

EFFET DU DEPLACEMENT ARTIFICIEL DU CENTRE DE GRAVITE
DE LA TÊTE DU BABOUIN SUR LE COMPORTEMENT DYNAMIQUE
DU SYSTEME TÊTE-COU LORS D'UN CHOC FRONTAL (- Gx)

BIARD R., CHAPON A., MARTIN F., et VERRIEST J.P.

ONSER - Laboratoire des Chocs - Bron- FRANCE

INTRODUCTION

Dans le but de mieux connaître le comportement dynamique du système tête-cou, un programme d'étude sur sujets vivants, visant notamment à préciser le rôle de la musculature au cours d'un choc, a été entrepris au laboratoire des chocs de l'ONSER. L'expérimentation sur l'homme présentant toujours des risques, c'est l'animal, en l'occurrence le babouin, qui a été choisi comme sujet d'expérience. Outre le problème général de l'extrapolation à l'homme des résultats obtenus sur l'animal, sur le plan purement mécanique, on devait s'attendre à trouver des différences de comportement entre l'homme et le babouin, étant donné la morphologie particulière de la tête de ce dernier. En fait, dans une situation de choc frontal, qui a été assez bien décrite pour l'homme (cf EWING et THOMAS 1973 ; MERTZ et PATRICK, 1971 ; par exemple), on trouve notamment un mouvement d'extension de la tête qui n'apparaît jamais chez l'homme, volontaire ou cadavre. (cf VERRIEST et Al 1975 ; dans la suite de l'article, il sera fait référence à ce travail sous le nom d'étude/essais SMN). On retrouve ce mouvement, certes moins apparent, en raison des conditions expérimentales différentes, dans les résultats de CLARKE, (1972) obtenus également sur babouin.

Parmi les hypothèses tentant d'expliquer ce phénomène, la plus plausible semblait être celle tenant compte de la position particulière du centre de gravité de la tête chez le babouin. Celui-ci se trouve en effet, repoussé très en avant de l'axe de rotation de la tête sur le cou, alors que chez l'homme il est pratiquement sur la même verticale que cet axe. Il semblait intéressant de vérifier cette hypothèse en soumettant aux mêmes chocs frontaux des babouins dont le centre de gravité de la tête aurait été déplacé artificiellement, et ramené dans une position comparable à celle qu'il occupe chez l'homme. De plus, on disposerait ainsi d'un meilleur substitut de l'homme pour explorer d'autres situations expérimentales, comme les chocs latéraux, qui n'ont pas encore été étudiées avec des volontaires en raison de leur caractère particulièrement agressif.

On a donc déplacé le centre de gravité de la tête d'un babouin vivant par l'adjonction d'une masse de plomb fixée directement sur le crâne. Puis on a soumis ce babouin à des essais de chocs frontaux dans des conditions similaires à celles des essais SMN.

I - MATERIEL ET METHODES

I - 1 : Détermination de la valeur et de la localisation de la masse additionnelle

Connaissant la position du centre de gravité de la tête par rapport au plan de Francfort, (F.P.), d'après le travail de WALKER (1973) pour l'homme, et d'après une mesure sur tête isolée, pour le babouin (cf étude SMN), les coordonnées de ce centre de gravité ont été calculées par rapport à un repère horizontal. Celui-ci est défini par son origine située au condyle occipital (O₂) et par l'intersection du plan sagittal avec le plan horizontal (HP) passant par O₂, quand la tête est en position normale, le sujet étant assis. Cette position a été repérée par radiographie.

Ensuite la valeur et la position de la masse ont été déterminées sachant que celle-ci devait être fixée à la surface du crâne, et devait déplacer le centre de gravité de telle sorte qu'il vienne occuper approximativement la même position que chez l'homme. Il est apparu qu'une masse environ égale à 60 % de la masse de la tête, localisée dans la région occipitale, permettait d'approcher de façon satisfaisante la position voulue (cf fig 1). La masse de la tête ainsi que la position du centre de gravité de la tête du babouin utilisé pour l'expérimentation ont été évaluées par extrapolation à partir des données obtenues sur le cadavre d'animal. La masse additionnelle a été évaluée à 700 g pour une tête de 1200 g.

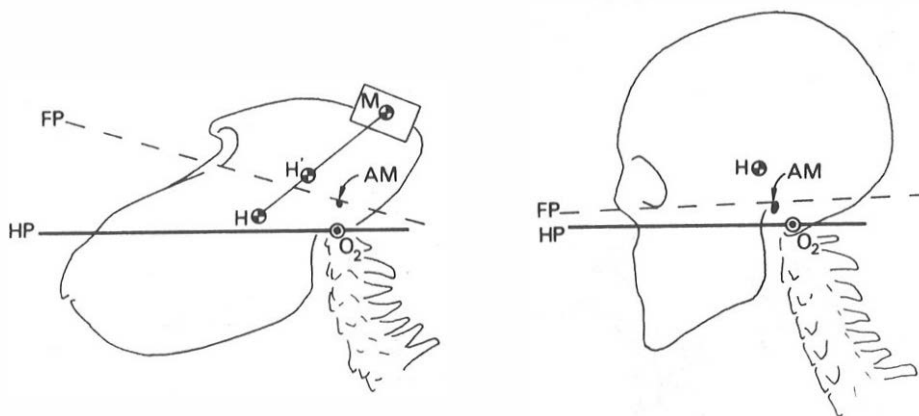


Fig 1 : par rapport au plan de Francfort (FP)
Position du centre de gravité de la tête (H) chez l'homme et chez le babouin,
avant et après adjonction de la masse M (AM = Meat auditif)

I - 2 : Fixation de la masse

Il fallait trouver un moyen de solidariser parfaitement au crâne de l'animal, une masse de 700 g, de façon à ce que la fixation ne cède pas sous l'effet de la décélération, mais aussi, de telle sorte qu'on puisse poser et déposer cette masse facilement. Pour cela, une plaque d'acier inoxydable adaptée à la courbure de la voûte du crâne a été vissée sur les os pariétaux et frontal (fig 2). Cette plaque est équipée de deux écrous qui reçoivent deux goujons qui servent à fixer la masse et une extrémité du support des accéléromètres. Les masses utilisées sont constituées par des feuilles de plomb incurvées.

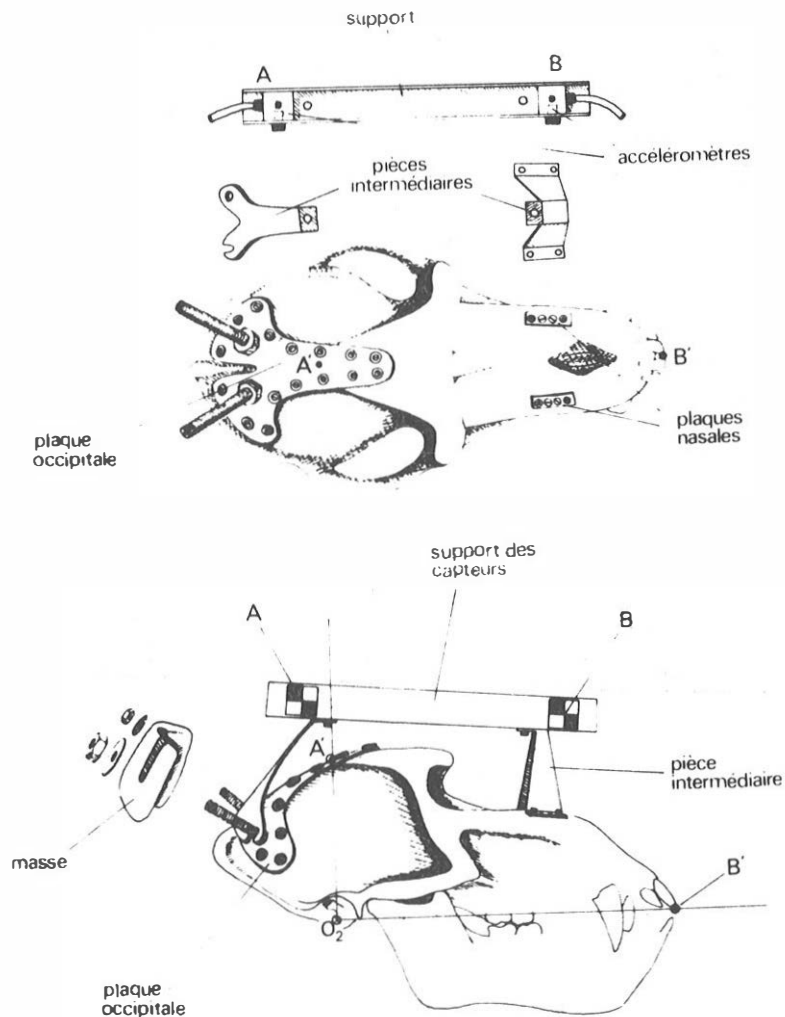


Fig 2 : Fixation de la masse additionnelle et des capteurs sur le crâne du babouin (distance AB = 10 cm)

I - 3 : Production du signal d'accélération

Le banc d'essais dynamiques permettant d'appliquer la décélération au corps de l'animal, a été décrit en détail précédemment (cf étude SMN). Rappelons qu'il est constitué par un chariot auquel est solidarisé le corps de l'animal au moyen d'un plastron de contention. Ce chariot est mis en vitesse par un système de propulsion à volant d'inertie et décéléré au moyen d'un système d'arrêt permettant de produire des décélérations d'amplitude et de durée variables. Les essais présents ont été réalisés à 30 km/h ; les décélérations, en forme d'arche de sinus, atteignaient un maximum de 20 G pour une durée moyenne d'environ 65 ms.

I - 4 : Acquisition des données cinématiques

Comme pour les essais SMN, les mouvements se déroulant dans le plan sagittal, le déplacement et l'accélération ont été mesurés en deux points A et B de la tête.

Accélérométrie

Les composantes de l'accélération de la tête ont été mesurées au moyen de deux accéléromètres triaxiaux (ENTRAN DEVICE type E.G.I. 3-160-250 G) fixés sur un support en duralumin. Ce support était fixé sur le crâne au moyen de pièces métalliques intermédiaires, d'un côté, sur la plaque occipitale et, de l'autre, sur des plaques vissées sur les crêtes nasales (cf fig 2).

Cinématographie

Les mouvements de la tête, figurée par les mires A et B, ont été filmés à la cadence de 2000 images par seconde, au moyen d'une caméra HITACHI, type 16 HM, dont l'axe de prise de vue était perpendiculaire au plan sagittal de l'animal. Une deuxième caméra dont l'axe de prise de vue était vertical, permettait de contrôler la planéité des mouvements.

I - 5 : Sujets d'expérience

Un babouin mâle de 13,5 kg a été utilisé pour cette première tentative. Pour la préparation, l'animal était anesthésié à la KETAMINE (10 mg par kg) associée à un tranquillisant, dont le rôle est d'atténuer l'hypertonie que provoque cette drogue.

I - 6 : Traitement des données

Les résultats de ces essais ont été analysés en faisant appel à la représentation simplifiée du système tête-cou, qui a été décrite dans l'étude SMN. Rappelons qu'il s'agit d'un système comportant deux chaînons rigides figurant l'un, la tête, l'autre, le cou, articulés entre eux et avec le thorax en O1 (7e vertèbre cervicale) et en O2 (condyle occipital). De façon à pouvoir comparer ces essais avec ceux réalisés précédemment, les déplacements ont été exprimés sous forme des trajectoires relatives de O2, de A' (extrémité des incisives supérieures) et de B' (point situé à la surface du crâne au vertex, O2B' étant perpendiculaire à O2A' - cf fig 2) par rapport au thorax. Ces trajectoires ont été calculées à partir de celles de A et de B. Les déplacements angulaires sont donnés par rapport à la verticale, par θ_1 , pour le cou (O1O2) et par θ_2 pour le

chaînon tête (O2A'). Les composantes de l'accélération en A et en B ont servi à calculer la résultante au centre de gravité et en O2, ainsi que l'accélération angulaire de la tête.

Tous ces calculs ont été effectués sur ordinateur (IBM 1130) à partir des données discrétisées et perforées sur cartes.

II - RESULTATS

Au total, 13 essais ont été réalisés pour cette première tentative. La masse a été ajoutée progressivement au fur et à mesure des essais : 250 g puis 400, 500, 550, 650 et 700 g.

II - 1 : Analyse des trajectoires (cf fig 3)

Les trajectoires de O2, A' et B' sont curvilinéaires et, pour chacune, on distingue une phase de flexion suivie d'une phase d'extension. D'une façon générale, pour un point donné, le trajet correspondant à la flexion est toujours situé plus en avant que celui de l'extension. L'ensemble trajet flexion + trajet extension forme une boucle dont la surface est maximale pour B'. Cette boucle s'explique, en partie, par la combinaison des deux mouvements de rotation autour de O1 et de O2 mais, pour O2, il s'agit en fait de la conséquence du déplacement du thorax, et donc de O1, par rapport au plastron. Ceci avait déjà été noté pour les essais SMN.

D'un autre point de vue, selon qu'il y a ou non une masse fixée sur la tête, les trajectoires sont différentes. En l'absence de masse, les trajectoires sont courtes ; mais surtout, le début du trajet de B' est horizontal. Comme O2, lui, se dirige vers le bas, la tête décrit donc un mouvement d'extension. Par contre, lorsque la tête est chargée, les trajectoires s'allongent et cette phase d'extension n'apparaît pas. Entre les différentes valeurs de masse il est difficile d'établir une distinction du point de vue des trajectoires.

II - 2 : Déplacements angulaires

- 81

Les courbes présentées sur la fig 4 montrent tout d'abord, une phase de flexion, qui est maximale à environ 70 ms, suivie d'une extension qui dépasse la position initiale. On distingue une nette différence sur les courbes, entre la tête chargée et la tête seule. Pour cette dernière, l'amplitude est nettement moins élevée et la pente, qui représente la vitesse angulaire, est bien moins grande que pour les autres courbes. Le maximum est également légèrement plus tardif (80ms).

- 82 (fig 5)

Les courbes correspondant à la tête chargée débutent toutes par une flexion après 30 ms, environ, pendant lesquelles 82 reste quasiment constant. Cette première phase correspond à la translation de la tête, décrite par de nombreux auteurs. La fin de la phase de flexion est très nette car la tête heurte, à ce moment (65 - 70 ms), le plastron de contention.

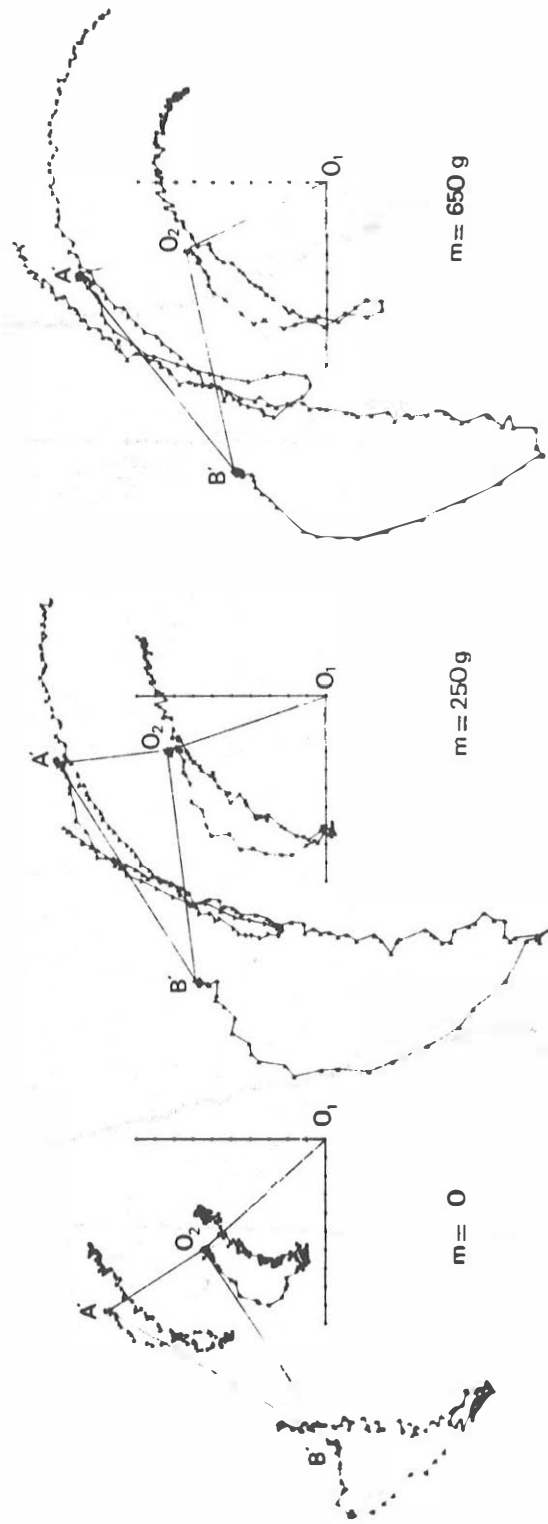


Fig 3 : Trajectoire de O_2 , A' et B' par rapport à O_1 pour 3 essais réalisés avec des masses différentes; le triangle indique la position de départ (échelle : 1cm/div)

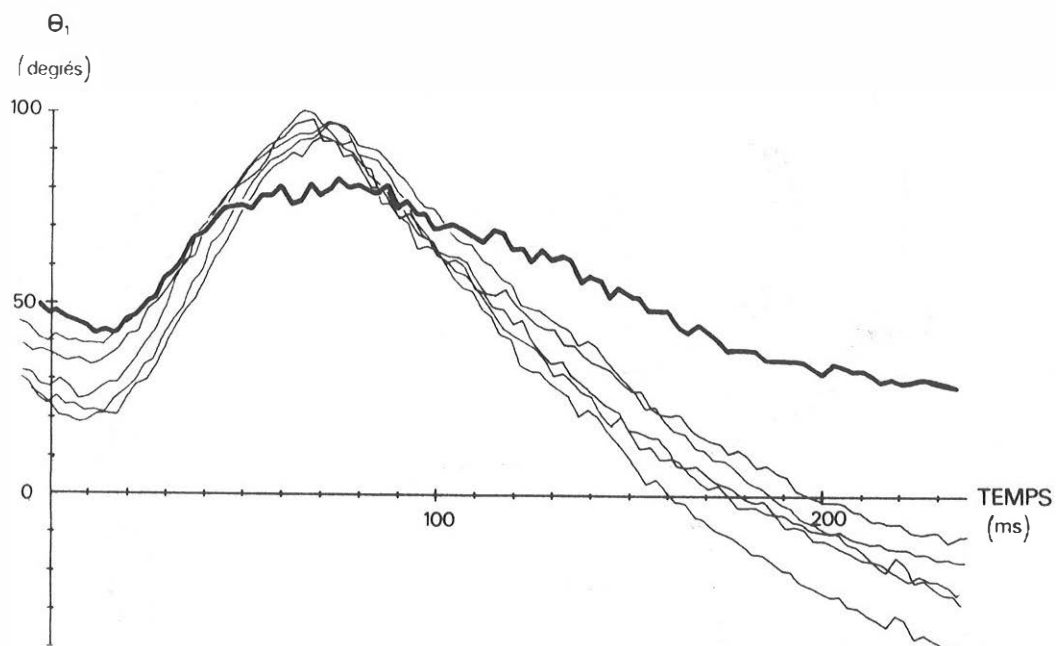


Fig 4 : Courbes de θ_1 en fonction du temps pour 5 essais avec masse de 250, 400, 500, 550 et 650 g (traits fins) et un essai sans masse (trait gros)

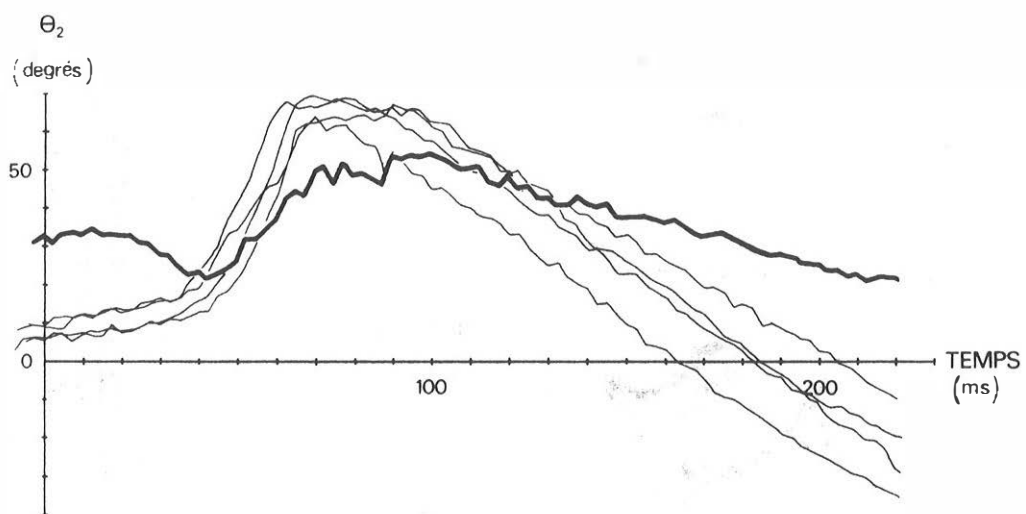


Fig 5 : Courbes de θ_2 en fonction du temps pour 4 essais avec masse de 250, 400, 500 et 650 g (traits fins) et pour 1 essai sans masse (trait gros)

Quand la tête n'est pas chargée, le mouvement débute par une extension ; ce qui confirme ce qui a été observé sur les trajectoires. Cette extension est maximale à 40 ms, puis elle est suivie d'une flexion dont la pente est beaucoup moins raide que pour les autres courbes. La flexion maximale est atteinte environ 80 à 90 ms après le début du choc. La pente du retour en extension est également beaucoup moins raide, et le sommet de flexion est beaucoup moins marqué.

II - 3 : Analyse des accélérations

- Résultante en O2 (fig 6)

On constate une remarquable superposition des courbes d'accélération, à quelques écarts près, en dépit de la variation de la valeur de la masse. Le pic qui survient à 65 ms est dû à l'impact de la tête sur le plastron. Son amplitude n'a aucune signification propre. Lorsque la tête n'est pas chargée, la courbe est très légèrement différente des autres. On remarque surtout que le pic correspondant à l'impact est plus tardif.

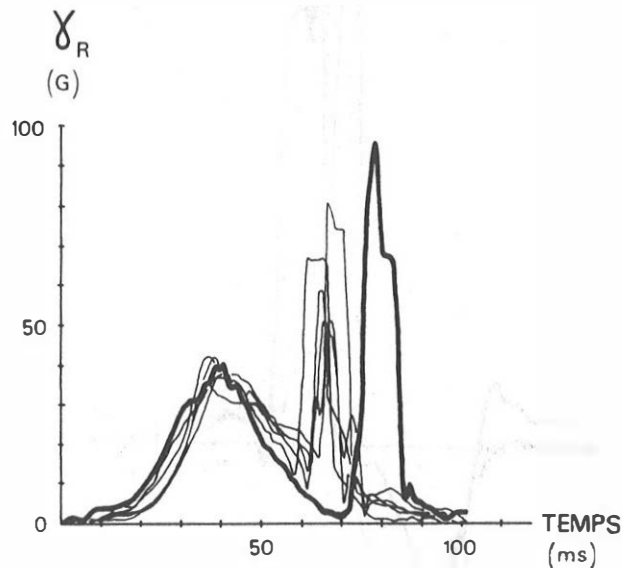


Fig 6 : Courbes de la résultante R de l'accélération en O2 en fonction du temps (mêmes essais que pour la fig 4)

- Accélération angulaire de la tête $\ddot{\theta}_2$ (fig 7)

Contrairement à ce qui a été noté pour la résultante, les courbes sont différentes selon que la tête est chargée ou non. Les écarts entre les diverses courbes pour la tête chargée sont faibles et, en tous cas, il n'est pas possible de mettre en évidence un effet de la valeur de la masse. Pendant les premières 25 ms environ, $\ddot{\theta}_2$ reste pratiquement nul ; c'est la phase de translation qui a été notée sur les courbes de θ_2 . Ensuite, l'accélération devient positive ; cette phase correspond à la flexion de la tête. La valeur maximum, soit environ 2000 rad/s², est atteinte entre 40 et 50 ms après le début du choc. Puis survient le pic correspondant à l'impact. Là également, l'amplitude n'a aucune signification propre. Après cet impact, $\ddot{\theta}_2$ est négatif mais reste faible ; autrement dit,

c'est la phase d'extension.

En l'absence de charge, pendant les 30 premières millisecondes, l'accélération est négative ; ce qui correspond à une extension (-800 rad/s² pour le minimum). Ensuite, la courbe s'inverse et suit sensiblement le même chemin que les précédentes, bien qu'elle soit plus pointue. Le pic d'impact est plus tardif, comme pour la résultante. Pour tous les essais, le sommet de la courbe d'accélération correspond à l'extension maximale de la tête sur le cou.

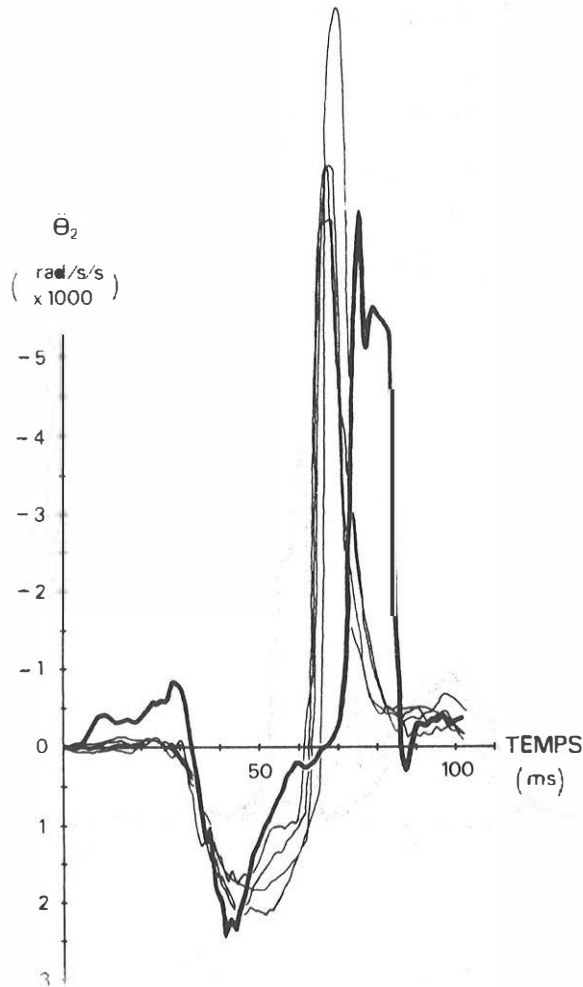


Fig 7 : Courbes de l'accélération angulaire $\ddot{\theta}_2$ de la tête en fonction du temps (mêmes essais que pour la fig 5)

DISCUSSION

Il avait déjà été noté pour les essais SMN, que les trajectoires de O2 étaient assez différentes d'un arc de cercle centré sur O1. On retrouve cette anomalie dans les résultats présents. Seul un mouvement propre de O1, c'est à dire du thorax par rapport au plastron, peut expliquer de telles variations de la longueur O1 - O2. Mais, actuellement, la mesure des déplacements de O1,

qui permettrait de corriger le calcul des trajectoires de O2, parait difficile à réaliser sur l'animal vivant. En raison de ce mouvement de O1, les valeurs de B1 sont donc affectées d'une certaine erreur.

L'adjonction d'une masse sur la tête du babouin modifie la cinématique de celle-ci. Mais, pourtant, la valeur de cette masse semble n'avoir qu'une importance très réduite. En fait les seules modifications importantes qui ont été observées, tant sur les trajectoires que sur les courbes d'accélération ou de déplacement angulaire, apparaissent lorsqu'on passe de 0 à 250 g. Au delà de cette valeur, d'une masse à l'autre, les modifications sont trop peu importantes pour pouvoir être dégagées des variations dues à des facteurs divers tels que la réactivité de l'animal, le niveau d'anesthésie, la position initiale, etc... De plus, pour la résultante de l'accélération en O2, l'effet de la masse n'est pratiquement pas perceptible. En fait, du point de vue global, si l'on assimile l'ensemble tête cou à un système masse-ressort-amortisseur, la rapidité de la réponse, caractérisée par la période des oscillations propres, varie comme la racine carrée de la valeur de la masse. Par exemple, pour un accroissement de 60 % de la masse de la tête ($m = 650$ g), le temps de réponse s'accroît d'environ 25 %. C'est dire que de faibles variations de masse n'entraîneront que de minimes modifications du temps de réponse. Ceci est en accord avec les résultats de MERTZ et PATRICK obtenus sur volontaires avec des masses additionnelles atteignant 15 % de la masse totale de la tête. Toutefois la force d'inertie est augmentée et, par conséquent, il est plus difficile de freiner le mouvement de la tête qui décrit donc une course plus longue, surtout en extension.

Si la résultante de l'accélération varie peu, par contre, l'accélération angulaire est sensible à la présence de la masse. Cette accélération angulaire est déterminée par le couple engendré par la force d'inertie ($-m\gamma$) d'une part, et par la résultante des forces résistantes de la liaison tête thorax (R), d'autre part. Si ce couple varie, c'est que, soit la direction des forces, soit leur point d'application changent. La force d'inertie et la résultante des forces résistantes sont égales et opposées et peuvent être évaluées à partir des composantes de l'accélération. Le point d'application de la résultante peut être localisé au condyle occipital et supposé fixe. Le point d'application de la force d'inertie est le centre de gravité. On a donc tracé pour deux essais correspondant à deux situations extrêmes ($m = 0$ et 650 g) les vecteurs représentant ces forces appliquées à la tête (cf fig 8) à différents instants des mouvements.

Lorsque la tête n'est pas chargée, on peut voir que les forces $-m\gamma$ et R déterminent tout d'abord un couple d'extension jusqu'à 30 ms, puis, qu'à 40 ms, ce couple s'inverse. Lorsque la tête est chargée, les forces gardent sensiblement la même direction que précédemment, mais, par contre, la position du centre de gravité est telle que le couple qui en résulte est toujours dans le même sens ; c'est à dire la flexion.

Il est probable que la masse de 250 g provoque un déplacement suffisant du centre de gravité pour pouvoir observer ce phénomène. Mais dans la mesure où le sujet d'expérience n'a pas été sacrifié il n'a pas été possible de déterminer la position du centre de gravité avec précision.

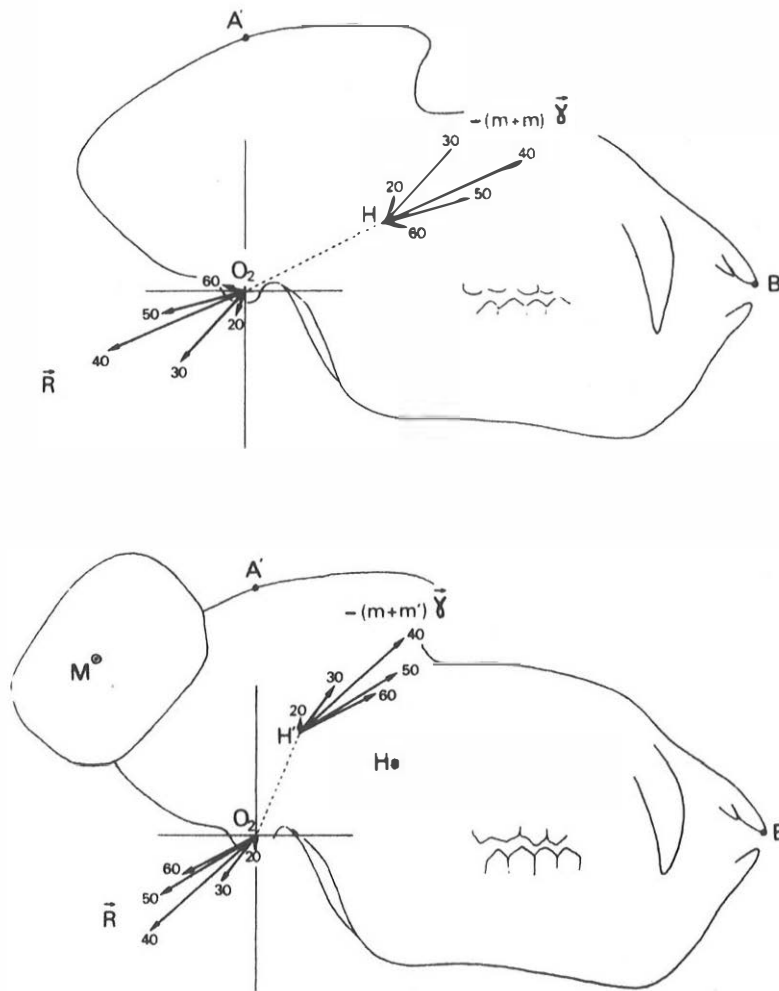


Fig 8 : Couple formé par la force d'inertie de la tête ($-m\gamma$ ou $-(m+m')\gamma$) et par la résultante des forces résistantes (R).
En haut : Essai sans masse En bas : Essai avec 650 g (voir explication texte)

Ces résultats demandent bien sûr à être confirmés grâce à une mesure précise de la position du centre de gravité sur l'animal sacrifié et par d'autres essais réalisés sur un plus grand nombre de sujets. Néanmoins il semble que l'hypothèse énoncée au départ soit vérifiée.

CONCLUSION

L'expérimentation réalisée a permis de montrer qu'en fixant dans la région occipitale de la tête du babouin une masse, même faible (250 g, soit 15 % de la masse de la tête) on déplace suffisamment le centre de gravité de la tête pour que la cinématique du système tête-cou soit modifiée. En particulier, on supprime le mouvement initial d'extension de la tête, caractéristique du babouin, qui n'apparaît jamais chez l'homme.

Au delà de 250 g et jusqu'à 700 g (60 % de la masse de la tête), la valeur de la masse n'a quasiment aucun effet sur la cinématique.

On dispose ainsi d'un modèle vivant de l'homme dont le comportement est plus proche de celui du volontaire. Le babouin reste néanmoins assez différent de l'homme et il subsiste de nombreux problèmes à résoudre. Par exemple, si l'importance des maxillaires peut être compensée par l'adjonction d'une masse, en ce qui concerne le centre de gravité, ceux-ci restent gênants, notamment en choc frontal, en raison du rôle de butée qu'ils jouent lors de la flexion.

Cette étude qui doit se poursuivre par l'examen de situations de chocs non frontaux constitue un élément de l'approche multimodèles de la connaissance du comportement humain lors d'un choc.

BIBLIOGRAPHIE

CLARKE, T.O., SMEOLEY, O.C., MUZZY, W.H., GRAGG, C.O., SCHMIDT, R.E., TROUT, E.M.
Impact tolerance and resulting injury patterns in the baboon : Air Force Shoulder
Harness - lap belt restraint.
Proc. 16th Stapp car crash conf. pp 365-411. SAE New York

EWING, C.L., THOMAS D.J. (1973)
Torque versus angular displacement response of human head to -Gx impact
acceleration
Proc. 17th Stapp car crash conf. pp 309-342 SAE Edt.

MERTZ, H.J., PATRICK, L.M. (1971)
Strength and response of the human neck.
Proc. 15 th Stapp car crash conf. pp 207-255 SAE New York

VERRIEST, J.P., MARTIN, F., VIVIANI, P. (1975)
Changes in the dynamic behaviour of the baboon's head and neck system subjected
to a frontal deceleration (-Gx) related to the action of cervical muscles.
Proc. 2nd IRCOBI Meeting - Birmingham sept 9-11 1975

WALKER, J.B., HARRIS, E.H., PONTIUS, U.R. (1973)
Mass, volume center of mass and mass moment of inertia of head and head and
neck of human body
Proc. 17th Stapp car crash conf. pp 525-537 SAE New York