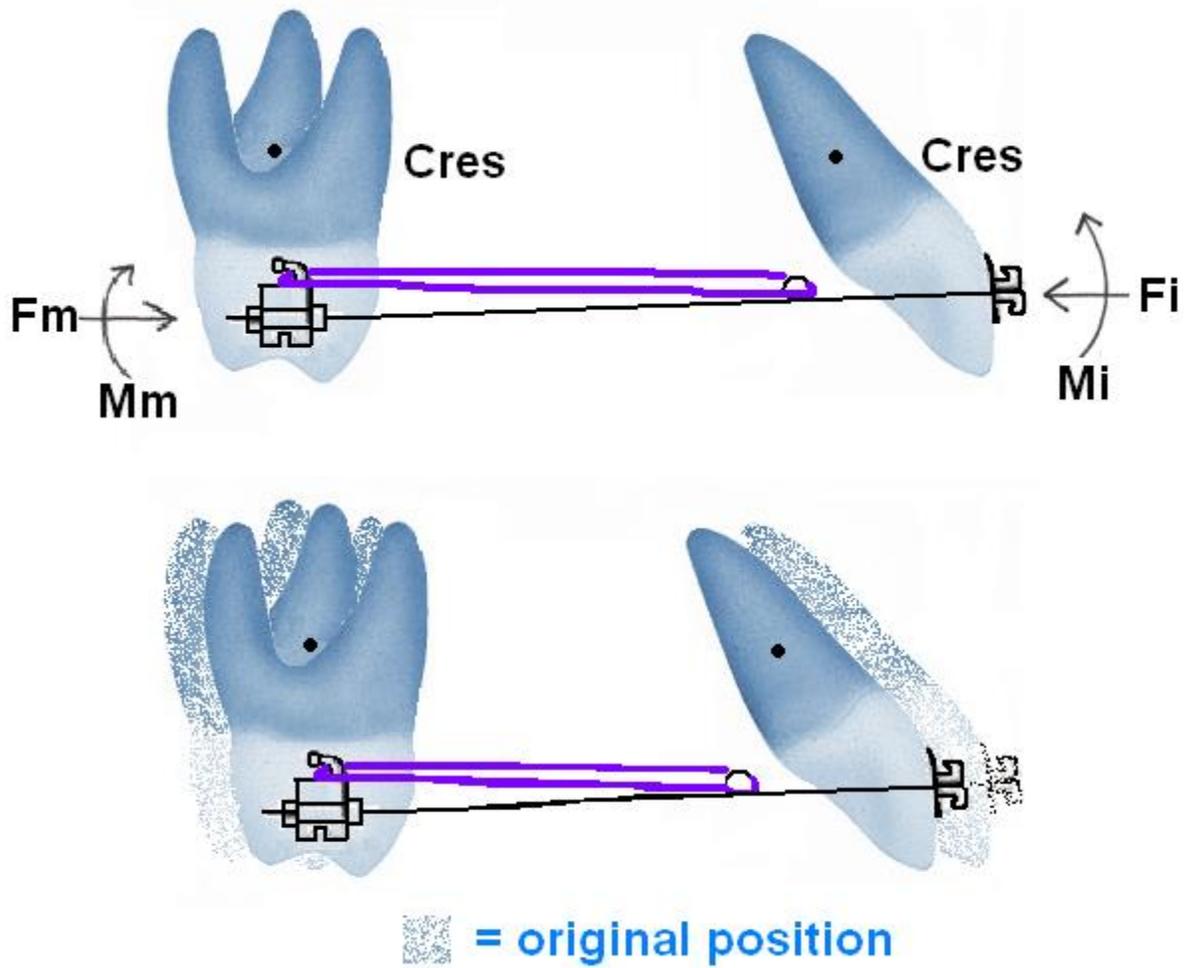


Figure 43: Mouvement généré par pli et boucle dans le fil: rétraction de l'incisive (bascule contrôlée et minimisée)

Cet exemple démontre qu'en ajustant le ratio  $M / F$ , nous pouvons produire l'effet de translation désiré (Fig 43). Ce ratio  $M / F$  peut être ajusté en fonction du résultat désiré (une certaine bascule peut être souhaitée). Le ratio  $H / F$  peut être ajusté en conséquence, et avec un contrôle des mouvements, l'objectif sera atteint.

Le ratio  $M / F$  n'est pas affecté uniquement par la présence d'un élastique et d'une boucle dans le fil. Le type d'élastique affectera l'ampleur de la force exercée sur le système. De plus, le type de fil (rond ou carré), ainsi que son diamètre influenceront le ratio  $M / F$ .

Si on utilise un fil rond plutôt qu'un fil carré, on aura une bascule incontrôlée, car la dent peut tourner autour du fil (le boîtier a une fente carrée tandis que le fil est rond) (Fig 44). Par contre, si un fil carré est utilisé, le fil remplira la fente du boîtier (carré dans un carré) (Fig 45). En conséquence, un moment sera créé lorsque la dent est rétractée qui va contrer le moment qui aurait engendré une bascule incontrôlée. De plus, la taille du fil affectera également le résultat. Un fil plus petit déformera davantage qu'un fil plus gros. Par conséquent, on préférera les fils plus gros pour les mouvements en masse des dents car ils déformeront moins et conserveront leur forme, guidant ainsi le mouvement.

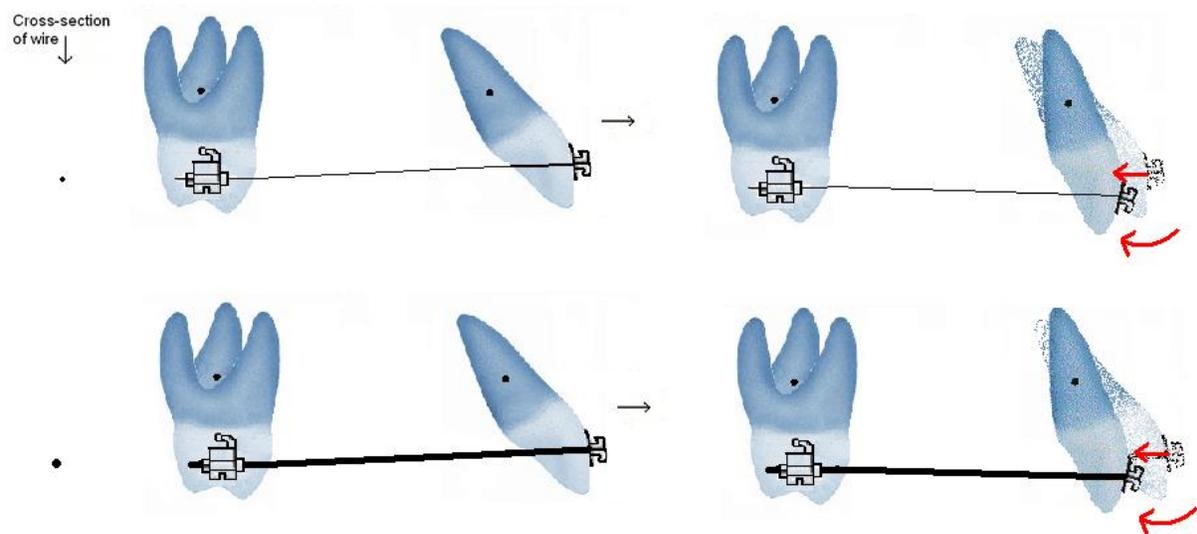


Figure 44: Mécanique de glissement pour rétraction de canine) avec un fil rond de 2 diamètres différents

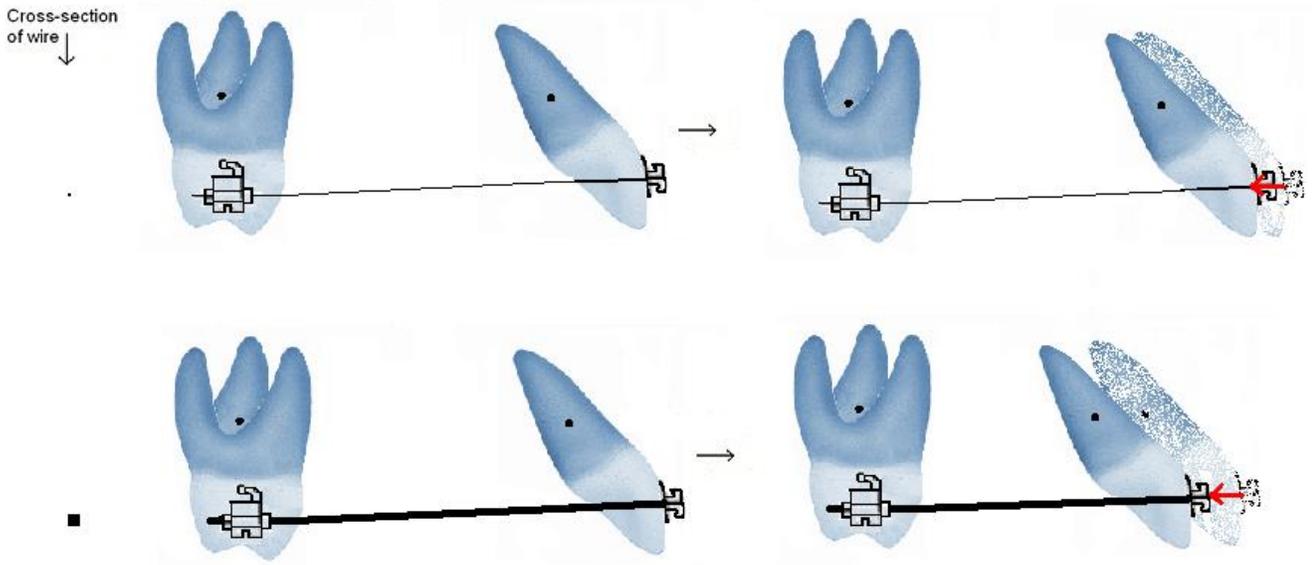
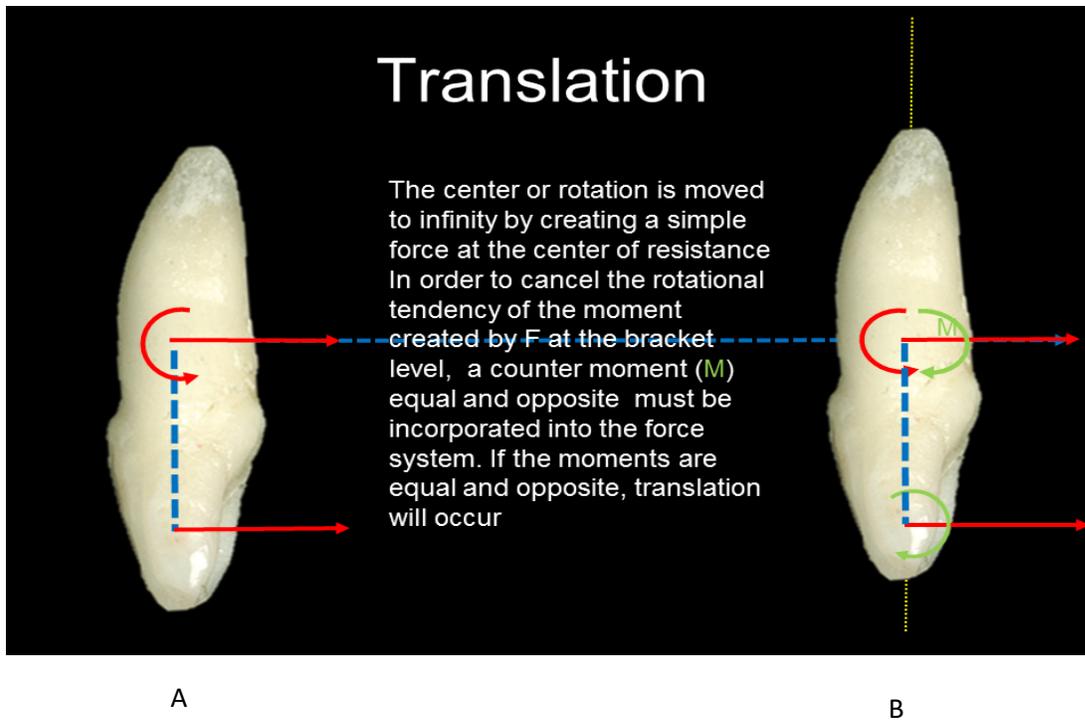


Figure 45: Mécanique de glissement (pour rétraction de canine) avec un fil carré de 2 diamètres différents

## 8.5 SYSTEMES DE FORCES ÉQUIVALENTS

Le problème avec les systèmes de force décrits ci-dessus est que les forces décrites sont souvent placées au centre de résistance. Il est impossible de placer un boîtier au centre de résistance car il se trouve sur la surface de la racine. La solution à ce problème est de recourir à des systèmes de force équivalents. Les systèmes de force équivalents existent lorsque deux systèmes de force sont égaux dans les trois dimensions ( $x, y, z$ ), ont des moments égaux et produisent le même effet sur l'objet (ou la dent). En orthodontie, les systèmes de force équivalents produisent le même effet que le système de force soit placé au centre de résistance ou au niveau de la couronne (boîtier / tube).



*Figure 46: Exemple de systèmes de force équivalents*

Quel type de système de force produira en B le même effet (translation) qu'en A, lorsque le système de force en B est appliqué à la couronne de la dent plutôt qu'au centre de résistance comme en A (Fig 46)? En utilisant les concepts discutés plus haut, ainsi que les ratio moment / force, on peut résoudre ce problème.

Ⓐ

$$F1 = -300g$$

$$\Sigma M = 0$$

Ⓑ

$$F2 = -300g$$

$$d = 10mm$$

$$M = F2 \times d = -3000g \text{ mm}$$

(this is the moment produced by the force F2 on the crown of the tooth)

F2 seul produirait une bascule incontrôlée de la dent car il y a un moment sur la dent, et la dent tourne autour du centre de résistance (Crot = Cres). Par conséquent, pour produire un

mouvement de translation dans le système B qui soit équivalent au système A, il faut un moment à la couronne est égal et dans la direction opposée au moment de F2 seul, de sorte que le moment net sur le système B soit nul (comme dans Système A). Par conséquent, le moment est  $M = + 3000 \text{ g mm}$ .

F2 alone would produce uncontrolled tipping of the tooth since there is a moment on the tooth, and the tooth is rotating around the centre of resistance (Crot = Cres). Therefore, to produce a translation movement in System B that is equivalent to System A, a moment at the crown is required that is in the opposite direction to the moment from F2 alone, so that the net moment on System B is zero (as in System A). Hence, the moment is  $M = +3000\text{g mm}$ .

Example: Consider the equivalent force system required for root movement (Fig 47).

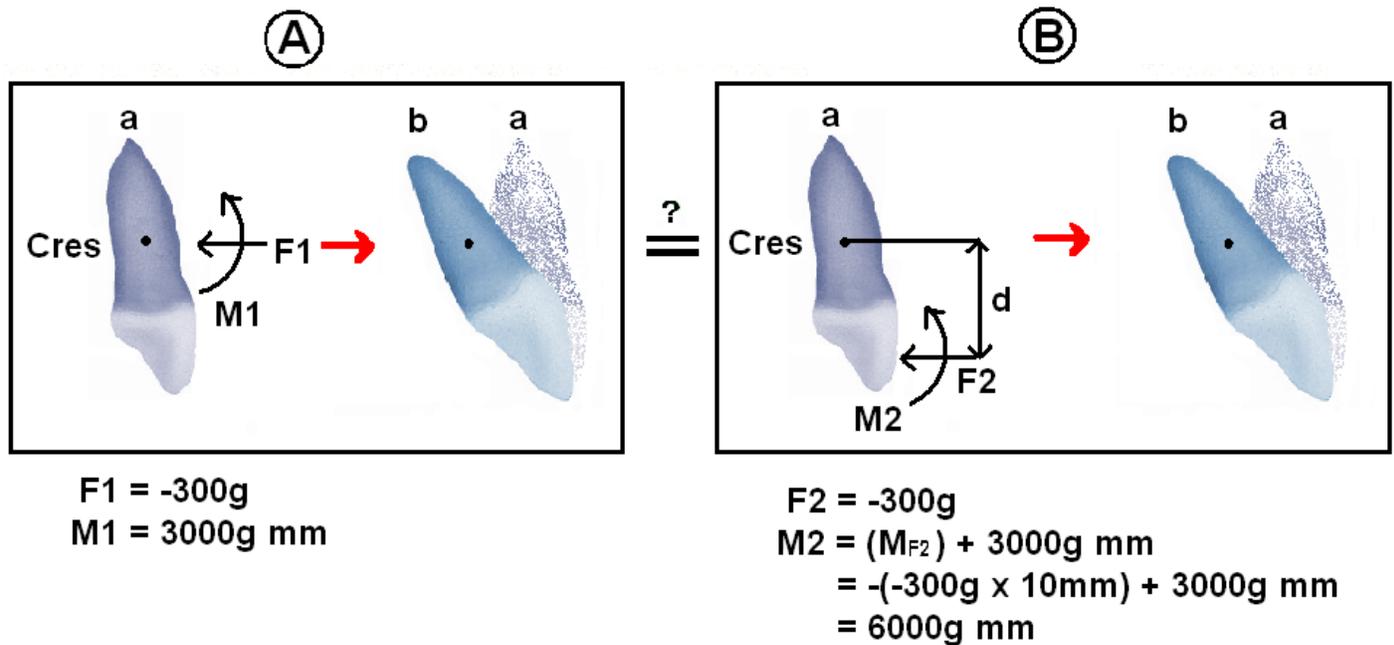


Figure 47 : Calculs requis pour déterminer les systèmes de force équivalents d'un mouvement de la racine

Dans cet exemple, le système A a une force et un moment agissant au centre de résistance pour produire le mouvement de racine souhaité. Dans le système B, il existe un moment associé à la force F2 (puisque F2 est appliqué à la couronne et non au centre de résistance), qui doit être contré pour contrôler le centre de rotation. Si davantage de bascule contrôlée de la dent est requis, on ajoute un moment supplémentaire sur la dent afin d'obtenir un résultat équivalent au système A dans le système B.

Quelques conseils pour contrôler le mouvement:

- \* **Il vaut mieux changer le moment plutôt que la force.**
- a) Pour une bascule contrôlée, diminuez le moment (diminuez M/F)
- b) Pour une [translation](#), modifiez le moment pour obtenir un système de force équivalent
- c) Retenez la couronne lors des mouvements de racine (augmentez le moment)
- d) La translation ne se produira pas en augmentant simplement la force sur l'objet.

Le ratio M / F au centre de résistance détermine l'effet sur le PDL. Dans la zone de PDL sous tension (en direction opposée au mouvement dentaire), l'os est déposé et dans la zone de PDL comprimé (vers la direction du mouvement dentaire), l'os est résorbé.

N'oubliez pas que l'amplitude du ratio M / F dépendra de la longueur de la racine / de la topographie osseuse (car la distance entre le boîtier et le centre de résistance peut changer). Par exemple, des dents plus courtes nécessitent un ratio M / F inférieur pour la translation par rapport aux dents plus longues.

## 9 ANCRAGE

---

L'ancrage en orthodontie est un concept important puisqu'il fournit une résistance aux mouvements dentaires indésirables. La troisième loi de Newton est essentielle à la discussion sur l'ancrage. Rappelez-vous que chaque action a une réaction égale et opposée. Par conséquent, le système de forces utilisé pour déplacer les dents aura une réaction égale et opposée sur le système d'ancrage. L'ancrage peut être intra-arcade, inter-arcade ou extra-oral, chacun offrant des niveaux de stabilité ou de résistance différents aux mouvements indésirables. Par exemple, les dents, le palais, la neuromusculature, les implants et les structures extra-orales peuvent servir d'ancrage.

Le montant d'ancrage requis dépend du plan de traitement. Par exemple, pour fermer un espace d'extraction, il existe essentiellement trois options; rétracter uniquement le segment antérieur (les dents postérieures sont ancrées en place), rétracter les dents antérieures et avancer les dents postérieures ou avancer uniquement les dents postérieures.

Un ancrage maximal peut être obtenu grâce aux implants (micro, mini, palatin) et aux appareils extra oraux (appareil de traction extra-orale). L'ancrage maximal se produit lorsque l'unité d'ancrage ne bouge pas pendant que les dents ou le groupe de dents sont déplacés. Il est difficile à obtenir uniquement avec des appareils intra-oraux (sans implants) car une réponse dentoalvéolaire affectant les unités d'ancrage est toujours présente. Un exemple d'appareil intra-oral qui fournit beaucoup d'ancrage (mais pas autant que d'autres configurations d'ancrage maximal) est l'appareil Herbst inter-arc.

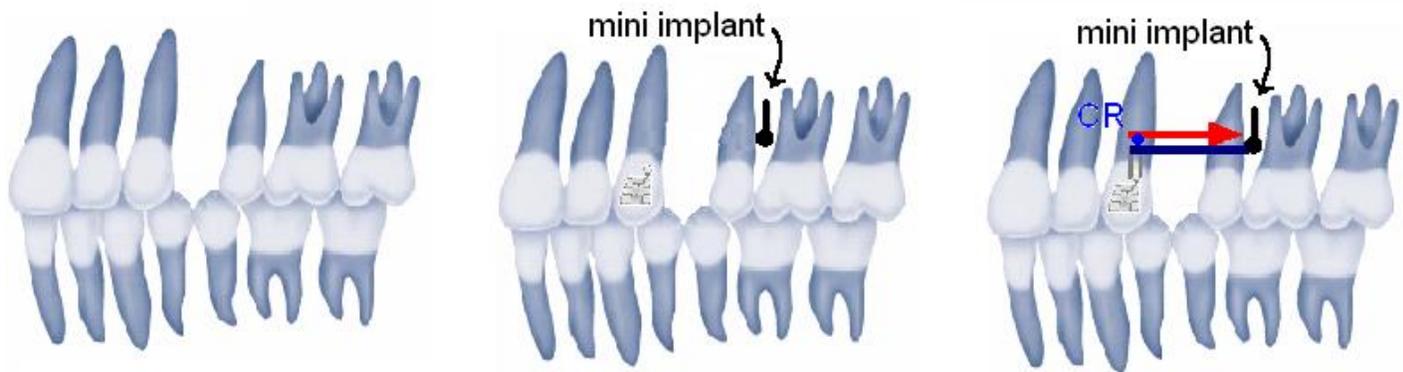


Figure 48: Utilisation de micro implant pour rétracter la canine

L'utilisation de micro-implants est de plus en plus populaire en orthodontie. L'exemple suivant montre comment une canine peut être distalisée en bloc à l'aide d'un micro-implant (Fig 48).

Dans ce cas, la rétraction en bloc se produit parce que la force est plus proche du centre de résistance. Notez qu'avec les implants (en particulier ceux sur la surface buccale de l'os alvéolaire), il y a un mouvement indésirable dans un autre plan (vers le buccal). Cela peut être minimisé par le type de fil utilisé dans le système (voir la discussion sur les fils).

Un ancrage modéré se produit lorsque l'unité d'ancrage peut être déplacée, mais moins que les dents qui sont déplacées. Un ancrage modéré est généralement obtenu avec un appareil intra oral fixe ou avec un groupe de dents.

On peut également utiliser une combinaison d'ancrage maximal et modéré. Par exemple, dans un cas d'extraction de deuxième prémolaires, où l'on cherche à distaliser la première prémolaire, mais où on veut éviter la mésialisation de la première molaire, on peut ancrer la première molaire sur la seconde molaire. Si on essayait de rétracter tout le segment antérieur, un ancrage supplémentaire serait nécessaire et un appareil de traction extra-orale pourrait être ajouté. L'ancrage d'un système peut être accru en augmentant le nombre de dents attachées ensemble ou en ajoutant un ancrage extra-oral, en fonction des résultats souhaités.

Une situation qui n'a pas d'ancrage est le mouvement réciproque, telle la fermeture d'un diastème (Fig. 49).

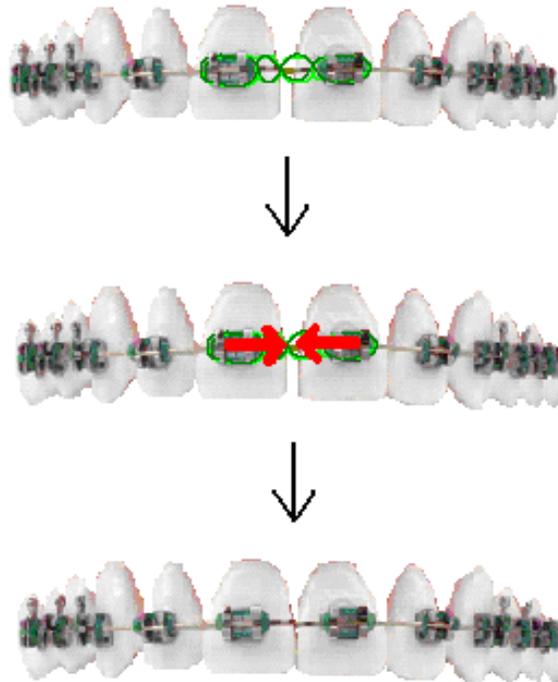


Figure 49: Reciprocal movement in the closure of a diastema

## 9.1 APPLICATIONS

### 9.1.1 Rétraction de la Canine

Pour fermer l'espace résiduel suivant l'extraction d'une prémolaire, la canine peut être rétractée dans un premier temps, suivie des incisives, ou alternativement, les six dents antérieures peuvent être rétractées en masse. Pour démontrer la biomécanique de la rétraction, cet exemple utilisera la rétraction d'une canine. La dent est soumise à une force d'entraînement distale, appliquée le long du fil guidant. Puisque la force est occlusale au centre de résistance, il y a un mouvement de bascule de la dent. Ce mouvement de bascule est annulé par un couple de forces créé par le boîtier et le fil, ce qui entraîne peu de changement dans l'angulation de l'axe long de la dent. Ce contre-couple dépend bien entendu de la taille et de la forme de la coupe transversale du fil. Le fil doit remplir la fente du boîtier pour que le contre-couple s'exprime. La résultante est une rétraction de la canine toute droite dont la racine est parallèle aux racines des dents adjacentes.

### 9.1.2 Extrusion pour allongement de couronne clinique (ACC) et pose d'implant

Les applications cliniques de mouvements dentaires font partie de l'orthodontie et font également partie d'autres spécialités. Par exemple, si on souhaite augmenter la longueur de couronne clinique d'une dent dans une situation où une procédure parodontale n'est pas possible (par exemple dans la zone antérieure esthétiquement délicate), l'extrusion orthodontique peut être une option. L'extrusion orthodontique peut être rapide ou lente, selon les objectifs du traitement et selon la mécanique (forces) de l'appareil orthodontique utilisé. Par exemple, l'extrusion orthodontique peut être utilisée pour préparer le site pour un implant.

## 10 SUGGESTION DE LECTURES

---

- Andrews, L. F. (1979). "The straight-wire appliance." British Journal of Orthodontics **6**(3): 125-143.
- Antoszewska, J. and N. Küçükkeles (2011). Biomechanics of Tooth-Movement: Current Look at Orthodontic Fundamental, INTECH Open Access Publisher.
- Barlow, M. and K. Kula (2008). "Factors influencing efficiency of sliding mechanics to close extraction space: a systematic review." Orthodontics & craniofacial research **11**(2): 65-73.
- Beertsen, W., C. A. McCulloch and J. Sodek (1997). "The periodontal ligament: a unique, multifunctional connective tissue." Periodontology 2000 **13**(1): 20-40.
- Begg, P. R. (1954). "Stone Age man's dentition: with reference to anatomically correct occlusion, the etiology of malocclusion, and a technique for its treatment." American Journal of Orthodontics **40**(4): 298-312.
- Bridges, T., G. King and A. Mohammed (1988). "The effect of age on tooth movement and mineral density in the alveolar tissues of the rat." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **93**(3): 245-250.
- Brudvik, P. and P. Rygh (1993). "The initial phase of orthodontic root resorption incident to local compression of the periodontal ligament." The European Journal of Orthodontics **15**(4): 249-263.
- Burstone, C. J. (1962). "Rationale of the segmented arch." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **48**(11): 805-822.
- Burstone, C. J. (2011). "Application of bioengineering to clinical orthodontics." Orthodontics-E-Book: Current Principles and Techniques: 345.
- Burstone, C. J. and H. A. Koenig (1974). "Force systems from an ideal arch." American journal of orthodontics **65**(3): 270-289.
- Burstone, C. J. and H. A. Koenig (1988). "Creative wire bending—the force system from step and V bends." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **93**(1): 59-67.
- Burstone, C. J. and R. J. Pryputniewicz (1980). "Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces." American journal of orthodontics **77**(4): 396-409.
- Cahill, D. R. and S. C. Marks (1980). "Tooth eruption: evidence for the central role of the dental follicle." Journal of Oral Pathology & Medicine **9**(4): 189-200.
- Cai, Y., X. Yang, B. He and J. Yao (2015). "Finite element method analysis of the periodontal ligament in mandibular canine movement with transparent tooth correction treatment." BMC oral health **15**(1): 106.

Caputo, M., C. Di Luzio, A. Bellisario, F. Squillace and M. L. Favale (2017). "Evaluation Of The Effectiveness Of Clear Aligners Therapy In Orthodontic Tooth Movement."

Castroflorio, T., F. Garino, A. Lazzaro and C. Debernardi (2013). "Upper-incisor root control with Invisalign appliances." J Clin Orthod **47**(6): 346-351.

Chen, G., F. Teng and T.-M. Xu (2016). "Distalization of the maxillary and mandibular dentitions with miniscrew anchorage in a patient with moderate Class I bimaxillary dentoalveolar protrusion." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **149**(3): 401-410.

Choy, K., E.-K. Pae, K.-H. Kim, Y. C. Park and C. J. Burstone (2002). "Controlled space closure with a statically determinate retraction system." The Angle Orthodontist **72**(3): 191-198.

Cobo, J., A. Sicilia, J. Argüelles, D. Suárez and M. Vijande (1993). "Initial stress induced in periodontal tissue with diverse degrees of bone loss by an orthodontic force: tridimensional analysis by means of the finite element method." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **104**(5): 448-454.

Cope, J. (2011). "An interview with Jason Cope." Dental Press Journal of Orthodontics **16**(2): 36-46.

Epstein, M. B. (2002). Benefits and rationale of differential bracket slot sizes: the use of 0.018-inch and 0.022-inch slot sizes within a single bracket system.

Fiorelli, G., B. Melsen and C. Modica (2001). "Differentiated orthodontic mechanics for dental midline correction." Journal of clinical orthodontics: JCO **35**(4): 239.

Garino, F., T. Castroflorio, S. Daher, S. Ravera, G. Rossini, G. Cugliari and A. Deregibus (2016). "Effectiveness of composite attachments in controlling upper-molar movement with aligners." J Clin Orthod **50**(6): 341-347.

Gebeck, T. R. and L. L. Merrifield (1995). "Orthodontic diagnosis and treatment analysis—concepts and values. Part I." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **107**(4): 434-443.

Gebeck, T. R. and L. L. Merrifield (1995). "Orthodontic diagnosis and treatment analysis—concepts and values: part II." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **107**(5): 541-547.

Geramy, A., K. Tanne, M. Moradi, H. Golshahi and Y. Farajzadeh Jalali (2016). "Finite element analysis of the convergence of the centers of resistance and rotation in extreme moment-to-force ratios." Int Orthod **14**(2): 161-170.

Geron, S., R. Romano and T. Brosh (2004). "Vertical forces in labial and lingual orthodontics applied on maxillary incisors—a theoretical approach." The Angle Orthodontist **74**(2): 195-201.

Giancotti, A. and A. A. Gianelly (2001). "Three-Dimensional Control in Extraction Cases Using a Bidimensional Approach." World Journal of Orthodontics **2**(2).

Giancotti, A., P. Mozzicato and M. Greco (2012). "En masse retraction of the anterior teeth using a modified bidimensional technique." Journal of Clinical Orthodontics **46**(5): 267.

Jacobs, R. and D. v. Steenberghe (1994). "Role of periodontal ligament receptors in the tactile function of teeth: a review." Journal of periodontal research **29**(3): 153-167.

Kim, S.-J., J.-W. Kim, T.-H. Choi and K.-J. Lee (2014). "Combined use of miniscrews and continuous arch for intrusive root movement of incisors in Class II division 2 with gummy smile." The Angle Orthodontist **84**(5): 910-918.

Koenig, H. A. and C. J. Burstone (1989). "Force systems from an ideal arch—large deflection considerations." The Angle Orthodontist **59**(1): 11-16.

Kojima, Y. and H. Fukui (2014). "A finite element simulation of initial movement, orthodontic movement, and the centre of resistance of the maxillary teeth connected with an archwire." European Journal of Orthodontics **36**(3): 255-261.

Krishnan, V. and Z. e. Davidovitch (2006). "Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **129**(4): 469. e461-469. e432.

Kurol, J. and P. Owman-Moll (1998). "Hyalinization and root resorption during early orthodontic tooth movement in adolescents." The Angle orthodontist **68**(2): 161-166.

Kusy, R. P. and J. C. Tulloch (1986). "Analysis of moment/force ratios in the mechanics of tooth movement." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **90**(2): 127-131.

Lavigne, G., J. Kim, C. Valiquette and J. Lund (1987). "Evidence that periodontal pressoreceptors provide positive feedback to jaw closing muscles during mastication." Journal of Neurophysiology **58**(2): 342-358.

Lekic, P. and C. McCulloch (1996). "Periodontal ligament cell populations: the central role of fibroblasts in creating a unique tissue." The Anatomical Record **245**(2): 327-341.

Lindauer, S. J. (2001). The basics of orthodontic mechanics. Seminars in Orthodontics, Elsevier.

McCulloch, C. A. and S. Bordin (1991). "Role of fibroblast subpopulations in periodontal physiology and pathology." Journal of periodontal research **26**(3): 144-154.

Mcculloch, C. A., P. Lekic and M. D. Mckee (2000). "Role of physical forces in regulating the form and function of the periodontal ligament." Periodontology 2000 **24**(1): 56-72.

Meling, T. R., J. Ødegaard and E. Ø. Meling (1997). "On mechanical properties of square and rectangular stainless steel wires tested in torsion." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **111**(3): 310-320.

Melsen, B. (1999). "Biological reaction of alveolar bone to orthodontic tooth movement." The Angle orthodontist **69**(2): 151-158.

**2.**