

## **Adaptation neuro-musculaire et squelettique aux dysfonctions de la sphère oro-faciale**

James A. Mc NAMARA

D.D.S. M.S. Ann Arbor, U.S.A.

On a difficilement expliqué, jusqu'à présent, les relations fondamentales entre la fonction musculaire et la croissance. Ce problème a été largement étudié par les biologistes, au niveau des réactions tissulaires, et par les cliniciens, qui ont évalué la réponse du patient aux traitements fonctionnels en orthopédie dento-faciale.

Cette étude a été réalisée dans le but de répondre aux questions suivantes, et à d'autres questions importantes, sur les relations muscles-squelette :

1° La dysfonction musculaire modifie-t-elle l'os directement ?

2° Les modifications squelettiques engendrent-elles une fonction musculaire anormale ?

3° Les modifications squelettiques et musculaires peuvent-elles se produire simultanément, mais indépendamment l'une de l'autre, sans relation de cause à effet ?

4° Si l'une de ces relations existe, le seuil de réaction est-il lié à l'âge ?

5° Si les modifications surviennent en fonction de la croissance ou de l'âge, les rapports fonctionnels et structuraux, une fois établis, peuvent-ils être modifiés ?

## I — MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'étude a porté sur soixante-quatre singes Rhésus (*Macaca Mulatta*) : vingt-huit d'entre eux ont été pris comme échantillon de base, et trente-six soumis en plus aux contrôles histologiques et électromyographiques ou l'un des deux.

Afin de déterminer les relations entre l'âge, le degré de maturation et les adaptations musculo-squelettiques, le groupe de vingt-huit animaux a été divisé en quatre groupes de sept individus selon les stades de développement dentaire.

— Le groupe infantile (Groupe I) était caractérisé par la présence de la denture temporaire complète au début de l'expérience. On connaissait les dates de naissance des sept animaux, et chaque animal avait entre cinq et huit mois.

— Le groupe juvénile (Groupe II) avait une denture temporaire complète, mais les premières molaires permanentes étaient en éruption ou en occlusion.

Les dates de naissance des animaux des groupes II, III et IV n'étaient pas connues. On s'est basé sur les tables d'éruption dentaire de HURME et VAN WAGENEN<sup>12</sup> pour déterminer les âges du groupe II qui étaient approximativement de dix-huit à vingt-quatre mois.

— Le groupe adolescent (Groupe III) qui avait entre quatre ans et quatre ans et demi, présentait une denture permanente complète, à l'exception des troisièmes molaires qui n'étaient pas encore évoluées, et des canines en éruption partielle.

— Les singes adultes (Groupe IV), âgés de six à sept ans, possédaient une denture permanente complète, y compris les troisièmes molaires.

Chaque groupe était composé de trois animaux expérimentaux et de quatre témoins.

— Les animaux expérimentaux étaient désignés par A, B, C.

— Les animaux D, E, F étaient soumis au contrôle céphalométrique.

— Les animaux G subissaient les deux contrôles : céphalométrique et histologique.

La durée de l'expérience a été de vingt-six semaines, divisées en deux périodes égales :

— Une première période au cours de laquelle on a observé et contrôlé, chez tous les singes, les données musculaires et squelettiques normales.

— Une deuxième période, au cours de laquelle on a comparé, dans chaque groupe, la croissance des trois animaux expérimentaux, et celle des quatre animaux témoins.

On a pu recueillir ainsi une double information : chaque animal expérimental était comparé à sa propre croissance avant l'expérimentation, et à la croissance de tout le groupe témoin avant et pendant l'expérimentation.

### 1° Procédés radiographiques

**Implants :** vingt-neuf implants de Tantale ont été placés sur chaque animal ; quatre implants extra-oraux, sur le côté droit de la mandibule, un dans la symphyse, un dans la branche montante, près du bord postérieur.

Cinq paires d'implants ont été insérés bilatéralement dans la région maxillaire, et cinq implants sur la ligne médiane de la base du crâne, par pénétration de la paroi pharyngée postérieure. Dix implants ont été insérés également dans d'autres parties du crâne, dont trois dans l'os frontal.

**Technique céphalométrique :** Des radiographies ont été prises au début de la période de contrôle, ainsi qu'au début et à la fin de l'expérimentation.

Des radiographies supplémentaires ont été prises à d'autres intervalles de temps, mais ne sont pas analysées dans cette étude.

A chaque fois, deux clichés ont été pris : l'un en occlusion, l'autre bouche ouverte, pour permettre une meilleure observation de l'articulation temporo-mandibulaire

### 2° Construction de l'appareillage

L'appareillage intrabuccal était en or et entraînait une propulsion mandibulaire de deux millimètres ; le déplacement vertical de la mandibule était également fixé à deux millimètres.

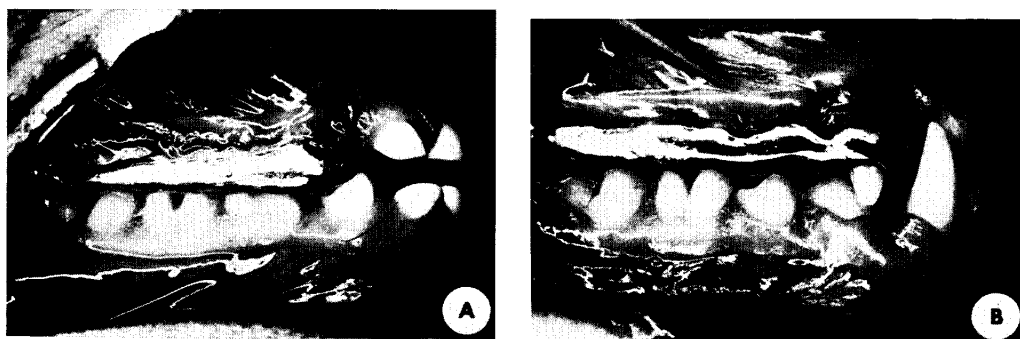


Figure 1.  
Appareillage : a) enfant ; b) adolescent.

Après montage des moulages de l'animal en articulateur, chaque appareil a été sculpté en cire avant d'être coulé, de façon à simuler un déplacement de l'occlusion des maxillaires vers l'avant. Les secteurs latéraux étaient recouverts par l'appareil et reliés par deux entretoises palatines (fig. 1).

Après scellement, l'appareil a été soigneusement équilibré pour entraîner un maximum de contact et d'équilibre occlusal en propulsion mandibulaire.

### 3° Procédés électromyographiques

Au cours de l'expérience, les fonctions neuro-musculaires ont été enregistrées par électromyographie.

Pendant la période de contrôle (les treize premières semaines) un enregistrement électromyographique a été effectué chaque mois afin d'établir le tracé musculaire typique de chaque animal, et de déterminer les limites de variation normale à l'intérieur de ces tracés. Au total cinq enregistrements ont été effectués dont l'un quatre jours avant la fixation de l'appareil en bouche et un autre au moment de la pose de l'appareil. Ce dernier était important car il permettait d'enregistrer les réactions immédiates à l'appareillage.

Un enregistrement a été effectué sans interruption pendant l'heure qui a suivi le scellement de l'appareil.

Huit autres enregistrements ont été faits à des intervalles successifs de six heures, un jour, quatre jours, deux semaines, quatre semaines, huit semaines et durant la douzième semaine.

Les singes ont été anesthésiés par injection intramusculaire de Ketamine HC1. De fines électrodes bipolaires ont été insérées dans la région temporale antérieure, temporale postérieure, dans les muscles orbiculaires et sus-hyoïdiens. Le groupe sus-hyoïdien (ventre antérieur du digastrique, mylohyoïdien et géniohyoïdien) a été considéré comme un seul muscle, étant donné la difficulté de le séparer anatomiquement pendant la pose des électrodes<sup>1</sup>.

Pour enregistrer les réactions du ptérygoïdien externe, deux micro-électrodes de vingt-cinq millimètres, en teflon, ont été introduites par la bouche à travers l'échancrure sigmoïde, dans le faisceau supérieur de ce muscle. Tous les enregistrements ont été obtenus sur la musculature du côté gauche.

Après vérification de la position des électrodes, le sujet est resté isolé dans sa chambre insonorisée durant

une demi-heure, pour lui permettre de reprendre totalement conscience. Après ce laps de temps, les enregistrements de la position de repos, des réflexes oraux et des différents mouvements mandibulaires ont été réalisés tandis que l'animal était encore isolé. La déglutition salivaire a été également enregistrée à ce moment là. Ensuite, l'expérimentateur est entré dans la chambre insonorisée et a provoqué la déglutition de l'eau en injectant 5 cc d'eau, à la seringue, dans la bouche de l'animal. La mastication a été provoquée en nourrissant l'animal de petits morceaux de sucre et de pomme.

L'activité posturale a été enregistrée lorsque tous les muscles, impliqués dans le mouvement mandibulaire, n'ont témoigné d'autre activité que celle qui est nécessaire pour maintenir la mandibule en position de repos, d'équilibre antigravifique. En effet, les forces de la pesanteur provoquent constamment des décharges motrices asynchrones dans les muscles abaisseurs et éleveurs, résultant d'un léger état de contraction ou de tension de ceux-ci<sup>1,18</sup>.

#### 4° Procédés histologiques

A la fin de la période expérimentale, on a retiré les appareils des douze animaux expérimentaux et pris une dernière série de clichés radiographiques et photographiques intra-oraux. Puis les animaux B, C et l'animal témoin G ont été sacrifiés.

L'articulation temporo-mandibulaire du côté droit et les tissus annexes ont été retirés et placés dans le formol. La partie tissulaire a été décalcifiée dans de l'acide formique, incluse dans de la «celloïdine» et ensuite sectionnée en coupes de dix à vingt microns d'épaisseur, parallèles au plan sagittal. Trois coupes sur dix ont été alternativement colorées à l'Hématoxyline-Eosine (méthode Masson et Mallory modifiée). Une quatrième coupe a été laissée non colorée.

## II — RÉSULTATS

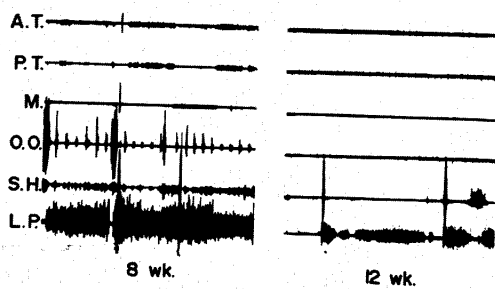
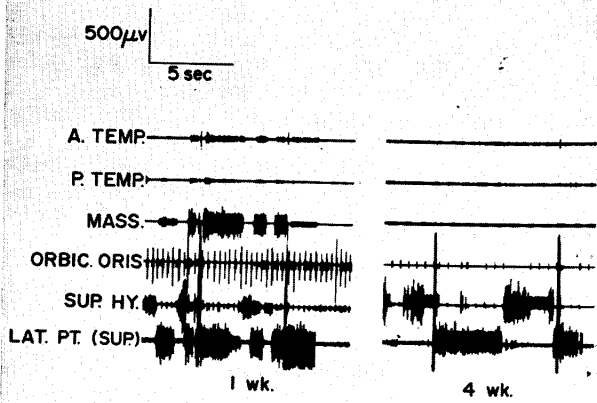
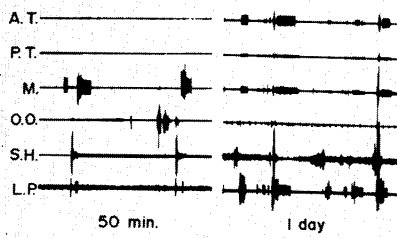
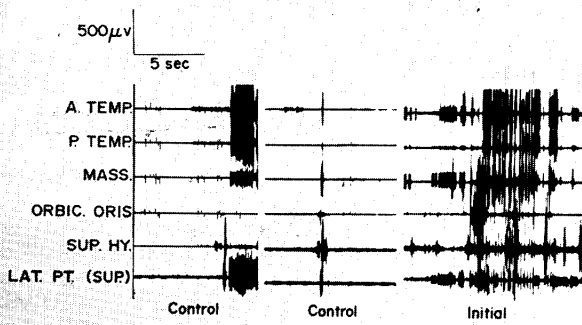
### 1° Neuromusculature

Les résultats obtenus au cours de la période expérimentale ont été groupés en trois phases.

— **Phase 1** : qui comprend les réactions initiales de l'animal au cours des six premières heures de l'expérience.

— **Phase 2** : qui comprend les enregistrements d'un jour à une semaine.

— **Phase 3** : qui va de la deuxième semaine à la fin de l'expérience.



**PHASE 1. — Six premières heures de l'expérience.**

La fixation de l'appareil à l'arcade maxillaire a modifié l'environnement buccal : les réponses ont été immédiates et très différentes. On a observé, en général, des périodes d'hyperactivité et d'hypoactivité chez le même animal (fig. 2). L'animal mordait sur l'appareil de façon erratique, en serrant fortement, comme s'il cherchait à établir une position d'occlusion confortable. Les positions fonctionnelles normales étaient perturbées et on a observé une perte de la synchronisation musculaire chez la moitié des animaux. Les mouvements mandibulaires étaient souvent exagérés et désordonnés. Chez les sujets les plus jeunes et dans le groupe «junéville» on a observé une activité prédominante au niveau du muscle temporal, en position de repos, comme lors de la période de contrôle. Cependant parmi les animaux plus âgés, certains ont montré une prédominance marquée de la fonction massétérine en position de repos comme au cours des mouvements fonctionnels.

L'une des modifications les plus importantes de l'activité musculaire, au cours des premières heures, a été observée au niveau des sus-hyoïdiens. Des «décharges hypertoniques» de ces muscles ont été enregistrées dans les groupes de tous âges. On suppose que cette activité facilitait l'abaissement de la position de repos mandibulaire. On a remarqué que la mandibule prenait une position plus basse, de manière à ce que les dents inférieures ne touchent pas l'appareillage. Cette hypertonicité n'était cependant pas continue, car on a pu noter aussi des périodes d'activité normale lorsque la mandibule était en position normale.

Au bout des six heures, un seul des douze animaux (le singe IVb) avait subi une modification importante de la position antéro-postérieure de la mandibule : celle-ci était légèrement en avant de sa position initiale et on enregistrait une activité accrue du faisceau supérieur du ptérygoïdien externe.

## ← Figure 2.

Activité musculaire caractéristique au cours de la période expérimentale. Sur les enregistrements de contrôle, noter l'activité synergique des élévateurs du chef supérieur du ptérygoïdien externe au cours des mouvements fonctionnels tels que la fermeture et la déglutition. Tout d'abord, la coordination musculaire fonctionnelle est rompue. Après une semaine, on observe l'amplitude de l'activité du muscle ptérygoïdien externe, non seulement au cours des mouvements, mais aussi dans la position de repos. Cette activité est maximale à la huitième semaine, puis diminue vers la fin de l'expérimentation (animal 1a) (vitesse d'enregistrement 5 mm/s).

**PHASE 2.** — De un jour à une semaine.

Cette période s'est caractérisée par le rétablissement des fonctions orales et par les modifications des réponses adaptatives observées pendant les six premières heures de l'expérience (phase 1). Les mouvements mandibulaires, au cours de cette période, n'étaient pas aussi violents, aussi «dramatiques», ni aussi exagérés que ceux de la phase 1.

L'hypertonicité des muscles sus-hyoïdiens qui avait probablement aidé à abaisser la mandibule et à la maintenir à distance de l'appareil, a disparu progressivement chez tous les animaux à la fin de la première semaine. Le masséter et les fibres antérieures du temporal ont dominé dans les enregistrements en position de repos. Chez deux des plus jeunes et chez tous les animaux adultes, à l'exception d'un seul, est apparue, en position de repos, une recrudescence générale de l'activité des élévateurs, y compris de la partie postérieure du temporal. Il y a eu cependant une diminution de l'activité du temporal postérieur chez trois des animaux les plus jeunes.

Des décharges toniques du chef supérieur du ptérygoïdien externe ont été également observées chez certains animaux, en position de repos.

**PHASE 3.** — De deux semaines à la fin de l'expérience.

La partie antérieure du temporal a repris progressivement le rôle actif principal, en position de repos. Au cours des périodes précédentes, ce rôle avait été tenu par le masséter. Mais l'activité de ce muscle a probablement diminué ensuite à cause de l'adaptation des différents systèmes fissulaires à l'appareillage.

L'adaptation la plus remarquable observée par électromyographie, au cours de la phase 3, concerne le faisceau supérieur du muscle ptérygoïdien externe. Dans les enregistrements de contrôle, l'activité du faisceau supérieur était surtout associée à la fonction d'élévation. On observait seulement quelques pics isolés, venant d'unités motrices individuelles, dans les enregistrements de la position de repos.

Au bout de deux semaines on enregistrait, chez la moitié des animaux, des décharges toniques du faisceau supérieur du ptérygoïdien externe. Ces décharges, pour la plupart, précédaient ou suivaient l'activité fonctionnelle comme celle de la déglutition (fig. 2). Pendant ce temps, le faisceau supérieur était souvent seul actif, les autres groupes musculaires enregistrés ne manifestant pas d'activité parallèle.

A quatre semaines, tous les animaux expérimentaux, à l'exception d'un seul, présentaient une activité tonique du



faisceau supérieur en position de repos et au cours des mouvements fonctionnels. Après huit semaines, cette activité s'est accrue chez trois animaux et a diminué chez quatre autres. Les derniers enregistrements de la période expérimentale, pris au cours de la douzième semaine, ont montré que l'activité du faisceau supérieur du ptérygoïdien externe avait disparu chez deux animaux et continuait de façon plus réduite chez huit autres (fig. 2). Même pendant l'activité maximale, les décharges toniques du faisceau supérieur n'étaient pas évidentes sur tous les enregistrements effectués lors d'une seule séance. Au cours des mouvements légers, et en l'absence de mouvements mandibulaires, particulièrement sur les enregistrements de la position de repos, cette réponse n'a pas toujours été observée. Ceci montre que la propulsion réflexe de la mandibule n'est pas constante.

Curieusement, les enregistrements occasionnels du faisceau inférieur du ptérygoïdien externe n'ont pas montré d'hyperactivité de ce faisceau. Ce faisceau inférieur continuait à fonctionner en synergie avec la musculature sus-hyoïdienne, mais ne manifestait pas de recrudescence de son activité au cours du maintien de la position de repos ou des mouvements fonctionnels.

**2° Étude macroscopique de la croissance et de l'adaptation du squelette**

A l'issue des treize semaines d'expérimentation, on a analysé, sur chaque animal expérimental, les adaptations dentaires et squelettiques. Dix singes sur douze ont montré

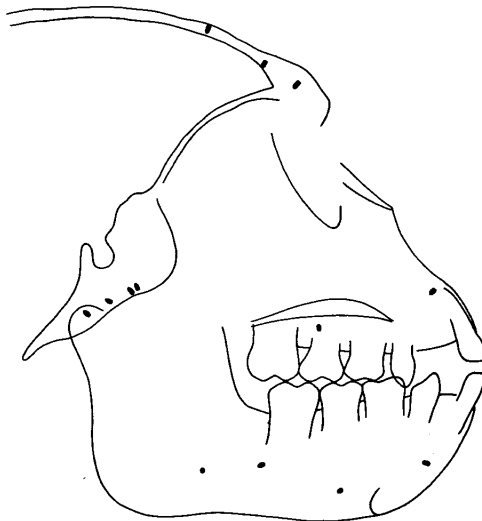


Figure 3.  
 Tracé céphalométrique d'un animal juvénile aussitôt après avoir enlevé l'appareillage.

une modification des relations maxillo-mandibulaires dans le sens antéro-postérieur. La nature et l'importance de ces modifications adaptatives variaient selon l'âge du groupe et aussi, mais en proportion moindre, dans chaque groupe, selon les individus (fig. 3).

#### A — ADAPTATIONS MANDIBULAIRES.

On a observé deux modifications morphologiques à la mandibule : changement du type de croissance de la tête du condyle et migration compensatrice de la denture. La signification relative de ces changements dépend, en partie, de l'âge de l'animal.

**RÉGION CONDYLIENNE.** Le taux de croissance du condyle a augmenté de façon très nette dans les groupes I et II, par rapport aux valeurs-témoins. Par exemple, **dans le groupe «juvénile»** l'accroissement moyen, mesuré au condyle, pendant la période expérimentale, a été de 51 % supérieur à celui des mêmes animaux durant la période de contrôle (tableau 1). Le pourcentage exact d'accroissement était variable selon les individus :

— L'accroissement le plus faible était de 36 % chez l'animal IIa ;

— L'animal IIc a présenté l'accroissement le plus élevé : 74 %. La croissance moyenne du condyle, chez les animaux expérimentaux, pendant la période II, a été de 27 à 38 % supérieure à celle des animaux témoins pendant le même laps de temps.

Le taux de la croissance postérieure du condyle **dans le groupe expérimental infantile** a été significativement plus important que celui des valeurs-témoins, au cours de la période II (tableau 1).

**Chez les animaux adultes**, l'augmentation de croissance de la partie postéro-supérieure du condyle a été négligeable. Une légère diminution du taux de la croissance condylienne a été observée dans le groupe III (tableau 1). Deux singes (IIIa et IIIc) ont eu beaucoup de difficulté à s'adapter à l'appareillage : ceci s'est traduit chez eux par une perte de poids respective de 1,5 kg et 0,8 kg pendant les quatre premières semaines. Bien qu'ils aient repris leur poids, à la fin de l'expérimentation, on a observé, chez ces animaux, une diminution du taux de croissance de tout le squelette.

Un changement dans la direction de croissance du condyle peut avoir le même effet, sur la position de la mandibule, qu'une augmentation du taux de croissance. Pendant la période de contrôle, les singes du **groupe infantile** présentaient une croissance condylienne à composante verticale. Cependant, au cours de la période expérimentale, il s'est produit un changement dans la

ÉLÉMENTS  
MESURES

Point condylien  
Point condylien  
Point condylien  
Bord antérieur  
Bord postérieur  
Angle C.R.O.

Point condy  
Point cond  
Point cond  
Bord anté  
Bord post  
Angle C.

Point  
Point  
Point  
Bord  
Bord  
Ang

ÉLÉMENTS MESURÉS	GROUPE I							
	Période I		Période II		Différence moyenne		t	Signifi- cation
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Point condylien	3.24	.44	3.61	.99	0.37	.59	1.087	
Point condylien sup.	2.35	.79	1.95	1.06	-0.40	.89	-0.778	
Point condylien post.	2.29	.13	3.06	.37	0.77	.35	3.887	.03***
Bord antérieur	-0.68	.24	-0.54	.29	-0.14	.11	-2.167	
Bord postérieur	2.28	.53	2.34	.84	0.06	.32	0.363	
Angle C.R.O.	-3.1°	4.4°	2.4°	3.1°	5.5°	1.0°	6.995	.01*

	GROUPE II							
	Période I		Période II		Différence moyenne		t	Signifi- cation
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Point condylien	1.94	.51	2.94	.51	1.00	.11	16.455	.002*
Point condylien sup.	1.15	.39	1.56	.29	0.41	.11	6.556	.01
Point condylien post.	1.81	.37	2.24	.38	0.43	.30	2.469	.07*
Bord antérieur	-0.72	.31	-0.87	.22	-0.15	.51	-0.489	
Bord postérieur	1.48	.60	1.74	.15	0.26	.46	0.985	
Angle C.R.O.	-1.1°	1.6°	1.5°	1.5°	2.6°	.3°	1.579	

	GROUPE III							
	Période I		Période II		Différence moyenne		t	Signifi- cation
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Point condylien	1.33	.16	0.92	.93	-0.41	.77	-0.445	
Point condylien sup.	0.88	.46	0.51	.70	-0.37	1.35	-0.681	
Point condylien post.	1.21	.85	0.87	.47	-0.34	.53	-0.383	
Bord antérieur	-0.41	.40	-0.40	.36	0.01	.69	0.980	
Bord postérieur	0.62	.63	0.50	.41	-0.12	.24	-0.480	
Angle C.R.O.	0.6°	1.4°	0.8°	1.0°	0.2°	.1°	0.745	

	GROUPE IV							
	Période I		Période II		Différence moyenne		t	Signifi- cation
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Point condylien	0.24	.41	0.38	.45	0.14	.04	5.735	.01
Point condylien sup.	0.20	.35	0.28	.28	0.08	.17	0.829	
Point condylien post.	0.44	.38	0.23	.28	-0.21	.11	-3.295	
Bord antérieur	-0.07	.07	-0.29	.27	.22	.20	1.889	
Bord postérieur	0.21	.12	0.12	.27	-0.09	.37	-0.419	
Angle C.R.O.	0.6°	.1°	0.1°	.6°	-0.5°	.1°	-0.762	

- \* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,05
- \*\* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,01
- \*\*\* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,005

Tableau I.  
Croissance mandibulaire chez les animaux expérimentaux, au cours de la période I (contrôle) et de la période II (expérimentation).  
Résultats statistiques pour trois animaux de chaque groupe.

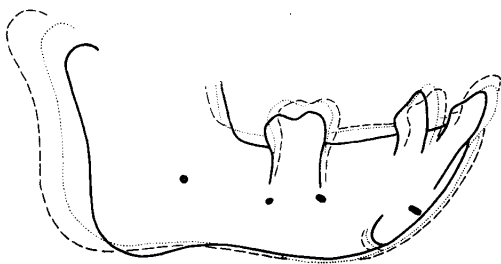


Figure 4.

Croissance de la mandibule chez un animal expérimental du groupe infantile (Ia) au cours de la période de contrôle et de la période expérimentale. Sur tous les tracés, la ligne pleine montre le début de la période de contrôle, la ligne pointillée indique le début de la période expérimentale, et les tirets, la fin de l'expérimentation. Noter l'inhibition de la migration verticale des molaires temporaires, et la migration compensatrice des incisives; l'augmentation de croissance le long du bord postérieur du condyle est très significative, pendant la période expérimentale.

direction de croissance condylienne : le taux de croissance de la partie supérieure du condyle a diminué tandis qu'augmentait celui de la partie postérieure (fig. 4). Chez ces animaux jeunes, qui avaient le taux de croissance normale le plus élevé, la modification du vecteur de la croissance condylienne a orienté la croissance mandibulaire vers l'avant.

Dans le **groupe juvénile**, les changements de vecteur ont été moins évidents, à cause de l'augmentation de l'apposition osseuse, à la fois à la partie supérieure et à la partie postérieure du condyle, au cours de la période II. La croissance condylienne est devenue légèrement plus horizontale chez deux des animaux adolescents. Chez l'animal IIIa, ce changement provenait plus d'une diminution du taux de croissance de la partie supérieure du condyle que d'une augmentation de la croissance postérieure.

Chez les **singes adultes**, les changements de vecteur, au niveau du condyle, n'ont pas été mis en évidence.

C'est donc dans les deux groupes les plus jeunes que les réponses adaptatives de la région condylienne ont été les plus marquées :

- Le taux de croissance a augmenté de façon significative dans les groupes I et II ;
  - La direction de la croissance condylienne a été modifiée, surtout chez les animaux du groupe infantile.
- La croissance du condyle, dans les deux groupes les plus âgés, n'a pas été modifiée par l'expérience.

**BRANCHE MONTANTE.** La croissance de la branche montante, mesurée au niveau de l'intersection avec le plan

occlusal, n'a été modifiée dans aucun groupe. On n'a observé aucune augmentation du taux d'apposition osseuse le long du bord postérieur de la mandibule (tableau 1). Cependant, chez les singes expérimentaux les plus jeunes, les modifications de la croissance condylienne ont affecté l'angle que forment la branche montante et le condyle avec le plan occlusal.

Chez les animaux infantiles non traités, l'angle condyle-branche montante-plan occlusal (CRO) se ferme normalement de 3 à 4° en treize semaines. Chez les animaux expérimentaux, au cours de la période II, on a observé une tendance inverse à l'ouverture de l'angle, de 2 à 3°. Puisque normalement il aurait dû y avoir fermeture, la modification était en fait de 5 à 7° : ce qui est statistiquement significatif (tableau 1). Le même schéma a été observé dans le groupe II mais l'angle condyle - branche montante - plan occlusal n'a pas été modifié dans les deux groupes plus âgés.

**DENTURE MANDIBULAIRE.** Les adaptations squelettiques de la mandibule ont été surtout limitées aux animaux « infantiles » et « juvéniles ». Par opposition, les modifications dentaires ont été plus importantes dans les groupes plus âgés (tableau 2). Elles ont été évaluées par rapport à la migration dentaire normale à chaque âge.

**SECTEURS LATÉRAUX.** La modification apparente des rapports intermaxillaires peut-être due à une mésialisation des molaires inférieures, provoquée expérimentalement. En fait, cette mésialisation due à l'appareillage ne s'est produite que chez les animaux des groupes II, III et IV.

Trois des six **animaux adultes et adolescents** ont présenté une mésialisation des secteurs latéraux. La mésialisation étant normalement faible à ce stade de maturation ce mouvement a été interprété comme étant dû, en grande partie, à l'expérimentation.

Par opposition, le mouvement horizontal des secteurs latéraux, **dans le groupe infantile**, n'a pas été significatif par rapport aux valeurs témoins (tableau 2).

**CANINES.** Les modifications les plus importantes dans les positions dentaires ont été observées au niveau du secteur antérieur, **surtout chez les singes adultes et adolescents** (tableau 2).

Durant la période de contrôle, les canines inférieures, chez les animaux témoins, ont fait leur éruption vers le haut et vers l'avant. Les canines inférieures permanentes des groupes III et IV ont été basculées en bas et en avant pour adapter le volume de l'appareillage entre les canines supérieures et inférieures. Grâce au « tipping » des canines, la mandibule a pu alors adopter une position antéro-postérieure relativement normale (fig. 5).

Par opposition aux animaux plus âgés, ceux des groupes infantile et juvénile n'ont pas présenté une exagération de la migration mésiale des canines. Cependant, on a noté une légère diminution de leur hauteur, due principalement à l'abrasion occlusale et distale des canines temporaires relativement fragiles.

**INCISIVES.** Les incisives de tous les animaux ont subi la même adaptation. Le schéma normal de la migration antéro-postérieure a été modifié de telle sorte que la migration verticale a augmenté tandis que le déplacement vers l'avant diminuait (fig. 4 et 5) (tableau 2). Ce type de mouvement incisif est dû en partie aux deux millimètres d'accroissement de la dimension verticale causés par l'appareillage : les incisives inférieures se sont égressées pour fermer l'espace et venir en occlusion avec leurs antagonistes.

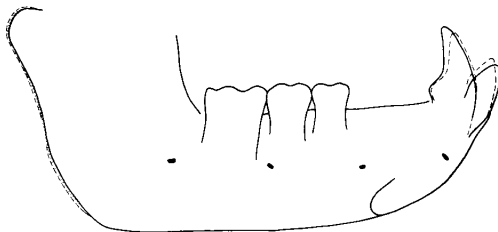


Figure 5.

Croissance de la mandibule chez un animal adulte expérimental (IVb), au cours de la période de contrôle et de la période expérimentale. Noter la version canine en bas et en avant, et le mouvement compensateur des incisives. Chez cet animal, les secteurs latéraux étaient stables.

## B — ADAPTATIONS DU COMPLEXE MAXILLAIRE.

On a observé également des modifications dentaires et squelettiques dans la région maxillaire.

**ADAPTATIONS SQUELETTIQUES MAXILLAIRES.** Le déplacement du complexe maxillaire, associé à la croissance suturale, a été évalué en mesurant la translation des implants maxillaires par rapport aux implants de la partie antérieure de la base du crâne. Une diminution du déplacement vertical du complexe maxillaire a été remarquée chez tous les singes expérimentaux, excepté trois d'entre eux (fig. 6 et 7) (tableau 3). Par exemple, la descente moyenne verticale des implants maxillaires des groupes I et II a été de 35 à 50 % moins importante que celle des témoins (tableau 3). Dans les groupes III et IV qui normalement présentaient un développement vertical moins important, la descente du maxillaire a été inhibée, et dans quelques cas, le maxillaire a été légèrement déplacé vers le haut (fig. 7) (tableau 3). Cette inversion

ÉLÉMENTS  
MESURÉSIncisive horizontale  
Incisive verticale  
Canine horizontale  
Canine verticale  
Molaire temporaire  
Molaire permanenteIncisive horizontale  
Incisive verticale  
Canine horizontale  
Canine verticale  
1<sup>re</sup> molaire  
2<sup>e</sup> molaireIncisive  
Incisive  
Canine  
Canine  
1<sup>re</sup> molaire  
1<sup>re</sup> molaire  
2<sup>e</sup> molaire  
2<sup>e</sup> molaire

ÉLÉMENTS MESURÉS	GROUPE I						t	Signifi- cation
	Période I		Période II		Différence moyenne			
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Incisive horizontale	1.03	.29	0.22	.29	0.81	.59	24.000	.001
Incisive verticale	0.34	.28	0.71	.44	0.37	.54	1.184	
Canine horizontale	0.79	.18	0.68	.36	-0.11	.20	-0.985	
Canine verticale	0.41	.25	-0.14	.35	-0.55	.59	-1.592	**
Molaire tempor. horiz.	0.47	.20	0.60	.32	0.13	.15	1.511	
Molaire tempor. vert.	0.72	.48	0.23	.20	-0.49	.67	-1.276	*

	GROUPE II						t	Signifi- cation
	Période I		Période II		Différence moyenne			
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Incisive horizontale	0.68	.58	0.33	.37	-0.35	.79	-0.755	
Incisive verticale	0.09	.05	0.87	.16	0.76	.21	6.506	.01*
Canine horizontale	0.50	.23	0.52	.21	0.02	.33	0.869	*
Canine verticale	0.27	.09	0.04	.24	-0.23	.32	-1.118	
1 <sup>re</sup> molaire horizontale	0.33	.15	0.48	.35	.15	.41	0.635	
1 <sup>re</sup> molaire verticale	0.27	.23	0.32	.37	.05	.30	0.327	

	GROUPE III						t	Signifi- cation
	Période I		Période II		Différence moyenne			
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Incisive horizontale	0.55	.04	0.39	1.26	-0.16	1.24	-0.225	
Incisive verticale	0.00	.00	0.74	.54	0.74	.54	2.369	.07*
Canine horizontale	0.92	.30	1.17	.06	0.25	.34	1.236	
Canine verticale	0.97	1.20	-0.44	.30	-1.41	1.37	-1.782	
1 <sup>re</sup> molaire horizontale	0.09	.13	0.44	.28	0.35	.19	3.228	.04**
1 <sup>re</sup> molaire verticale	0.07	.12	-0.03	.17	-0.10	.11	-1.686	**
2 <sup>e</sup> molaire horizontale	0.18	.17	0.38	.22	0.20	.42	8.488	.02**
2 <sup>e</sup> molaire verticale	0.03	.13	-0.19	.17	-0.27	.58	8.000	0.1**

	GROUPE IV						t	Signifi- cation
	Période I		Période II		Différence moyenne			
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Incisive horizontale	0.14	.20	-0.26	.27	-0.40	.36	-1.939	.10
Incisive verticale	0.00	.00	0.63	.04	0.63	.10	10.539	.005**
Canine horizontale	0.07	.06	0.62	.40	0.55	.45	2.120	.08*
Canine verticale	0.00	.00	-1.07	.34	-1.07	.34	5.461	.02***
1 <sup>re</sup> molaire horizontale	0.00	.00	0.17	.29	0.17	.29	1.000	
1 <sup>re</sup> molaire verticale	0.01	.02	0.12	.32	0.11	.31	0.589	
2 <sup>e</sup> molaire horizontale	0.00	.00	0.16	.34	0.16	.34	0.825	
2 <sup>e</sup> molaire verticale	0.00	.00	0.11	.44	0.11	.44	0.433	
3 <sup>e</sup> molaire horizontale	0.00	.00	0.09	.22	0.09	.22	0.730	
3 <sup>e</sup> molaire verticale	-0.04	.03	-0.11	.10	-0.07	.67	-1.857	

\* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,05

\*\* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,01

\*\*\* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,005

Tableau II.  
Modifications dentaires mandibulaires chez les animaux expérimentaux au cours de la période I et de la période II.  
Résultats statistiques pour trois animaux de chaque groupe.

du schéma de croissance peut être imputée surtout aux modifications de la dimension verticale, plutôt qu'aux changements du sens antéro-postérieur.

Les adaptations verticales aux modifications de l'environnement buccal ont été accentuées dans la région antérieure. A la fin de l'expérimentation, l'implant prémaxillaire s'est trouvé déplacé vers le haut d'une quantité

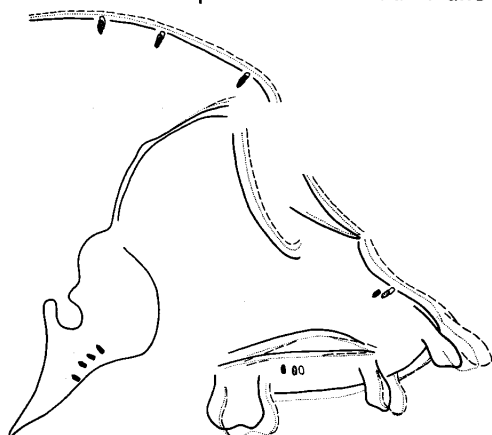


Figure 6.

Croissance du complexe maxillaire chez un animal expérimental juvénile (IIb), au cours de la période de contrôle et de la période expérimentale. Noter la modification du vecteur de la croissance maxillaire, comme l'indiquent les mouvements des implants prémaxillaire et maxillaire. L'implant en trait plein indique le début de la période de contrôle, l'implant en pointillé indique le début de la période expérimentale et l'implant en tirets indique la fin de la période expérimentale. Noter aussi la diminution du mouvement de la canine et de la molaire maxillaires, vers le bas et vers l'avant, au cours de la période expérimentale.

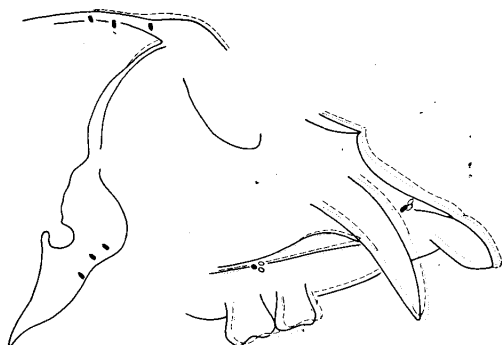


Figure 7.

Croissance du complexe maxillaire chez un animal expérimental adolescent (IIIa). Noter le léger déplacement du complexe maxillaire vers le haut au cours de la période expérimentale, comme l'indique le mouvement des implants maxillaires et prémaxillaire.

ÉLÉMENTS  
 MESURÉS

Implant prémax.  
 Impl. prémax.  
 Impl. maxillaire  
 Impl. maxillaire  
 Pente palatine

Implant pré  
 Implant pré  
 Impl. maxil  
 Impl. maxil  
 Pente palc

Implan  
 Implan  
 Impl.  
 Impl.  
 Pente

Im  
 In  
 In  
 In



ÉLÉMENTS MESURÉS	GROUPE I						t	Signifi- cation
	Période I		Période II		Différence moyenne			
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Implant prémax. horiz.	1.68	.40	1.54	.38	-0.14	.31	-0.787	
Implant prémax. vert.	0.28	.43	-0.04	.52	-0.32	.56	-0.360	
Impl. maxillaire horiz.	1.28	.49	2.06	.63	0.78	1.16	1.163	
Impl. maxillaire vertical	0.83	.44	0.41	.71	-0.42	.41	-1.531	
Pente palatine	0.43	.20	0.50	.71	0.07	.81	0.072	

ÉLÉMENTS MESURÉS	GROUPE II						t	Signifi- cation
	Période I		Période II		Différence moyenne			
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Implant prémax. horiz.	1.40	.38	1.09	.88	-0.31	.51	-0.860	
Implant prémax. vert.	0.05	.07	-0.56	.13	-0.61	.59	-14.600	.02**
Impl. maxillaire horiz.	1.61	.22	1.44	.97	-0.17	1.07	-0.269	
Impl. maxillaire vertical	0.22	.23	0.07	.21	-0.15	.43	-0.619	
Pente palatine	0.37	.16	-0.35	.18	-0.72	.24	-5.127	.02***

ÉLÉMENTS MESURÉS	GROUPE III						t	Signifi- cation
	Période I		Période II		Différence moyenne			
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Implant prémax. horiz.	0.68	.59	0.80	.55	0.12	.72	0.293	
Implant prémax. vert.	-0.13	.26	-0.79	.17	-0.66	.25	-4.567	.02***
Impl. maxillaire horiz.	0.53	.69	0.82	.77	0.29	1.07	0.457	
Impl. maxillaire vertical	0.45	.42	-0.37	.76	-0.82	1.18	-1.211	
Pente palatine	0.02	.02	-0.41	.37	-0.43	.35	-2.137	.08*

ÉLÉMENTS MESURÉS	GROUPE IV						t	Signifi- cation
	Période I		Période II		Différence moyenne			
	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm	$\bar{X}$ mm	D.S. mm		
Implant prémax. horiz.	0.24	.41	0.47	.47	0.23	.73	.0541	
Implant prémax. vert.	0.24	.23	-0.22	.20	-0.46	.43	-1.859	*
Impl. maxillaire horiz.	0.56	.79	0.81	.32	0.25	1.10	0.319	
Impl. maxillaire vertical	0.30	.02	-0.29	.41	-0.59			
Pente palatine	0.09	.15	-0.17	.15	-0.26	.27	-1.655	

\* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,05

\*\* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,01

\*\*\* Statistiquement significatif par rapport au groupe de contrôle au niveau 0,005

Tableau III.  
Déplacement du complexe maxillaire chez les animaux expérimentaux au cours des périodes I et II.  
Résultats statistiques pour trois animaux de chaque groupe.

plus importante que l'implant maxillaire ; et ceci dans tous les groupes (tableau 3) (fig. 6 et 7). Ce mouvement différentiel a basculé vers le haut la partie antérieure du plan palatin.

Les conditions expérimentales ont modifié la translation horizontale du complexe maxillaire chez tous les animaux, sauf le IVc. Mais cet effet s'est traduit différemment selon les sujets :

- Diminution du mouvement vers l'avant, chez cinq animaux ;
- Augmentation de ce mouvement chez six autres.

Ces variations peuvent être dues à la nature spécifique des contraintes fonctionnelles subies par la mâchoire de chaque animal.

**ADAPTATIONS DE LA DENTURE MAXILLAIRE.** L'appareillage a eu peu d'effet sur les secteurs latéraux des animaux adolescents et adultes, étant donné le peu de migration qui se produit normalement au niveau des dents postérieures à cet âge, et à cause de toute la surface radiculaire à entraîner.

Mais les adaptations dentaires ont été visibles chez les animaux plus jeunes : une diminution du mouvement d'égression des secteurs latéraux, mesurée par la localisation des implants maxillaires, a été mise en évidence chez les trois animaux juvéniles. D'autre part, une diminution de la migration mésiale des secteurs latéraux a été observée chez trois singes du groupe infantile et juvénile.

Dans tous les groupes, on a relevé des adaptations au niveau des dents antérieures : l'égression des incisives a été accentuée et leur migration mésiale moins marquée. Ce mouvement dentaire compensateur, semblable à celui des incisives inférieures, visait aussi à rétablir le plan occlusal.

### 3° Croissance et adaptation à l'échelle microscopique

L'aspect histologique de l'articulation temporo-mandibulaire a été observé, pour chaque groupe, chez deux animaux expérimentaux, et comparé à celui des animaux-témoins de même âge. Les huit animaux expérimentaux ont été sacrifiés treize semaines après le début de la période expérimentale.

Nous ne résumerons ici que les résultats les plus caractéristiques :

- **Dans les groupes I et II :** On a observé une résorption périostée et une apposition endo-ostée au niveau de l'insertion du muscle ptérygoïdien externe sur la tête du condyle. En ce qui concerne le cartilage condylien : il y a

eu prolifération de ce cartilage mais aucune augmentation de son épaisseur comparée à celle des animaux-témoins ;

— **Dans le groupe II** : Un fait particulièrement intéressant a été l'apparition de chondrocytes au niveau de l'éminence articulaire, dans la profondeur de la surface articulaire fibreuse, chez un sujet expérimental et chez deux des sujets-témoins. Chez les animaux de cet âge, les chondrocytes ressemblent habituellement aux fibroblastes ;

— **Dans le groupe III** : Les chondrocytes du sommet de l'éminence articulaire sont apparus hypertrophiés chez l'animal IIIb, mais le même phénomène histologique d'hypertrophie chondrocytaire est apparu également chez quatre des animaux-témoins (fig. 8) ;

— **Dans le groupe IV** : Les deux animaux expérimentaux (IVb et IVa) et le témoin (IVf) qui a été sacrifié, étaient de jeunes singes adultes, et les trois zones de cartilage condylien étaient encore identifiables : le tissu

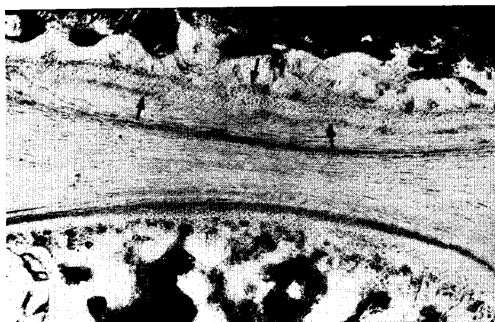


Figure 8.  
Chondrocytes hypertrophiés sur la crête de l'éminence articulaire (cf. flèches) chez un animal expérimental adolescent (IIIb). Le même phénomène s'est produit chez plusieurs animaux témoins du même âge. Hématoxyline et Eosine (16x).

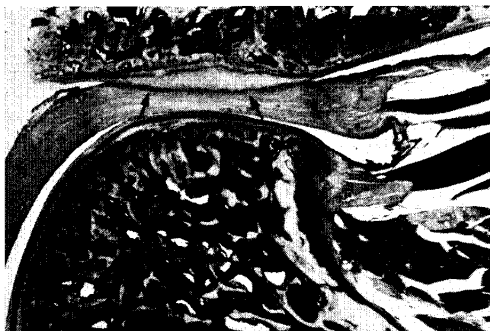


Figure 9.  
Articulation temporo-mandibulaire d'un animal adulte expérimental. Noter l'épaississement de la couche fibreuse de l'éminence articulaire (cf. flèches). Le même épaississement a été observé chez un animal témoin. Hématoxyline et Eosine (8x).

articulaire fibreux n'avait pas encore remplacé le cartilage. La particularité histologique la plus remarquable, dans ce groupe, a été l'apparition de cellules cartilagineuses dans les couches profondes de l'éminence articulaire et aussi l'épaississement de la couche fibreuse articulaire recouvrant l'éminence (fig. 9). Ceci a été surtout mis en évidence chez l'animal IVc, mais aussi chez l'un des animaux-témoins.

### III — DISCUSSION

Les études précédentes sur les singes ont montré que les déformations expérimentales qui altèrent la spère oro-faciale, peuvent aboutir à des modifications spécifiques du squelette. HAUPL et PSANSKY<sup>3</sup>, DERICH-SWEILER<sup>5</sup> et JOHO<sup>8</sup>, entre autres, ont supposé que les adaptations produites expérimentalement au niveau des différentes parties du squelette étaient dues aux modifications imposées à la musculature qui lui est associée. Cependant, la «nature fonctionnelle» des adaptations oro-faciales reste encore imprécise.

Dans cette expérience, chez le singe Rhésus, on s'est attaché à décrire les adaptations neuro-musculaires et squelettiques, résultant des modifications de l'environnement buccal. Ces processus sont complexes mais deux catégories de réponses adaptatives ont pu être mises en évidence : adaptation des dimensions antéro-postérieures de la face moyenne et de la mandibule, adaptations également de leurs dimensions verticales.

#### 1° Adaptations antéro-postérieures

Le mouvement de fermeture de la mandibule sur la nouvelle configuration occlusale a d'abord modifié les stimuli extéroceptifs et proprioceptifs des zones oro-faciales concernées (fig. 10). L'appareillage a été conçu de telle sorte que le singe devait propulser la mandibule pour fermer effectivement les mâchoires. Les schémas préexistants de l'activité musculo-squelettique fonctionnelle et occlusale ont été détruits et des modifications de l'activité neuro-musculaire sont apparues.

#### A — DÉVELOPPEMENT DES MODIFICATIONS FONCTIONNELLES

Une première modification fonctionnelle s'est traduite à l'électromyographie par l'augmentation de l'activité du faisceau superficiel du masséter. Le masséter du Macaca mulatta, comme chez l'homme, est biomécaniquement

adapté aux mouvements de légère protrusion<sup>19</sup>. On a remarqué aussi une diminution de l'activité de la partie postérieure du muscle temporal. Cette modification de l'activité musculaire a facilité le mouvement mandibulaire de fermeture, dans la première partie de la période expérimentale.

Progressivement, la mandibule a pris une position réflexe plus avancée, pour éviter l'interférence de l'appareillage et le trauma occlusal, lors de la fermeture. En même temps, l'activité du chef supérieur du ptérygoïdien externe a augmenté progressivement, avec des décharges visibles au cours des mouvements fonctionnels et en position de repos de la mandibule (fig. 10). La fréquence des décharges a augmenté dans les enregistrements successifs pour atteindre un maximum entre quatre et huit semaines.

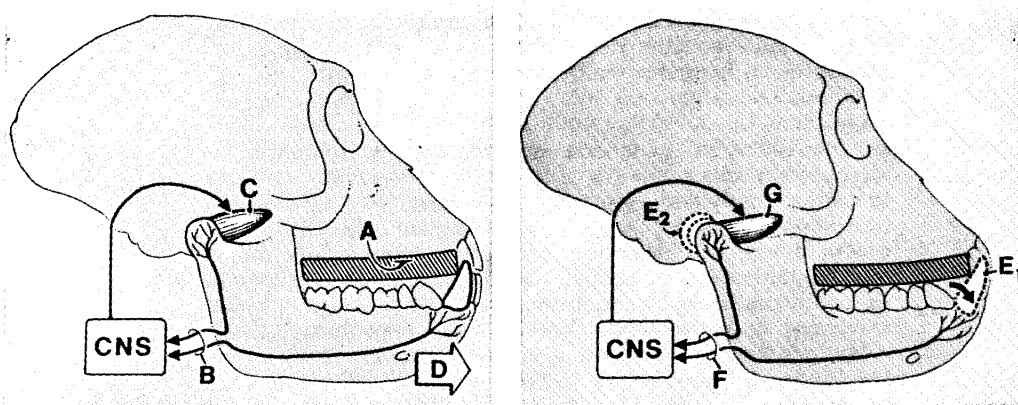


Figure 10.

Adaptations antéro-postérieures :

A — Pose de l'appareillage.

B — Altérations des stimuli extéroceptifs et proprioceptifs, représentés par les récepteurs au niveau de la denture et de l'articulation temporo-mandibulaire, transmis au système nerveux central (C.N.S.).

C — Cette modification au niveau des stimuli sensoriels peut aboutir à l'altération du schéma neuro-musculaire fonctionnel, comme en témoigne la contraction du faisceau supérieur du ptérygoïdien externe.

D — Ceci entraîne une propulsion de la mandibule.

La nature des adaptations squelettiques dépend du stade de maturité de l'animal.

E 1 — Une des modifications dentaires observées chez les animaux adultes.

E 2 — Une des adaptations squelettiques observées chez les animaux plus jeunes.

F — Modifications des stimuli sensoriels oraux qui en résultent.

G — Diminution des compensations neuro-musculaire correspondantes, et développement d'un schéma musculaire plus efficace.

Le faisceau inférieur du ptérygoïdien externe n'a pas été particulièrement étudié au cours de la phase expérimentale. Cependant, les enregistrements occasionnels de ce faisceau inférieur, n'ont mis en évidence ni hyperactivité ni altération fonctionnelle de cette partie du muscle.

On a enregistré séparément l'activité des deux faisceaux et remarqué qu'il n'y avait probablement pas d'extension de l'activité d'un faisceau à l'autre au cours des enregistrements électromyographiques.

McNAMARA<sup>17</sup>, dans une étude sur la fonction normale du muscle ptérygoïdien externe chez les *Macaca Mulatta*, estime que les deux faisceaux de ce muscle sont fonctionnellement indépendants. Le chef supérieur de ce muscle, chez le singe Rhésus, est le seul qui présente une activité électrique au cours des mouvements de fermeture, tandis que le chef inférieur, orienté vers le bas, est actif pendant les mouvements d'ouverture. Ce dernier facilite probablement la translation de la tête condylienne, en bas, vers l'avant et de façon contralatérale au cours des mouvements qu'elle effectue.

McNAMARA en déduit qu'une légère contraction du faisceau supérieur, lors de la fermeture, permet de stabiliser la tête condylienne et le ménisque, les maintenant parfaitement synchronisés au cours des mouvements qui les amènent contre l'éminence articulaire, surtout lors de la mastication et de la déglutition. Il pense aussi que, si le faisceau supérieur se contracte davantage, il permet au ménisque, à la tête condylienne et à la capsule articulaire d'être portés plus en avant et légèrement plus haut, contre les surfaces postérieure et inférieure de l'éminence articulaire.

Au cours de cette étude, le chef supérieur du ptérygoïdien externe a paru assumer un rôle actif dans la détermination de la position antéro-postérieure de la mandibule. La propulsion de la mandibule que l'on a observée peut être due aux contractions du faisceau supérieur. Il est possible que ces contractions aient entraîné le ménisque et la tête condylienne plus en avant et les aient stabilisés le long de l'éminence articulaire.

Les résultats d'autres expérimentations dans notre laboratoire tendent à confirmer que le chef supérieur du ptérygoïdien externe est probablement le principal responsable de la propulsion mandibulaire. Dans une étude, qui n'est pas encore publiée, sur le mouvement mandibulaire rétrusif provoqué expérimentalement chez le singe, on a observé une activité accrue du faisceau supérieur du ptérygoïdien externe : cette augmentation de l'activité signifie probablement que ce muscle essaie alors d'empêcher le déplacement du condyle et du ménisque vers l'arrière.

Cependant, dans une autre étude sur l'augmentation de la dimension verticale chez le singe<sup>20</sup>, on n'a remarqué aucune hyperactivité du faisceau supérieur au cours des mouvements fonctionnels, même après avoir amené la mandibule de deux à quinze millimètres plus bas, créant ainsi une légère modification de la position antéro-postérieure du condyle. Enfin, dans une expérience non publiée, sur des singes que l'on avait édentés, le chef supérieur du ptérygoïdien externe est devenu extrêmement actif. Dans ce cas, le faisceau supérieur intervient probablement en stabilisant le condyle, pour essayer de régler et de maintenir l'orientation antéro-postérieure et latérale de la mandibule.

Cette augmentation de l'activité du faisceau supérieur du ptérygoïdien externe est probablement nécessaire à l'animal édenté, pour compenser la perte des stimuli extéroceptifs apportés normalement par la dentition.

Dans les expériences citées plus haut et dans l'étude présente, l'accroissement de l'activité du chef supérieur du ptérygoïdien externe était habituellement associée aux changements de la position horizontale de la mandibule mais on ne l'a pas observée au cours des modifications de la position verticale ou de la position de rotation. Cette différence d'activité, peut signifier que le faisceau supérieur du ptérygoïdien externe stabilise le ménisque et la tête condylienne au cours des mouvements normaux de fermeture, et qu'il peut aussi agir comme «positionneur» du condyle et du ménisque le long de la surface articulaire de l'os temporal, aidant ainsi à régler et à maintenir l'orientation antéro-postérieure de la mandibule.

## B — MÉCANISMES DES MODIFICATIONS FONCTIONNELLES

L'établissement et le maintien des relations antéro-postérieures et latérales des maxillaires ne dépendent pas seulement des récepteurs de l'articulation temporo-mandibulaire et des muscles, mais aussi de ceux du ligament parodontal, de la langue, du palais et des autres structures oro-faciales. MOYERS<sup>18</sup> a mis en évidence le fait que la relation centrée et les autres relations intermaxillaires ne sont définies avec précision qu'après l'éruption des dents. Les impulsions sensorielles venues des récepteurs parodontaux passent par le trajet mésencéphalique du nerf trijumeau, vont jusqu'aux niveaux sous-cortical ou cortical où, avec les stimuli venus de l'articulation temporo-mandibulaire, des muscles et des autres récepteurs buccaux, elles peuvent influencer l'activité motrice des muscles masticateurs.

Au cours de notre expérimentation, lorsque la mandibule s'élevait en mouvement de fermeture, les canines

inférieures touchaient d'abord l'onlay occlusal, la mandibule était alors guidée vers l'avant par le glissement des canines le long des plans inclinés de l'appareillage. On a montré

que les récepteurs parodontaux étaient plus sensibles aux « stress » latéraux qu'aux « stress » axiaux<sup>21</sup>. C'est probablement pour éviter les interférences occlusales que les stimuli venant des mécano-récepteurs parodontaux, des récepteurs articulaires et musculaires ont entraîné un proglissement de la mandibule. L'augmentation de l'activité du chef supérieur du ptérygoïdien externe est peut-être une manifestation réflexe (d'abord inconditionnée, puis conditionnée) qui aide l'animal à s'adapter aux modifications expérimentales de son environnement buccal.

Il est possible aussi que la propulsion de la mandibule ait été une réponse secondaire aux modifications du volume buccal provoquées par l'appareillage et au changement de position de la langue qui en résultait. Il est possible que la langue et la mandibule se soient déplacées vers l'avant, non seulement pour permettre des mouvements mandibulaires plus fonctionnels, mais aussi pour maintenir un volume buccal adapté à la fonction linguale.

### C — RELATIONS ENTRE LES ADAPTATIONS NEURO-MUSCULAIRES ET SQUELETTIQUES

Il est important de noter la disparition progressive des modifications neuro-musculaires telles que celles qui ont été observées au niveau du ptérygoïdien externe (fig. 10).

A la fin de l'expérience, la plupart des animaux s'étaient adaptés squelettiquement aux modifications expérimentales. L'examen céphalométrique montrait que les condyles mandibulaires avaient retrouvé leur orientation initiale dans la cavité glénoïde. Les adaptations structurales qui permettaient à cette relation d'être rétablie, n'étaient pas localisées dans une seule région de la face, mais étaient plutôt la résultante de nombreuses modifications dentaires et squelettiques de tout le complexe cranio-facial. La nature spécifique de ces adaptations était directement en rapport avec le stade de maturation de l'animal. Par exemple, à la mandibule, on a observé un mouvement dentaire compensateur chez les animaux adolescents et adultes, tandis que des modifications de la quantité ou de la direction de croissance condylienne étaient apparues dans les deux groupes les plus jeunes. De plus, on a remarqué que là où se produisaient les adaptations squelettiques, sans tenir compte de leur nature, il devenait moins nécessaire de compenser la fonction musculaire.

En étudiant la relation entre la fonction musculaire et les modifications structurales, on peut rattacher le moment de l'apparition et de la disparition des modifications



fonctionnelles à l'importance et à l'étendue des adaptations dentaires et squelettiques.

Dans une étude précédente sur la propulsion, on avait soumis six jeunes singes à la même modification de la position mandibulaire fonctionnelle pendant une période de cinq mois. On avait mesuré chaque mois l'augmentation de la croissance condylienne; l'augmentation du taux de croissance, chez les animaux expérimentaux, tendait à se produire au cours des trois premiers mois avec un pic maximum au second mois. Mais, après quatre mois, le taux de croissance, chez ces mêmes animaux, n'était pas différent de celui des témoins.

Si l'on compare ces résultats à ceux de l'étude présente, on remarque que le taux maximum de croissance squelettique, se situe au second mois, le maximum d'activité neuro-musculaire adaptatrice apparaît juste avant ou pendant cette période. On peut présumer que la diminution du taux de croissance adaptative squelettique, au quatrième mois, signifie que l'équilibre structural a été rétabli. A cette époque, d'ailleurs, l'activité du faisceau supérieur du ptérygoïdien externe est également réduite. Cependant, le fait que l'activité provoquée du ptérygoïdien externe n'ait pas disparu chez tous les animaux à la fin de l'expérimentation, signifie aussi que tous n'ont pas subi une croissance squelettique compensatrice parfaite.

#### D — RELATIONS ENTRE LES DONNÉES NEURO-MUSCULAIRES ET LA MICROSCOPIE

CHARLIER<sup>25</sup>, PETROVIC et STUTZMANN<sup>26</sup> pensent que la croissance condylienne peut dépendre de la stimulation fonctionnelle, et particulièrement du muscle ptérygoïdien externe. CHARLIER a remarqué que la direction de croissance du condyle mandibulaire, chez l'homme, coïncide avec la traction du muscle ptérygoïdien externe dont l'insertion postérieure est adjacente au cartilage condylien. CHARLIER et PETROVIC<sup>27</sup> ont remarqué que le cartilage condylien, chez le rat, ne semble pas avoir un potentiel de croissance indépendant, lorsqu'il est isolé de ses structures environnantes. Cependant, VOGEL et PIGNANELLI<sup>28</sup>, CHARLIER<sup>25</sup> et ses collaborateurs<sup>29</sup> soulignent que le cartilage condylien peut réagir aux stimulations fonctionnelles avec augmentation de la croissance mandibulaire. La propulsion mandibulaire entraîne un accroissement des cellules de la couche proliférative du cartilage condylien.

STÖCKLI et WILLERT<sup>9</sup>, dans une étude histologique sur la propulsion chez le jeune singe, notent l'apparition de certaines adaptations structurales, au niveau de la tête du condyle, à des moments bien précis. On observe une augmentation de la prolifération du cartilage condylien et de l'ossification enchondrale, principalement à trois et sept

semaines et demie. Cependant, à la dix-septième semaine et les jours suivants, on ne met plus en évidence de modifications de la réponse tissulaire. STOCKLI et WILLERT émettent l'hypothèse suivante : tous les animaux expérimentaux passent par le même stade de réponse tissulaire mais, chez tous, l'adaptation est ensuite remplacée normalement par un processus interne de remodelage.

Au cours de notre étude, les articulations temporo-mandibulaires prélevées chez les animaux expérimentaux du groupe juvénile, n'ont présenté aucune réponse histologique induite expérimentalement. Mais la période expérimentale a peut-être été suffisamment prolongée pour qu'un processus de remodelage interne tel que celui décrit par STOCKLI et WILLERT ait pu intervenir pour masquer les réponses adaptatives transitoires. Il est également possible que les processus adaptatifs aient été de nature telle qu'à aucun moment ils n'aient pu être différenciés des processus de croissance normale. ENLOW<sup>30</sup> a montré que de légères modifications dans la direction de croissance peuvent résulter de perturbations des relations structurales.

Les processus adaptatifs n'entraînent pas nécessairement une augmentation de la prolifération cartilagineuse, de l'ossification enchondrale, et un remodelage interne. S'ils aboutissent tous à un taux relativement égal d'accroissement, il est cependant difficile de différencier les mécanismes de la croissance adaptative de ceux de la croissance normale, à condition qu'une telle différence existe.

Cependant, si STOCKLI et WILLERT ont identifié un mécanisme adaptatif à l'échelon microscopique, celui-ci correspond chronologiquement aux taux de croissance squelettique relevés par ELGOYHEN et ses collaborateurs<sup>10</sup>, à l'apparition et à la disparition du rôle de «positionneur» joué par le faisceau supérieur du muscle ptérygoïdien externe tel que nous l'avons décrit. La modification initiale de la fonction musculaire semble être directement associée aux modifications de l'environnement buccal induites expérimentalement : la fonction neuro-musculaire a d'abord été interrompue puis réorganisée pour compenser la modification structurale. Puis, lorsque l'équilibre squelettique a été restauré par les modifications structurales adaptatives la neuromusculature a commencé à rétablir des schémas fonctionnels plus efficaces.

Dans les exemples cités plus haut, l'accroissement condylien était en relation avec la propulsion mandibulaire. Ceci n'est évidemment qu'un des modes d'adaptation du squelette ; la nature spécifique et la localisation des adaptations dentaires et squelettiques varient selon le **niveau de maturité** de l'animal expérimental.

Dans une étude comparable sur le déplacement

mandibulaire chez le singe Rhésus, HINIKER et RAMFJORD<sup>7</sup> trouvent que l'articulation temporo-mandibulaire du singe adulte est très stable et résistante aux traumatismes ainsi qu'aux modifications des rapports occlusaux. Ils affirment que les modifications microscopiques observées au niveau de l'articulation temporo-mandibulaire sont « insignifiantes, non évolutives et probablement réversibles sans traitement ». Des résultats semblables ont été observés chez l'animal expérimental **adulte**, au cours de notre étude.

La structure histologique de l'articulation temporo-mandibulaire nous a paru stable et résistante aux modifications fonctionnelles. Elle est cependant capable de répondre à ces mêmes modifications, le facteur essentiel qui entre en jeu étant **l'âge de l'animal**. Un stimulus capable d'entraîner des modifications adaptatives à un moment donné peut être inefficace à un stade plus avancé du développement.

## 2° Adaptations dans le sens vertical

La pose de l'appareillage au maxillaire a entraîné non seulement un déséquilibre dans le sens horizontal mais aussi une augmentation immédiate de la hauteur du complexe maxillaire (fig. 11), et une légère rotation postérieure de la mandibule. Cette rotation mandibulaire résultait de l'étirement de certains tissus mous reliant la mandibule aux structures cranio-faciales supérieures et du raccourcissement de certains autres. Il y a eu une double réponse des tissus mous au changement de position des éléments osseux : « remodelage » des tissus adjacents et modification des fonctions neuro-musculaires.

### A — MODIFICATIONS DES FONCTIONS NEURO-MUSCULAIRES

Le déséquilibre vertical s'est exprimé de deux manières au niveau de la neuro-musculature. Tout d'abord, les « stress » fonctionnels subis par les structures oro-faciales ont été atténués par l'hypo et l'hyperactivité de certains groupes musculaires. Par exemple, on a observé une hyperactivité au niveau des sus-hyoïdiens tendant probablement à abaisser la mandibule, ce changement de la position mandibulaire permettant non seulement à la langue de mieux se placer, mais diminuant aussi le trauma occlusal en évitant aux dents inférieures de toucher l'onlay maxillaire. Il est important de remarquer cependant que ces réponses de « protection » ont été de courte durée jusqu'à ce que se fût rétablie la fonction, c'est-à-dire dans le courant de la première semaine.

En même temps que l'apparition rapide de ces réponses, qui diminuaient apparemment le trauma occlusal,

d'autres phénomènes intervenaient, caractérisés par l'accroissement de l'activité musculaire et probablement l'accroissement du «stress» occlusal. On a observé, par exemple, une augmentation de l'activité élévatrice de la mandibule au cours de la déglutition, la mandibule se stabilisant contre l'appareillage avant le début de la

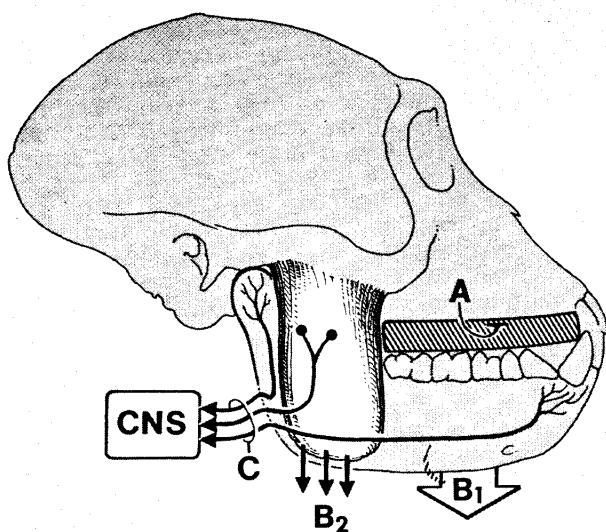


Figure 11.

Adaptations verticales :

A — Pose de l'appareillage.

B1 — Qui entraîne une légère rotation postérieure de la mandibule.

B2 — Et une élongation immédiate de la musculature annexe.

C — Les sensations buccales sont également modifiées. Elles sont représentées par les récepteurs de la denture, des muscles et de l'articulation temporo-mandibulaire.

fonction. Par opposition aux réponses protectrices qui ont disparu assez tôt au cours de l'expérimentation, l'augmentation de la fréquence et de la durée du mouvement d'élévation a persisté en partie tout au long de la période expérimentale.

L'effet précis du déséquilibre squelettique sur la neuro-musculature, dans le sens vertical, a été totalement différent de celui produit dans le sens horizontal. Dans le sens antéro-postérieur, les réflexes de posture se sont établis

progressivement, résultant principalement d'une contraction conditionnée du faisceau supérieur du muscle ptérygoïdien externe. Par opposition, l'augmentation de hauteur de l'arcade maxillaire a provoqué une modification **immédiate** des insertions osseuses des muscles éleveurs qui consistait très souvent en une **élongation** (fig. 11).

## B — MÉCANISMES DE L'ADAPTATION NEURO-MUSCULAIRE

BOOS<sup>31</sup>, entre autres, affirme que tout muscle ou groupe de muscles ayant subi une élongation dans les limites physiologiques, cherche à rétablir une homéostasie fonctionnelle. Ces mécanismes adaptatifs comprennent :

- 1) **L'élongation des fibres musculaires elles-mêmes**<sup>32</sup> ;
- 2) **L'apparition de modifications neuro-musculaires<sup>1</sup> par mécanisme de « feed-back »** ;
- 3) **La migration des insertions musculaires le long des surfaces osseuses**<sup>32,34</sup>.

4) **Les changements de dimensions musculaires dus au déplacement et à la rotation des pièces osseuses.** Ce mécanisme a été particulièrement mis en évidence dans notre étude, ainsi que la croissance et le remodelage des pièces osseuses qui en résultent. Grâce à la localisation des insertions des muscles éleveurs, les adaptations squelettiques peuvent se produire au niveau de la mandibule, du maxillaire, de la base du crâne et d'autres parties du crâne.

Dans cette étude, nous avons analysé en détails les deux premières zones. La croissance du complexe maxillaire (enregistrée sur implants dans la partie antérieure de la base du crâne) a été très modifiée par les conditions expérimentales : le déplacement normal du maxillaire vers le bas a été diminué ou même inhibé chez 75 % des animaux. La migration vers le haut des molaires mandibulaires a été légèrement diminuée, tandis que l'effet expérimental sur la denture maxillaire a été variable. On a noté une diminution du taux de croissance de la partie supérieure du condyle, chez quatre jeunes animaux sur six, mais ce résultat peut être aussi lié aux modifications fonctionnelles du sens antéro-postérieur.

L'apparition d'une **diminution** de la dimension verticale a été interprétée comme une séquelle des réponses squelettiques à l'appareillage. Elle est en rapport avec la fonction musculaire mais aussi avec les autres tissus mous : lorsque les éléments osseux sont séparés, il se produit un étirement passif de tous les tissus annexes. Cet étirement passif fait aussi partie des adaptations squelettiques par mécanisme de « feed-back », puisque l'activité musculaire élevatrice n'est pas aussi importante chez l'animal témoin que chez l'animal expérimental.

## IV — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

La division en sens vertical et antéro-postérieur, à propos des adaptations neuro-musculaires et squelettiques, est artificielle puisque ces changements fonctionnels sont interdépendants : les altérations dans une seule dimension ou une seule région du complexe cranio-facial entraînent une série de réactions simultanées dans les autres régions.

On a observé une relation entre le **moment** où se produisent les réponses neuro-musculaires et les réponses squelettiques. Bien qu'au cours de cette étude, on n'ait pu établir aucune relation directe de cause à effet entre la fonction musculaire et la croissance osseuse, on a pu cependant établir une séquence générale des adaptations (fig. 10) :

— Tout d'abord, les stimuli extéroceptifs et proprioceptifs de la région oro-faciale sont perturbés par l'introduction de l'appareillage ;

— Les schémas fonctionnels existant sont interrompus et réorganisés ;

— Ceci, en retour, entraîne un changement des relations fonctionnelles maxillo-mandibulaires ;

— Cette modification de schéma fonctionnel altère l'environnement oro-facial de telle sorte qu'il se produit une série d'adaptations squelettiques, tissulaires et que l'équilibre anatomique est éventuellement rétabli ;

— Lorsque ceci s'est produit, la compensation neuro-musculaire correspondante s'atténue et il s'élabore de nouveaux schémas fonctionnellement plus efficaces.

Une telle corrélation peut exister, non seulement dans une situation expérimentale, mais aussi au cours de la croissance normale. Des déséquilibres momentanés au niveau structural ou fonctionnel peuvent aboutir à des processus adaptatifs compensateurs. On peut affirmer qu'un mécanisme de «feed-back» existe au niveau des éléments squelettiques et des tissus mous du complexe cranio-facial qui sert à régler et équilibrer l'interaction muscles-os.

## V — RÉSUMÉ.

Le but de cette étude était de rechercher la nature des adaptations musculo-squelettiques intrinsèques résultant de modifications expérimentales de l'environnement oro-facial. On a imaginé une nouvelle configuration occlusale qui a modifié les stimuli sensoriels buccaux, entraînant rapidement une propulsion de la mandibule, chez le singe Rhésus

(*Macaca Mulatta*) au cours des mouvements fonctionnels, à des stades de maturité bien précis. Les adaptations squelettiques, dentaires et neuro-musculaires ont été étudiées et comparées par électromyographie, radiographie céphalométrique avec implants et analyse microscopique.

L'étude a été divisée en deux périodes. Au cours d'une période de contrôle de treize semaines, on a recueilli les données sur la croissance normale des quatre groupes d'âge. Au cours des treize semaines de la période expérimentale, on a observé les modifications neuro-musculaires et squelettiques provoquées par les conditions expérimentales. L'activité de repos des muscles masticateurs et probablement la position de repos de la mandibule ont été modifiées par la transformation de l'environnement buccal. L'activité du faisceau supérieur du muscle ptérygoïdien externe a augmenté progressivement, d'abord au cours des mouvements fonctionnels, puis lors de la position de repos mandibulaire. Le faisceau supérieur a paru fonctionner comme le principal responsable de la propulsion mandibulaire. Cette activité a diminué ou a disparu à la fin de l'expérimentation.

A la fin de la période expérimentale, dix singes expérimentaux sur douze ont présenté une modification des rapports molaires antéro-postérieurs. Aucun processus adaptatif simple n'a pu être isolé ou identifié comme seule cause de la modification des relations maxillo-mandibulaires, et ceci à tous les âges. Chaque résultat était plutôt la synthèse d'adaptations spécifiques complémentaires (et parfois antagonistes) de tout le complexe cranio-facial. Les adaptations mandibulaires squelettiques se sont produites surtout chez les animaux «enfants» et «juvéniles» dont le taux et la direction de croissance du condyle ont été modifiés.

Les adaptations dentaires, à la mandibule, ont été surtout remarquables chez les animaux adultes et adolescents.

Dans la région naso-maxillaire, on a noté une diminution du déplacement vertical du complexe maxillaire chez tous les animaux, à l'exception de trois. Le déplacement horizontal du complexe maxillaire et la migration de la denture maxillaire ont été également modifiés, mais de façon variable.

Après treize semaines, on a relevé, chez les animaux sacrifiés, la trace histologique des réponses physiologiques ou pathologiques à la propulsion provoquée expérimentalement. Ces résultats histologiques concordent avec ceux des études précédentes: l'articulation temporo-mandibulaire adulte est stable et résistante, tandis que l'articulation, au stade de croissance, est capable de répondre aux modifications fonctionnelles.

De plus, les résultats de cette étude ont montré qu'il existe une **relation chronologique** entre l'apparition et la disparition des altérations fonctionnelles neuro-musculaires et le rétablissement de l'équilibre squelettique. Lorsque l'équilibre squelettique est rétabli grâce aux adaptations structurales, le besoin de compenser la fonction musculaire est diminué.

Enfin, la nature et l'importance des adaptations dentaires et squelettiques dépendent du **stade de maturité** de l'animal.

L'auteur remercie le Docteur Donald H. ENLOW, le Docteur Robert E. MOYERS et le Docteur TAKAYUKI KURODA pour leur aide et leurs conseils. Mme M. Christine Mc BRIDE a assuré l'assistance technique et Mme Ruth BIGIO la rédaction. Les illustrations sont de M. William L. BRUDON, Mme Ruth BIGIO, M. Gérald G. DAVENPORT et M. Edward E. SAYER.

Traduit par F. et H. BRULIN.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. McNAMARA J.A., Jr. : **Neuromuscular and skeletal adaptations to altered orofacial function.** Monograph, Craniofacial Growth Series, Center for Human Growth and Development, The University of Michigan, Ann Arbor, 180 pages, 1972.

2. BREITNER C. : Experimentelle Veränderung der mesio-distalen Beziehungen der oberen und unteren Zahnreihen. **Ztschr. f. Stomat.** 28 : 343-356, 1930.

3. HÄUPL H. and PSANSKY R. : Experimentelle Untersuchungen über Gelenktransformation bei Verwendung der Methoden der Funktionskieferorthopaedie. **Dtsch. Zahn-, Mund- und Kieferheilk.** 6 : 439-448, 1939.

4. HOFFER O. and COLICO G.L. : Le modificazioni dell' A.T.M. conseguenti a spostamento mesiale della mandibola. **Rass. Inf. Stomat. Prat.** 9 : 27-40, suppl. 4, 1958.

5. DERICHSWEILER H. : Experimentelle Tieruntersuchungen über Veränderungen des Kiefergelenkes bei Bisslageveränderung. **Fortschr. Kieferorthop.** 19 : 30-44, 1958.

6. BAUME J.L. and DERICHSWEILER H. : Is the condylar growth center responsive to orthodontic therapy ? An experimental study in *Macaca mulatta*. **Oral Surg.** 14 : 347-362, 1961.



7. HINIKER J.J. and RAMFJORD S.P. : Anterior displacement of the mandible in adult rhesus monkeys. **J. Prosth. Dent.** **16** : 503-512, 1966.
8. JOHO J.-P. : Changes in form and size of the mandible in the orthopaedically treated *Macaca irus* (an experimental study). **Trans. Europ. Orthodont. Soc.** **44** : 161-175, 1968.
9. STÖCKLI P.W. and WILLERT H.G. : Tissue reactions in the temporomandibular joint resulting from anterior displacement of the mandible in the monkey. **Amer. J. Orthodont.** **60** : 142-155, 1971.
10. ELGOYHEN J.C., MOYERS R.E., McNAMARA J.A. Jr. and RIOLO M.L. : Craniofacial adaptation to protrusive function in young rhesus monkeys. **Amer. J. Orthodont.** **62** : 469-480, 1972.
11. RAMFJORD S.P. and ENLOW R.D. : Anterior displacement of the mandible in adult rhesus monkeys : long-term observation. **J. Prosth. Dent.** **26** : 517-531, 1971.
12. HURME V.O. and VAN WEGENEN G. : Basic data on the emergence of permanent teeth in the rhesus monkey (*Macaca mulatta*). **Proc. Amer. Philo. Soc.** **105** : 105-140, 1961.
13. BJORK A. : The use of metallic implants in the study of facial growth in children : method and application. **Amer. J. Physiol. Anthropol.** **29** : 243-254, 1968.
14. ELGOYHEN J.C., RIOLO M.L., GRABER L.W., MOYERS R.E. and McNAMARA J.A. Jr. : Craniofacial growth in juvenile *Macaca mulatta* : a cephalometric study. **Amer. J. Physiol. Anthropol.** **36** : 369-376, 1972.
15. KURODA T. and McNAMARA J.A. Jr. : The effect of ketamine and phencyclidine on muscle activity in non-human primates. **Anesth. et Analg.** **51** : 710-716, 1972.
16. McNAMARA J.A. Jr. : Restraint of monkeys for craniofacial research. **J. Dent. Res.** **52** : 183, 1973.
17. McNAMARA J.A. Jr. : The independent functions of the two heads of the lateral pterygoid muscle. **Amer. J. Anatol.**, in press.
18. MOYERS R.E. : Some physiologic considerations of centric and other jaw relations. **J. Prosth. Dent.** **6** : 183-194, 1956.
19. GRANT P.G. : **Biomechanical analyses of the masticatory muscles of the rhesus macaque (*Macaca mulatta*)**. Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley, 1972.
20. McNAMARA J.A. Jr. : Increasing vertical dimension in the growing face : an experimental study. **Amer. J. Orthodont.**, in press.
21. ADLER P. : Sensibility of teeth to loads applied in different directions. **J. Dent. Res.** **26** : 279-290, 1947.
22. NESS A.R. : The mechanoreceptors of the rabbit mandibular incisor. **J. Physiol.** **126** : 475-493, 1954.
23. FISH, S.F. : The respiratory associations of the rest position of the mandible. **Brit. Dent. J.** **116** : 149-159, 1964.
24. BOSMA J.F. : Human infant oral function. In : **Symposium on Oral Sensation and Proprioception**, J.F. Bosma, Charles C. Thomas, édit., Springfield, 111., 1967.
25. CHARLIER J.-P. : Les facteurs mécaniques dans la croissance de l'arc basal mandibulaire à la lumière de l'analyse des caractères structuraux et des propriétés biologiques de cartilages condyliens. **Orthodont. Franç.** **38** : 177-186, 1969.
26. PETROVIC M.A. and STUTZMANN J. : Le muscle ptérygoïdien externe et la croissance du condyle mandibulaire. Recherches expérimentales chez le jeune rat. **Orthodont. Franç.** **43** : 271-285, 1962.

27. CHARLIER J.-P. and PETROVIC A. : Recherches sur la mandibule de rat en culture d'organes : le cartilage condylien a-t-il un potentiel de croissance indépendant ? **Orthodont. Franç.** **38** : 165-175, 1967.
28. VOGEL G. and PIGNANELLI M. : Indagini istochimiche sull' articolazione T.M. del Macacus rhesus in corso di trattamento gnato-orthopedico. **Rass. Inf. Stomat. Prat.** **9** : 46-50, suppl. # 4, 1958.
29. CHARLIER J.-P., PETROVIC A. and HERMANN-STUTZMANN J. : Effects of mandibular hyperpropulsion on the prechondroblastic zone of young rat condyle. **Amer. J. Orthodont.** **55** : 71-74, 1969.
30. ENLOW D.H. : **The Human Face**. Hoeber Medical Division, Harper and Row, édit., New York, 1968.
31. BOOS R.H. : Intermaxillary relation established by biting power. **J. Amer. Dent. Ass.** **27** : 1192-1199, 1940.
32. CRAWFORD, G.N.C. : An experimental study of muscle growth in the rabbit. **J. Bone et Joint Surg.** **36B** : 294-303, 1954.
33. ENLOW D.H. : Functions of the Haversian system. **Amer. J. Anat.** **110** : 269-306, 1962.
34. HOYTE D.A.N. and ENLOW D.H. : Wolff's law and the problem of muscle attachment on resorptive surfaces of bone. **Amer. J. Physiol. Anthropol.** **24** : 205-214, 1966.