

ETUDE BIOMECHANIQUE DU GESTE D'AVIRON

ETUDE BIOMECANIQUE DU GESTE D'AVIRON

Résumé :

L'étude de la biomécanique du geste d'aviron avait pour objet de préciser : la nature des mouvements articulaires, les muscles agonistes et antagonistes, les cinétiques gestuelles et les modalités du travail musculaire lors du coup d'aviron. Elle s'est intéressée au geste d'aviron dans sa globalité, puis successivement aux membres inférieurs, aux membres supérieurs, au rachis et au bassin (articulations ilio-fémorales et sacro-lombaires).

La démarche d'étude était celle d'une synthèse bibliographique.

Au plan biomécanique, exception faite de l'hyper-flexion rachidienne à la prise d'eau, l'étude du geste n'a pas mis en évidence de mouvements d'amplitude extrême ou de positions traumatisantes des articulations.

L'ensemble a permis de mettre en évidence la complexité et l'importance des sollicitations neuro-musculaires.

Au plan neurologique, il ressort que les mouvements articulaires simples du geste d'aviron, font l'objet d'une synchronisation et d'une coordination tant inter-qu'intra-musculaire très complexe faisant largement appel à des régulations proprioceptives. L'ensemble permet l'exécution de mouvements explosifs freinés ou accélérés avec des inversions des orientations des contraintes quasi instantanées.

Au plan musculaire, l'importance de la force masque la complexité du travail musculaire qui peut être indifféremment concentrique explosif, isométrique, ou excentrique selon le faisceau musculaire ou les phases gestuelles. L'ensemble implique un haut niveau de développement de la masse musculaire mais également un développement qualitatif spécifique.

L'étude des phases du travail neuro-musculaire du geste d'aviron montre des changements très violents des régimes de contraction ou des sens de mouvement et l'absence de temps d'arrêt ou de relâchement au cours du geste global.

Il s'établit une véritable chaîne musculaire entre la planche de pied et la poignée de l'aviron, dont le rôle est non seulement de générer les contraintes et les mouvements mais également d'en harmoniser et d'en réguler le développement de manière à en optimiser les effets sur la vitesse de la coque.

Dans ce cadre, la fixation et le contrôle précis des articulations du rachis et du bassin sont des éléments déterminants de la qualité technique et de l'efficacité gestuelle du rameur.

L'harmonisation des tensions et des mouvements rachidiens et pelviens implique largement le contrôle proprioceptif par un ensemble de régulations et de coordinations neuro-musculaires très précises qui sont autant d'enjeux pour la performance et la prévention des risques lombalgiques.

B- ETUDE BIOMECHANIQUE DU GESTE D'AVIRON

Le chapitre précédent a mis en évidence l'importance des sollicitations biologiques dues à la pratique de l'aviron de compétition. Les principales caractéristiques physiologiques et locomotrices de cette activité et leurs conséquences pour le pratiquant ont été dégagées.

Le présent chapitre analyse très en détail l'aspect biomécanique et neuromoteur du geste d'aviron au travers d'une étude bibliographique. Cette étude est originale puisque d'aucune étude détaillée et complète de ces aspects n'a été trouvée dans la littérature. La plupart des auteurs abordent la biomécanique du geste d'aviron de façon globale ou au contraire ne travaillent que sur un segment corporel ou une phase du coup d'aviron. C'est pourquoi, il était nécessaire d'effectuer un travail de synthèse des données, dont les résultats seront présentés en 5 chapitres :

- Le premier chapitre portera sur la globalité du geste.
- Les chapitres suivants analyseront successivement : le travail des membres inférieurs, des membres supérieurs, du tronc et le rôle du bassin. Dans chacune de ces 4 parties les mouvements des segments, les muscles agonistes et antagonistes, la cinétique du mouvement et les modalités des contractions musculaires seront détaillés.

L'ensemble de ce travail doit faire ressortir le rôle joué par le rachis notamment au niveau des charnières sacro-lombaire et dorso-lombaire, et poser les bases de l'analyse des problèmes lombaires dans la pratique de l'aviron.

I- ETUDE GLOBALE DU GESTE DU RAMEUR :

(dans la suite de l'exposé la technique de la couple sera prise pour référence)

1- Description globale : On décrit le geste d'aviron au travers de 4 phases : (figure 2) (40, 41)

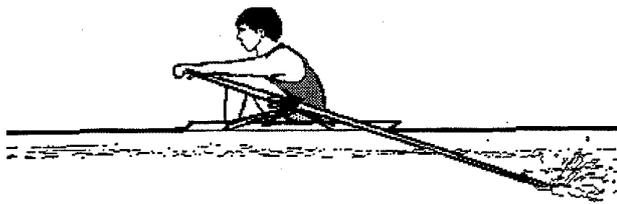
- La *PROPULSION* : correspond à la phase de propulsion, les rames sont immergées en appui dans l'eau. Le rameur effectue un mouvement d'extension des membres inférieurs associé à une flexion des membres supérieurs. En couple la pelle balaye un angle de 30 à 130° par rapport à l'axe du bateau (35 à 125° en pointe) (40, 41, 43).
- Le *DEGAGE* : correspond à la sortie des rames de l'eau et à l'inversion du mouvement du corps. Le rameur abaisse les mains et tend rapidement les bras. Simultanément il provoque la rotation de la pelle (mise à plat de la palette) (40, 41, 44).
- Le *RETOUR* : correspond à la phase de retour de la position « arrière » de fin de phase aquatique à la position « avant » permettant la prise d'un nouvel appui. La pelle est émergée et le bateau est déplacé par l'inertie du mouvement (40, 41, 45).
- La *PRISE D'EAU* : correspond à la seconde inversion du mouvement. Il y a rotation de la pelle et ouverture de l'angle bras/tronc par une élévation des bras qui immerge la palette (40, 41, 42).

2- Mécanique du geste :

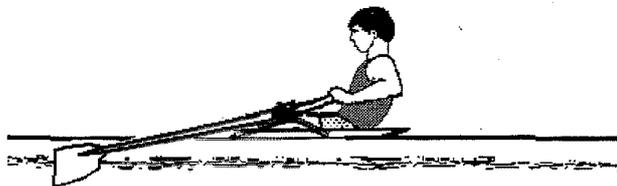
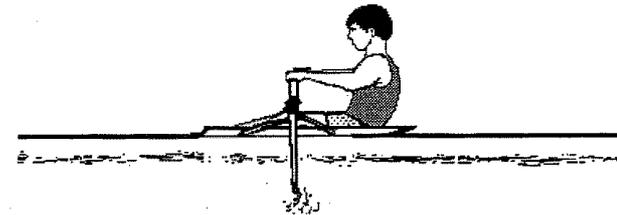
Mécaniquement le rameur exerce une traction sur la poignée (extrémité des rames) avec les mains et simultanément une poussée inverse sur la coque avec les pieds (40, 41). La force développée par les jambes est transmise par le tronc jusqu'aux rames. Les avirons se comportent comme des leviers inter-résistants qui transmettent à la coque, par l'intermédiaire de l'axe de la dame de nage, le mouvement appliqué par le rameur sur la poignée (26, 40, 41, 84, 120).

Figure 2 : LE GESTE D'AVIRON : VUE GLOBALE

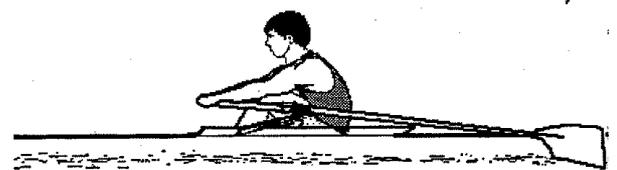
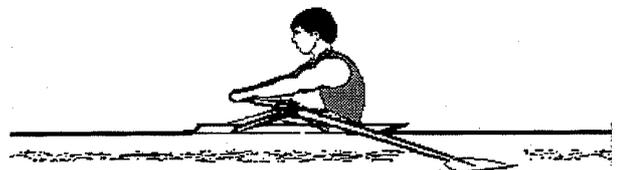
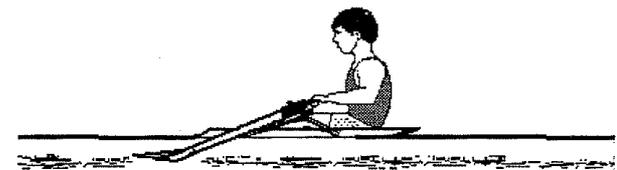
d'après document fédéral (40, 41)



Inversion avant : PRISE D'EAU



Inversion arrière : DEGAGE



PROPULSION

RETOUR

L'ensemble du geste s'effectue dans un plan horizontal, en position assise et en chaîne fermée. Les pieds sont fixés au bateau à un angle d'environ 45° sur l'horizontal, ils constituent un point d'appui ^(26, 40, 41, 95, 120).

Les fesses reposent sur un chariot (coulisse) se déplaçant sur des rails pratiquement horizontaux calés 17cm au dessus des talons.

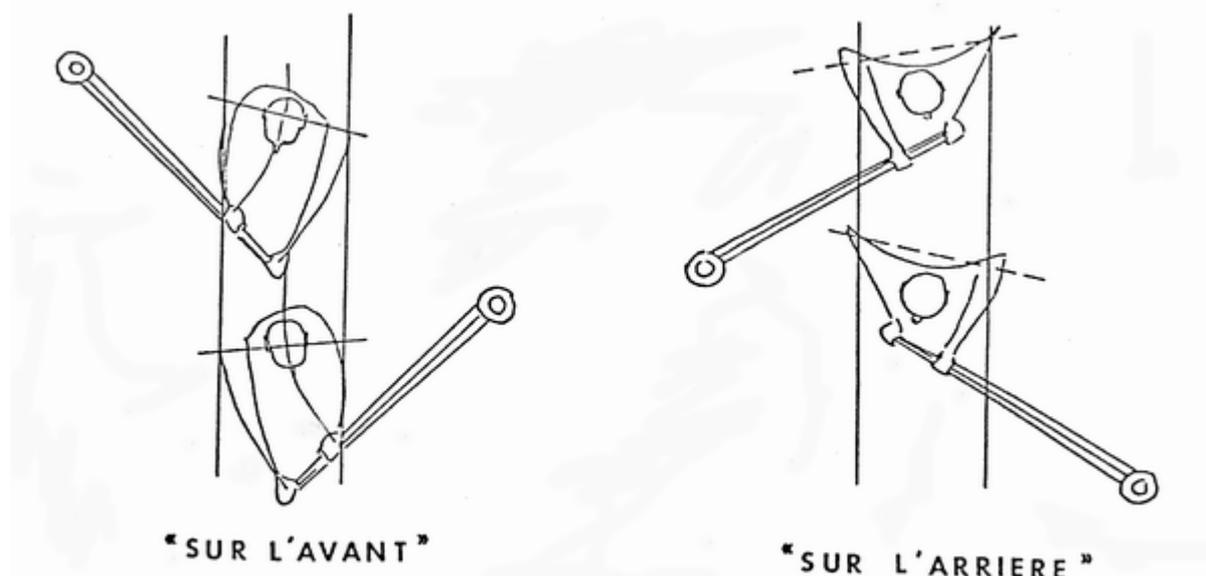
Les mains du rameur tiennent l'extrémité de la ou des rames (aviron ou pelle).

L'aviron est lié au bateau par un système (dame de nage) mobile autour d'un axe vertical.

Lors de la phase de propulsion, la pelle est en appui dans l'eau. Ce point d'appui est considéré comme « fixe », en effet l'amplitude du recul de la palette dans l'eau (perte d'appui), est d'autant plus faible que la technicité du rameur est élevée ^(23, 26, 40, 41, 120).

En pointe le geste du rameur suit la rotation de l'aviron en effectuant un arc de cercle autour du système (figure 3).

Figure 3 : LE MOUVEMENT DE LA POINTE



3- Dynamique du geste :

Les fondements mécaniques du geste d'aviron ont été très largement étudiés par les travaux de Sanderson et Martindale ⁽¹²⁰⁾, Millward ⁽⁹²⁾, Martin et Bernfield ⁽⁸⁷⁾ tant au niveau des forces appliquées qu'en terme de vitesse et d'énergie développées.

+ La dynamique globale du geste du rameur est un mouvement cyclique sans temps d'arrêt.

+ La fréquence gestuelle est de 18 à 20 coups par minute à l'entraînement et de 36 à plus de 42 coups par minute en compétition (100 à 120 coups par kilomètre) ^(40, 41).

+ L'amplitude moyenne du déplacement de la coque par coup est d'environ 9m. Colou ⁽²⁶⁾ montre que le déplacement de la coque lors de la phase de propulsion représente 4.74m (3.49 à 5.51m) pour un déplacement du centre de gravité du rameur de 60 à 70cm.

+ A vitesse de compétition le geste dure environ 1,63 secondes (**) et la phase aquatique représente environ 50% du temps total (0.65 à 0.75 secondes (**)).

+ Les rapports entre la durée de la phase aquatique et celle du retour sont fonction de nombreux paramètres. A cadence basse (18 à 20 cps/mn), la durée de la phase aquatique reste proche de celle de compétition, mais celle du retour est doublée ^(26, 40, 41, 46, 116). Les études de Celentano ⁽²³⁾ montrent que l'efficacité du coup d'aviron augmente avec la vitesse de la phase aquatique. Millward ⁽⁹²⁾ montrent que la vitesse de la coque dépend de la cinétique du développement de la force (forme de la courbe) et du rapport entre la durée du retour et celle du coup.

Martin ⁽⁸⁷⁾ confirme que l'augmentation de la vitesse de coque est obtenue par l'augmentation de la force appliquée lors de la propulsion mais surtout par l'application de cette force sur un plus grand pourcentage de temps dans le coup d'aviron. C'est pourquoi la durée relativement constante de la phase aquatique chez les athlètes de Haut Niveau quelle que soit la fréquence, est l'expression de la limite des vitesses de contraction musculaire facteur limitant de l'augmentation de la cadence. En ce sens, la durée de la propulsion est l'expression d'une adaptation aux capacités neuro-motrices du rameur. Les études de Wing ⁽¹⁵⁷⁾ et de Henry ⁽⁶³⁾ ont confirmé l'existence d'une limite dans la capacité de développement du coup d'aviron qui dépend de la synchronisation des contractions musculaires et de la vitesse de développement de la force par les membres inférieurs, et implique une grande précision.

+ La vitesse moyenne des bateaux (skiff) sur 2000m avoisine les 5m/s, mais la vitesse instantanée n'est pas linéaire au cours du coup d'aviron et varie de 5.95 à 4.20m/s ^(26, 40, 41, 69, 84). Elle est maximale après le décollage à la moitié du retour de la coulisse et minimale après la prise d'eau à 27% du travail des jambes ⁽⁸⁷⁾. La perte d'énergie engendrée par les variations de vitesse de la coque sont très importantes, c'est pourquoi la régularité et l'inertie obtenue lors du coup d'aviron jouent un rôle majeur dans le maintien d'une vitesse homogène ^(26, 40, 41).

4- Cinétique du geste du rameur et travail musculaire :

+ Bayer ⁽⁸⁴⁾ montre l'importance de la coordination intra-musculaire dans le développement simultané d'une force explosive et d'une force endurance. Il met en évidence le rôle de la synergie inter-musculaire et l'action des antagonistes dans le contrôle des vitesses de contraction. L'ensemble confirme l'importance des coordinations neuro-motrices dans l'exécution des différentes actions musculaires.

a- Propulsion : (figure 2)

+ La cinétique globale du mouvement de propulsion est proche de celle de l'épaulé en haltérophilie ⁽⁵¹⁾. L'ensemble des segments débutent leur travail en même temps mais les actions motrices se succèdent pour additionner leurs effets. Le rendement maximal de la propulsion est atteint pour un angle de la rame de 80 à 110° par rapport à l'axe de la coque soit entre 55 et 90% de la phase aquatique ^(26, 40, 41, 102) ce qui correspond au moment où s'opère la sommation des actions des différents segments (jambes - tronc - membres supérieurs) ⁽¹⁰²⁾.

+ Les membres inférieurs jouent un rôle majeur dans la première partie de la propulsion lors du développement de la force ^(26, 40, 41, 43, 87). Les auteurs ^(40, 41, 43, 116, 131) observent que la force maximale est développée entre 20 et 50% de la phase aquatique (50° à 75°(*)). Selon Malho ⁽⁸⁴⁾ la puissance du coup d'aviron peut diminuer ensuite de 25%. Nelson ⁽¹⁰²⁾ montre que la vitesse horizontale de la rame est fonction de la vitesse d'extension du genou ⁽¹¹⁶⁾, du respect de la coordination jambes - dos et de la sommation efficace des vitesses angulaires genou - tronc ⁽¹⁰²⁾, ce qui implique une parfaite synchronisation des muscles notamment au niveau de la ceinture pelvienne.

+ Le tronc joue un rôle déterminant dans le contrôle de la phase immergée du geste et en particulier la vitesse linéaire de la rame ^(79, 30, 68). Son action prédomine jusqu'à 85% de la phase aquatique (105°(*)) ^(26, 30, 79, 154).

+ Les bras n'ont une action motrice que dans la deuxième partie de la phase aquatique (après 65% ou 88°(*)) ce qui correspond au passage des mains à hauteur des genoux ⁽²⁶⁾. Leur intervention prolonge celle des jambes et du tronc ⁽³⁰⁾, et produit une accélération maximale de la coque qui est atteinte après 80% de la phase aquatique (110°(*)) ^(26, 30, 40, 41, 43, 120, 157). L'action des bras est déterminante de la longueur du coup d'aviron ^(41, 43).

+ Colou ⁽²⁶⁾ et Lamb ⁽⁷⁹⁾ montrent que la dynamique du déplacement de chaque segment présente une accélération jusqu'à un plateau de vitesse qui s'achève par la fixation de l'articulation. Selon le segment le plateau de vitesse est obtenu pour des angles différents de la phase aquatique (*) : 75° pour le genou (50% de la phase aquatique), 88° pour la hanche (65% de la phase aquatique), 100° pour l'épaule (80% de la phase aquatique) et 110° pour le coude et la main (90% de la

phase aquatique). C'est pourquoi une coordination correcte diminue le travail individuel de chaque muscle au profit d'un travail en synergie et produit une accélération maximale de la coque (26, 40, 79, 87, 92, 115, 131).

b- Retour :

+ L'enchaînement des mouvements des segments se fait rigoureusement dans l'ordre inverse de celui de la propulsion. L'ensemble est synchronisé sur la vitesse du bateau. En effet, la cinétique du geste du retour doit être la plus contrôlée possible pour s'ajuster à la vitesse de la coque afin de ne pas perturber la glisse du bateau (maintien de la vitesse de la coque) et de préparer au mieux (pré-tension) l'inversion et l'extension explosive des jambes lors de la phase aquatique (40, 41, 45, 120).

+ La première partie ("renvoi des mains") est marquée par un remplacement rapide des bras enchaîné avec celui du tronc. La vitesse de ce mouvement est contrôlée de manière à décharger rapidement la pointe avant sans perturber la glisse du bateau.

+ La seconde partie du retour ("retour de la coulisse") correspondant à la flexion des jambes. Elle débute dès le passage des mains au dessus des genoux. Le mouvement est freiné de manière à contrôler la glisse du bateau et à réduire les variations de vitesse (41, 45). Fukunaga (49) observe que lors du retour une partie de l'énergie nécessaire au remplacement du rameur est fournie par l'énergie cinétique de la coque ce qui permet une réduction sensible du coup énergétique. Chez le bon rameur la traction sur la barre de pied participe à la glisse du bateau.

c- Inversion :

+ La prise d'eau marque le passage entre le retour et la phase aquatique. Selon le niveau du rameur, elle dure entre 0.04 et 0.1s (**). Chez le bon rameur elle est instantanée et se caractérise par la synchronisation de l'inversion du mouvement des jambes et un léger mouvement d'extension verticale des bras (immersion de la palette). Ces 2 actions se font dans des plans différents à des vitesses différentes mais en même temps (40, 41, 42).

+ Le dégagé marque le passage entre la phase aquatique et le retour. Les membres inférieurs et le tronc sont verrouillés en isométrie tandis que les membres supérieurs effectuent une inversion instantanée du mouvement. Comme pour la prise d'eau, il y a synchronisation de 2 actions motrices de cinétique différente (40, 41, 44).

5- Synthèse de l'étude globale du geste du rameur :

Les éléments clefs de la biomécanique du geste du rameur sont la coordination des actions motrices, la précision du développement de la force musculaire, et la maîtrise d'une vitesse d'exécution optimale des mouvements.

L'ensemble confirme le rôle essentiel joué par le contrôle neuro-moteur et la maîtrise gestuelle dans le développement et le maintien d'une vitesse de coque optimale, gage d'une économie d'énergie sur l'épreuve d'aviron.

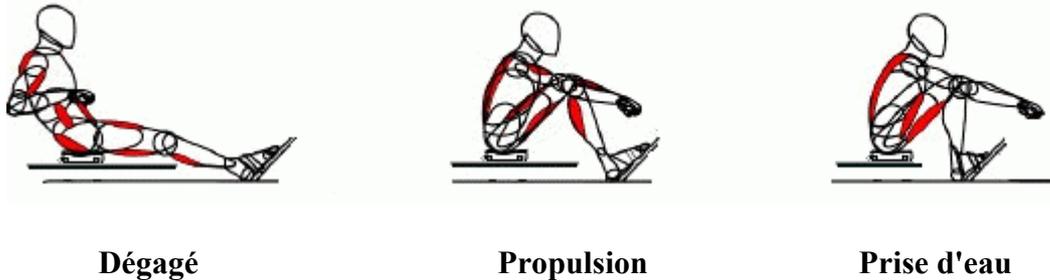
(* les angles indiqués sont les angles de la rame par rapport à l'axe du bateau.)

(** les temps sont calculés à vitesse de compétition – cadence +/- 36 - sur la base de l'étude de Colou (26))

II- ETUDE DU TRAVAIL DES MEMBRES INFÉRIEURS :

(Dans les années 90, les réglages et la technique du geste d'aviron ont légèrement changé au profit d'une position sur l'avant tibias verticaux, dos redressé. Les angles décrits par les auteurs plus anciens sont donc différents).

Figure 4 : LE MOUVEMENT DES MEMBRES INFÉRIEURS



1- Description du mouvement des segments : (figure 2 et 4) (40, 41, 42, 43, 44, 45)

Le travail des membres inférieurs s'effectue en position assise (sport porté). Il n'y a pas de composante latérale susceptible d'entraîner une déstabilisation de l'ensemble : pied - cheville - genou – hanche (sauf en cas de perturbation de l'équilibre du bateau : vent, vagues, fautes...)

Le mouvement des membres inférieurs est identique en pointe et en couple.

a- La propulsion :

+ Le rameur prend appui sur la barre de pied pour « pousser avec ses jambes ». Il s'agit d'un mouvement d'extension globale des membres inférieurs (chevilles, genoux et hanches) qui s'exécute en chaîne fermée dans l'axe du genou. L'extension des articulations commence dès la prise d'eau (26, 40, 41, 43, 51).

+ La position de départ est une position jambes fléchies (40, 41, 42, 51, 95) : pieds à 45° sur la verticale (***) - tibias verticaux - angle pied/tibias 45° (***) - angle tibias/fémurs 50 à 70° (bassin à +/- 20cm des talons) - angle fémur/tronc 30°.

+ La position d'arrivée est une position d'extension (40, 41, 44, 50, 51, 95) : pieds à 45° sur la verticale - angle pied/tibias 140° - angle tibias/fémurs 160 à 180° - angle fémur/tronc 110 à 115°.

L'extension des jambes est parfois limitée par le contact entre le mollet et les rails de la coulisse.
+ L'amplitude des mouvements est de : 95° pour la cheville (***), 110° pour le genou et 85° pour la hanche (par rapport au tronc). Les mouvements sont centrés sur les valeurs médianes du jeu articulaire. (***) *valeurs théoriques compte tenu de l'élévation du talon*.

b- Le retour :

+ Le rameur « tire sur la planche de pied » afin de faire passer le bateau sous lui (40, 41, 45). Il s'agit d'une flexion simultanée et active en chaîne fermée des chevilles, des genoux et des hanches.

+ Le travail de la cheville, du genou et de la hanche se fait dans le plan sagittal. Le geste correct de l'aviron n'induit pas de rotation du genou, d'abduction ou d'adduction de la hanche. En pointe (et parfois en couple) une tendance à l'ouverture des cuisses lors de la flexion est parfois observée (abduction - rotation externe du fémur). Celle-ci constitue un défaut technique qui menace la stabilité du bateau.

2- Principaux muscles impliqués : (40, 41, 50, 51, 84, 115, 131)

a- Muscles agonistes de la phase aquatique :

+ L'extension de la cheville est réalisée par le soléaire et les jumeaux en co-contraction avec le quadriceps et le jambier antérieur (50, 51).

+ L'extension du genou est réalisée par les quadriceps (surtout vastes externe et interne) ⁽¹⁰²⁾. Le grand fessier joue un rôle important, par co-contraction lorsque la hanche est en flexion ^(50, 51, 115). Les études électromyographiques de Rodriguez ⁽¹¹⁵⁾ montrent la faible participation du droit antérieur dans le mouvement d'extension de la jambe. Selon Gjessing ⁽⁵¹⁾ celui-ci a par contre une action essentielle en tant qu'antagoniste lors de l'extension de la hanche.

+ L'extension de la hanche est réalisée par le grand fessier et les ischio-jambiers (semi-tendineux, semi-membraneux à l'intérieur et biceps crural à l'extérieur de la cuisse) ⁽¹⁰²⁾ qui travaillent en co-contraction avec le quadriceps ⁽⁵¹⁾. Le grand fessier intervient plutôt en début de mouvement tandis que les ischio-jambiers ont une action essentielle dans la fin du mouvement.

b- Muscles agonistes du retour et antagonistes de la phase aquatique :

+ La dorsiflexion de la cheville est réalisée par les jambiers, les péroniers antérieurs et l'extenseur des orteils ⁽⁵⁰⁾.

+ La flexion du genou est réalisée par les ischio-jambiers (semi-tendineux, semi-membraneux à l'intérieur et biceps crural à l'extérieur de la cuisse) assistés du couturier, du droit interne et par co-contraction : du poplité, du soléaire et des jumeaux ^(50, 51).

+ La flexion de la hanche est réalisée par le psoas-iliaque (partie iliaque), assisté du couturier, du tenseur du fascia-lata et du droit antérieur par co-contraction ^(50, 51).

+ A la fin du mouvement, le quadriceps a une action freinatrice essentielle au contrôle de la vitesse de la coque (voir ci-après) ^(84, 131).

3- Cinétique du mouvement des membres inférieurs :

a- Cinétique de la phase aquatique :

Lors de la phase aquatique, la phase dynamique d'extension des membres inférieurs dure 65% de la phase aquatique soit environ 0.45 seconde (**). Les vitesses angulaires d'extension des articulations sont de : 200°/s pour la cheville, 220 pour le genou et 190 pour la hanche. Les études de Avakian ⁽⁴⁾ et Kramer ⁽⁷⁵⁾ confirment ces vitesses.

b- Cinétique du retour :

A cadence basse (18 à 20 cp/min) la phase de retour dure le double de la propulsion, la majeure partie de l'augmentation du temps du retour est obtenue par le "ralentissement de la coulisse" ^(26, 40, 41, 45, 84, 116). Pour ce faire la phase dynamique est très finement contrôlée, la flexion des membres inférieurs est régulièrement freinée afin de maîtriser la cadence ce qui permet de contrôler la vitesse de la coque ^(45, 46, 49) (voir plus haut I3 et I4b).

c- Cinétique des inversions :

+ Le dégage s'inscrit dans la continuité de la phase aquatique, les membres inférieurs restent tendus pendant le remplacement des membres supérieurs (renvoi des mains) ^(40, 41, 42, 44). Chez le bon rameur, ce temps d'inversion diminue lorsque la cadence augmente (compétition) ^(26, 40, 41).

+ Chez le bon rameur, l'inversion avant est instantanée ^(115, 131). Il n'y a pas de temps d'arrêt de la coulisse entre le retour et à la prise d'eau ^(40, 41, 42, 44).

4- Modalités de contraction musculaire et force développée : ^(26, 51, 79, 84, 115, 131)

a- Propulsion :

+ Les études de Malho ⁽⁸⁴⁾ montrent qu'en début de propulsion, le travail concentrique des extenseurs est explosif ce qui est confirmé par les vitesses précédemment citées ^(4, 75). L'obtention d'une vitesse maximale de contraction est essentielle à l'efficacité de la prise d'appui ⁽⁸⁴⁾, au développement de la force et à l'augmentation de la vitesse de la coque ^(90, 116). Les auteurs ⁽⁸⁷⁾ montrent que plus l'augmentation de la force développée par les membres inférieurs est rapide plus la vitesse de la coque augmente. Toutefois, en raison de la faiblesse des muscles du tronc et des membres supérieurs, il existe une limite d'efficacité à l'augmentation de cette vitesse de contraction. La durée constante de la phase aquatique chez les rameurs expérimentés quelle que

soit la cadence développée traduit cette vitesse optimale d'efficacité (23, 63, 102, 157). La force développée par les jambes doit être dosée en fonction des possibilités de soutien du tronc et des membres supérieurs, mais également en fonction de la vitesse du bateau (40, 41, 43, 84).

+ Selon Nelson (102) et Henry (63) la synchronisation des vitesses angulaires d'extension des genoux et des hanches est déterminante pour le développement du coup d'aviron. Pour obtenir une accélération maximale de la coque, la sommation des vitesses angulaires maximales des jambes, du tronc et des bras doit coïncider avec le passage de la pelle à 90° de l'axe du bateau. Les ischio-jambiers antagonistes de l'extension des jambes et agonistes de l'extension du tronc régulent cette synchronisation jambes/tronc (50, 79, 68, 102). Les études d'Howell (68) montrent une tendance à l'hypermobilité des fessiers et ischio-jambiers chez le rameur, qui est rendue nécessaire par les angles de travail du bassin (voir plus loin). De même celles de Parkin (105) montre que l'aviron développe davantage la force des quadriceps que celle des ischio-jambiers ce qui peut être à l'origine d'un déséquilibre entre les extenseurs et les fléchisseurs de la jambe.

+ La fin de la phase aquatique est marquée par un important travail isométrique de verrouillage des membres inférieurs, notamment des quadriceps (droit antérieur) et des fléchisseurs du pied (84). Ce travail se prolonge tout le temps de l'inversion arrière et du remplacement des membres supérieurs (renvoi des mains) (84). Cette forte contraction isométrique permet de maintenir l'appui sur la barre de pied nécessaire à l'accélération du mouvement des bras et à l'exécution du dégage et de contrôler la vitesse de la coque (40, 41, 43, 46).

b- Retour :

+ La flexion des membres inférieurs lors de la phase dynamique du retour se fait en chaîne fermée. Le contrôle de la vitesse du retour est assuré par un travail freinateur excentrique des extenseurs de la jambe (84, 115, 131).

+ Le travail s'effectue sans charge. La maîtrise de la traction exercée sur la barre de pied est un élément essentiel au contrôle de la vitesse de la coque, de l'inversion avant et de la prise d'appui.

+ L'étirement contrôlé des extenseurs lors de la flexion permet l'obtention d'un effet pliométrique (pré-tension) optimisant la réactivité de l'inversion avant (40, 41, 45, 84).

c- Inversion :

+ L'inversion avant est extrêmement violente de par l'instantanéité du changement de régime de contraction (50, 84). Le travail excentrique freinateur des extenseurs est immédiatement suivi d'un travail concentrique explosif. Dans cette action le rameur utilise largement l'énergie élastique du tissu musculaire et l'inertie de la coque.

d- Cas de la pointe :

En pointe le mouvement et les muscles impliqués sont les mêmes, mais les études (2, 3, 82, 123, 125) montrent que le travail des deux jambes n'est pas symétrique. Le pic de force de la jambe intérieure intervient dès la prise d'eau alors que celui de la jambe extérieure se situe lors du passage de l'aviron à 90° de l'axe du bateau (*). Par contre, la force développée par la jambe intérieure décroît rapidement et à peu d'incidence sur la population du bateau alors que celle développée par la jambe extérieure joue un rôle majeur dans le développement de la force sur l'aviron (3). Cette dissymétrie (105) dans l'action neuromotrice n'induit pas de différence de développement des muscles des membres inférieurs.

5- Synthèse de l'étude du travail des membres inférieurs :

L'aviron est un sport porté, sans choc, ni risque de traumatisme sur les membres inférieurs. Les articulations ne sont sollicitées que dans le plan sagittal.

Lors de la phase aquatique, les membres inférieurs réalisent une puissante poussée qui dure environ 0.45 seconde (**) (65% de la phase de propulsion). Celle-ci est transmise à la rame par le tronc et les membres supérieurs. Elle est responsable de la force développée par le rameur sur la pelle et est à la base de la vitesse de la coque.

Les amplitudes des mouvements des articulations des membres inférieurs sont importantes : 95° pour la cheville (***), 110° pour le genou, 85° pour la hanche, mais les angles de travail ne sont jamais extrêmes.

L'activité dynamique en charge de la plupart des muscles s'effectue de façon concentrique explosive en chaîne fermée en course interne sur des amplitudes réduites. Le travail musculaire présente une forte composante de co-contraction, en particulier dans le cas des fléchisseurs et extenseurs du genou qui sont également extenseurs et fléchisseurs de la hanche (muscles polyarticulaires : ischio-jambiers et droit antérieur). Le travail excentrique en co-contraction ou freinateur est très présent. Il y a une phase de travail isométrique de fixation des membres inférieurs de la fin de la phase aquatique au début du retour, celle-ci joue un rôle important dans le contrôle de l'inversion arrière.

Lors de la prise d'eau, le changement de régime de contraction agoniste / antagoniste est très rapide. La synchronisation des contractions et des relâchements des agonistes et antagonistes est un élément essentiel à la qualité d'exécution du geste technique (précision gestuelle) et est largement conditionnée par le contrôle de la vitesse du retour. Les deux aptitudes essentielles à la qualité technique lors du travail des extenseurs des membres inférieurs sont la vitesse du passage d'un travail excentrique à un travail concentrique lors de l'inversion avant et la capacité de développement rapide d'une force maximale lors du travail concentrique.

Lors du retour le contrôle du rythme de la coulisse est essentiel à la maîtrise de la cadence et de la vitesse du bateau, et implique une parfaite maîtrise neuro-motrice.

L'ensemble met en avant trois caractéristiques du travail des membres inférieurs chez le rameur :

- D'une part l'importance du travail de synchronisation neuro-motrice des contractions isométriques, concentriques explosives, excentriques freinatrices des différents muscles.
- D'autre part l'importance des potentiels de force, force explosive et force vitesse des muscles des jambes chez le rameur.
- Enfin l'importance du transferts (et de la sommation) des forces et des mouvements depuis la planche de pied jusqu'au tronc.

Ces caractéristiques reposent sur une excellente maîtrise neuro-motrice et une parfaite disponibilité des qualités neuro-musculaires, un équilibre du développement musculaire aussi bien au niveau physiologique (résistance à la fatigue, élimination des métabolites, apport de l'oxygène...) qu'histologique (développement des sarcolèmes, typologie des fibres, longueur des fibres...).

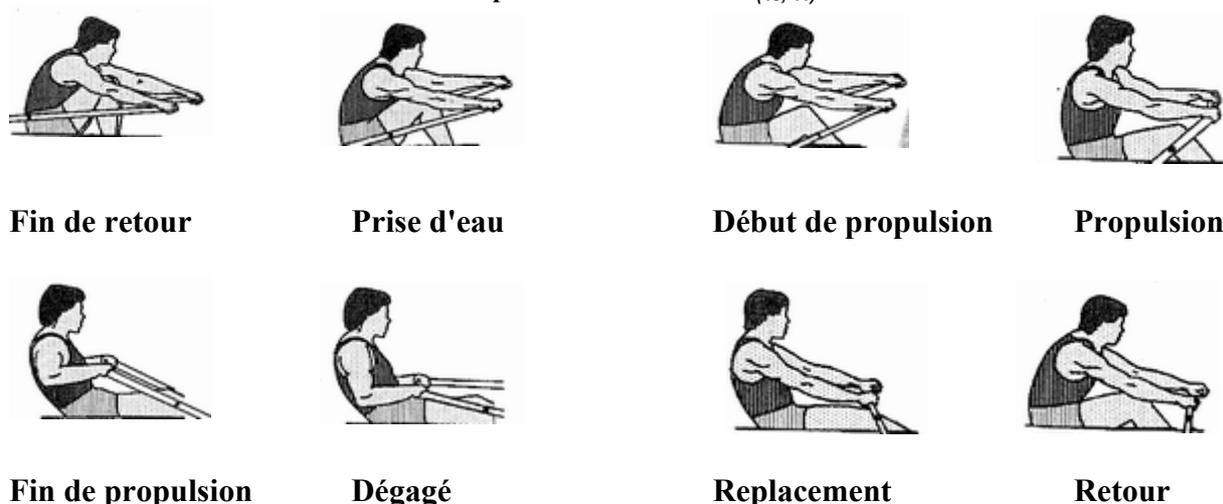
Toute dysharmonie (différence de longueur des segments, faiblesse musculaire, manque de souplesse ou de force, manque de contrôle ou de disponibilité...) sera compensée et entraînera des perturbations de la chaîne locomotrice susceptibles d'occasionner des pertes d'efficacité, des surcharges, des fatigues et des traumatismes.

III- ETUDE DU TRAVAIL DES MEMBRES SUPERIEURS :

1- Description du mouvement des segments en couple : (figure 2 et 5) (40, 41, 51)

Les membres supérieurs passent d'une position tendue à l'avant à une position fléchie. La phase aquatique s'effectue dans un plan horizontal, à une hauteur voisine de celle de la septième côte (appendice xiphoïde). Au dégagé les mains rasant les épines iliaques antéro-supérieures. En couple l'action des mains sur les avirons doit être symétrique et synchrone (26, 40, 41).

Figure 5 : LE MOUVEMENT DES MEMBRES SUPERIEURS
d'après document fédéral (40, 41)



a- La propulsion :

+ Articulation scapulo-thoracique : L'épaule passe d'une position maximale antépulsée à une position maximale rétropulsée (cage thoracique ouverte) (40, 43, 50, 51, 83, 129, 134). Il n'y a pas de sonnette externe ou interne, d'élévation ou d'abaissement scapulaire (l'épaule reste basse).

+ Articulation scapulo-humérale : Au départ de la phase aquatique le bras est en élévation presque horizontale, formant un angle de 80° avec le tronc dans le plan sagittal (50, 51) et en légère abduction (moins de 10°). Au cours de la phase aquatique l'humérus effectue une abduction horizontale d'environ 80° et une très légère flexion d'environ 20°. En fin de phase aquatique, il est en abduction de 80 à 90° et en flexion de 60° dans le plan sagittal (40, 41, 43). Il n'y a pas de mouvement de rotation de l'humérus par rapport à l'omoplate.

+ Articulation du coude : Au départ de la phase aquatique le bras est en extension supérieur à 160°, en fin de propulsion il est en flexion d'environ 75°, soit une flexion totale voisine de 90° (50, 51). L'ensemble du mouvement se fait en pronation, il n'y a pas de rotation de l'articulation radio-cubitale. Les avants bras restent dans le plan horizontal pendant tout le mouvement (40, 41, 43).

On observe parfois une flexion du bras lors de la prise d'eau. Ce mouvement constitue un défaut technique (prise d'eau sur les bras) préjudiciable à l'efficacité du geste dans la mesure où il crée une rupture de la chaîne musculaire et limite le travail des bras en fin de propulsion (43, 115).

+ Articulations du poignet et de la main : durant la phase aquatique, les os du carpe et les métacarpiens restent dans le prolongement du radius (absence de flexion ou d'extension) (40, 43). Les phalanges sont fléchies autour de la poignée. Le pouce, en crochet latéral, vient appuyer sur l'extrémité de la rame avec la pulpe du doigt (40, 43).

b- Le retour :

+ Pendant tout le retour l'omoplate, l'épaule et le coude sont fixés et progressivement mis sous tension en position de prise d'eau, prêt pour l'inversion (40, 41, 45, 65, 83, 129). Le poignet reste immobile et relâché en légère dorsiflexion (<30°) (40, 41, 45, 50). La main relâchée reste en position de crochet avec une légère extension des premières phalanges.

c- Les inversions :

+ Au dégagé pour faire sortir les pelles de l'eau un petit mouvement de rotation interne du bras produit une pression verticale sur la poignée (mouvement d'abaissement des mains) (40, 41, 44). Celui-ci est suivi d'une rotation de la rame dans la main du rameur qui est impulsée par un petit mouvement d'extension de la première phalange associé à une légère dorsiflexion du poignet (<30°) (40, 41, 44, 50). L'inversion s'achève par le remplacement des bras (extension de 90° - adduction

de 80°), suivi de celui de l'omoplate en abduction permettant le retour à la position de début de phase aquatique (position de prise d'eau) (40, 41, 44, 50, 65, 83).

+ A l'issue du retour, la pelle est « préparée » à être entrée dans l'eau par un petit mouvement sec de flexion de la première phalange et du poignet (retour en position neutre) (40, 41, 45, 50). L'entrée dans l'eau se fait par une petite extension rapide de l'épaule (une vingtaine de degrés) qui marque le passage à la phase aquatique (40, 41).

2- Principaux muscles impliqués : (30, 40, 41, 50, 51, 65, 83, 84, 115, 131, 19)

a- La phase aquatique :

- La fixation et l'adduction de l'omoplate sont réalisées par le trapèze et les deux rhomboïdes (40, 50, 51, 65, 83, 84, 115).

- La fixation puis l'abduction du bras est réalisée par le grand rond, le grand dorsal, le faisceau arrière du deltoïde et le long triceps (le biceps brachial en co-contraction participe également à l'abduction) (30, 40, 50, 51, 84, 115).

- Le maintien du bras en élévation est assuré par le deltoïde par un travail en co-contraction avec le pectoral (stabilisation du mouvement de l'humérus dans le plan horizontal) (40, 50, 51, 84).

- La flexion du coude est réalisée par le brachial antérieur, le biceps brachial et surtout le long supinateur dans les derniers degrés de flexion. La pronation est maintenue par le rond et carré pronateur (40, 50, 51, 115).

- Le maintien du poignet est assuré par le grand palmaire et le cubital antérieur (50)

- Tout au long de la phase aquatique, le verrouillage des articulations de la main est assuré par le fléchisseur commun superficiel pour la flexion de la deuxième phalange et profond pour flexion de la troisième phalange et l'extenseur commun des doigts pour l'extension de la première phalange (50).

b- Le retour et les inversions : (muscles antagonistes de la propulsion) :

- L'abaissement des mains au dégagé est assuré par le rond pronateur

- L'extension du bras est ensuite assurée par les triceps et l'anconé (40, 50, 51, 84).

- L'adduction du bras est assurée par le grand pectoral, le sus épineux et le deltoïde (faisceau antérieur) qui assurent également sa stabilisation en position d'élévation (maintien de l'extension de l'épaule dans le plan sagittal) (40, 50, 51, 84).

- Le grand dentelé et le petit pectoral assurent l'abduction puis la fixation de l'omoplate (65, 68, 83).

- Les rotations des pelles (mouvements de la première phalange et du poignet) sont assurées par les muscles de la main et du poignet (40, 50, 51, 84).

- A l'inversion avant, le deltoïde assure l'élévation des bras (extension de l'épaule) (40, 50, 51, 84).

3- Cinétique des mouvements des membres supérieurs :

+ La cinétique du mouvement des membres supérieurs n'est pas identique à celle des membres inférieurs mais elle est synchronisée sur ces derniers (26, 30, 40, 41).

+ Malho (84) montre que sans l'effet d'inertie et la parfaite coordination entre les membres inférieurs et supérieurs, la faiblesse des muscles des bras par rapport à ceux des jambes ne leur permet pas de soutenir la force générée par ces derniers et de développer l'accélération nécessaire au maintien de l'appui et à la propulsion de la coque (26, 79, 115, 131). Cette observation justifie le fait qu'une prise d'eau précoce sur les bras (flexion des bras à la prise d'eau) entraîne une perte d'efficacité.

a- Phase aquatique :

+ La phase aquatique totale dure environ 0.7 seconde (**), mais la phase dynamique des membres supérieurs dure moins de 0.25 seconde (**) et correspond à un balayage de la rame de 88 à 110° (*) (26, 30, 40, 69, 79, 84, 116).

+ Au cours de cette phase chaque articulation achève son action dynamique à des moments différents ce qui explique que les durées des mouvements de chaque segment ne soient pas les

mêmes ⁽²⁶⁾. L'adduction de l'omoplate débute vers 65% de la phase aquatique et s'achève vers 85% (0.10 seconde (**)) ^(26, 30, 79, 115). Les mouvements de l'épaule et du coude débutent au même moment mais s'achèvent au dégage (0.25 seconde (**)) ^(26, 30, 50, 79, 83, 115).

+ Les mouvements sont coordonnés, enchaînés et synchronisés sur la fin de l'extension des membres inférieurs de manière à obtenir une sommation optimale des effets ^(26, 40, 41, 43).

+ Les vitesses angulaires des segments ne sont pas linéaires mais montrent toutes une accélération jusqu'à un plateau de vitesse ⁽²⁶⁾. Celles de l'abduction de l'épaule et de la flexion du coude sont supérieures à 300°/s.

b- Retour et inversions :

+ Selon la cadence, le retour dure une à deux fois la durée de la phase aquatique. La phase dynamique du remplacement des mains intervient sans temps d'arrêt dans la continuité de la phase dynamique de la fin de propulsion. Sa durée est d'autant plus courte que la cadence est élevée, à cadence de course l'inversion arrière est instantanée. Le mouvement de remplacement des membres supérieurs est rapide et contrôlé ^(26, 40, 41, 44).

4- Modalité de contraction musculaire et force développée : ^(26, 51, 79, 84, 115, 131)

a- Phase aquatique :

+ Le travail musculaire lors de la propulsion se déroule en deux phases : une phase isométrique qui dure environ 65% de la phase aquatique (0.45 secondes) et une phase concentrique accélérée (moins de 0.25 secondes) (**)^(26, 30, 40, 41, 43, 116, 69, 21, 129).

+ Lors de la première phase les membres supérieurs conservent une position verrouillée en extension - antépulsion afin de transmettre la force exercée par l'extension des jambes depuis le tronc jusqu'aux poignées. Le travail des chaînes musculaires est purement isométrique (fixation des articulations en charge par le verrouillage des doigts - poignets - coudes - épaules et omoplates). La qualité de cette fixation est essentielle à la création et à la transmission de la force maximale générée par les jambes ^(21, 27, 30, 40, 41, 50, 51, 65, 83, 84, 104, 115).

+ Lors de la deuxième phase, dans l'inertie du mouvement de jambe, les membres supérieurs exercent leur action motrice propre (rétropulsion de l'épaule - abduction du bras sur l'épaule - flexion du coude en pronation) ^(26, 65, 83) par un travail de force explosive ^(4, 75). Au niveau du poignet et de la main une contraction isométrique assure le verrouillage des articulations ⁽⁵⁰⁾.

+ Malho ⁽⁸⁴⁾ montre que la qualité du travail concentrique explosif des muscles est fortement influencée par le travail isométrique qui le précède (pré-tension). La vitesse et l'amplitude de cette phase dynamique du travail des membres supérieurs conditionnent la longueur du coup d'aviron ^(40, 41, 43).

b- Retour :

+ Le remplacement très rapide des membres supérieurs lors du dégage est suivi du maintien d'une position statique sans charge des bras qui dure tout au long du remplacement du rachis et de la flexion des jambes (retour de la coulisse). Le travail musculaire est isométrique sans charge. Les articulations restent relâchées ^(40, 41, 45, 65, 68, 83).

c- Les inversions :

+ Le dégage marque le passage d'un travail concentrique en charge (adduction de l'omoplate - abduction de l'épaule - flexion du coude) à un travail antagoniste concentrique sans charge (extension du coude - adduction du bras - antépulsion de l'épaule).

+ La prise d'eau marque le passage d'un travail isométrique sans charge de stabilisation en position antépulsée en extension à un travail isométrique identique mais avec charge maximale et dans une orientation inverse des contraintes.

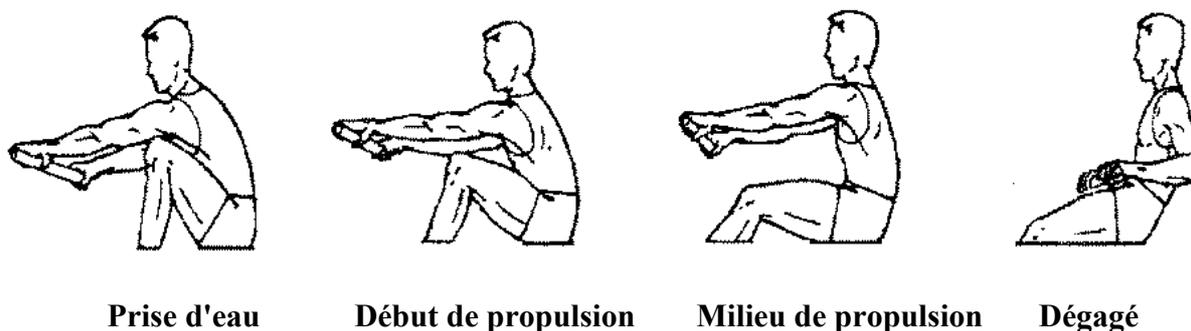
+ Les mouvements de dégage et rotation de la rame et de préparation et engagement de la rame sont des mouvements instantanés de type réflexe sans charge, réalisés très rapidement et sur de très faibles amplitudes. Ils nécessitent une coordination très précise et une parfaite

maîtrise des mouvements des mains et des avant bras (contrôle de l'amplitude et synchronisation avec les jambes).

5- Cas de la technique de pointe : (figure 6)

En pointe les deux mains exercent simultanément leur traction sur une seule rame mobile autour d'un axe situé latéralement par rapport au plan sagittal du rameur. Le mouvement de rotation induit un décalage des mains dans le plan frontal qui se traduit par une différence de travail entre le bras externe et le bras interne par rapport à l'aviron. Les muscles du membre interne effectuent un travail de faible amplitude tandis que les muscles du membre externe travaillent en amplitude maximale en course externe (86, 134, 147).

Figure 6 : LA PHASE AQUATIQUE EN POINTE
d'après Manning TS (86)



a- Travail du membre supérieur externe :

+ Le geste est le même qu'en couple mais l'amplitude du mouvement est plus importante ce qui induit trois différences biomécaniques : une extension maximum à la prise d'eau (abduction de l'omoplate), une amplitude des mouvements articulaires plus importante (flexion du coude) et une adduction – rétroimpulsion de l'épaule plus importante au dégagé (86, 134, 147).

+ Compte tenu de son rôle majeur dans le développement de l'amplitude, les composantes de travail excentrique et les contraintes d'étirement des articulations sont notablement augmentées sur le membre extérieur. Celui-ci prend une part prépondérante dans la transmission des forces développées par les membres inférieurs et dans l'ajout d'une composante de force propre (134).

b- Travail du membre supérieur interne :

+ Le geste de la main et du poignet est le même que pour la couple. L'omoplate conserve une position relativement neutre (pas d'abduction - adduction) mais effectue un léger mouvement en sonnette externe (134).

+ Tout au long du mouvement le membre supérieur interne, accompagne le geste en contrôlant la hauteur de la rame et son mouvement de rotation (40, 41). Son action dynamique ne se développe qu'à partir du passage à la perpendiculaire de l'axe du bateau. Il participe notablement moins à la transmission de la force de propulsion développée par les membres inférieurs et très peu à l'ajout d'une composante de force ou d'amplitude propre aux membres supérieurs (134).

6- Synthèse de l'étude du travail des membres supérieurs :

+ Au niveau des membres supérieurs, le mouvement d'aviron est caractérisé par de longues phases de travail isométrique et de très brèves phases de travail concentrique de type accéléré. Les inversions sont caractérisées par des changements très rapides de l'orientation des contraintes. Lors de la prise d'eau les membres supérieurs passent d'un travail isométrique sans charge en extension sur l'avant à un travail isométrique à charge maximale. L'inversion est extrêmement violente et précise.

+ Lors de la phase aquatique les membres supérieurs soutiennent la force développée par les membres inférieurs par un important travail isométrique. En fin de mouvement, ils ajoutent leur propre composante dynamique par un puissant mouvement explosif accéléré de traction horizontal. Le mouvement est une rétropulsion abduction de l'épaule associée à une flexion du coude. La vitesse et la longueur de ce mouvement sont à la base de l'accélération finale de la coque. Le travail musculaire en charge est stato-dynamique (succession d'un travail isométrique et dynamique). Il nécessite une synchronisation très précise des actions motrices afin d'optimiser la sommation et la transmission des forces et des mouvements depuis le tronc jusqu'à la rame.

+ Les angles sont centrés sur la valeur médiane des angles articulaires, seuls l'omoplate et le coude ont une amplitude maximale de mouvement. L'abduction de l'épaule se fait sur un angle de 80° et sa flexion est extrêmement réduite.

Le développement de l'amplitude maximale de l'antépulsion - rétropulsion de l'omoplate est une qualité nécessaire à la performance du rameur. La position de début de phase aquatique est une position d'antépulsion maximale de l'épaule.

+ A l'inversion arrière un travail de remplacement rapide des bras est suivi d'une phase isométrique de maintien sans charge de la position de prise d'eau. Les muscles sont relâchés et disponibles.

+ En pointe le travail des deux membres supérieurs n'est pas identique tant au niveau du mouvement que de la force développée.

IV- ETUDE DU TRAVAIL DU TRONC

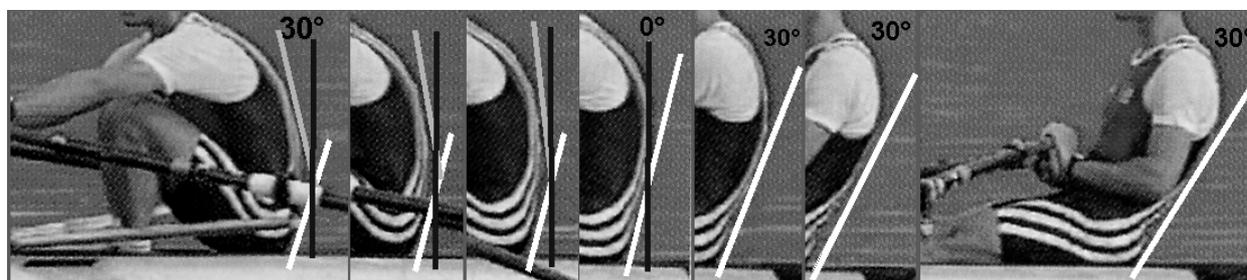
Dans le plan sagittal, lors du geste d'aviron, le rachis dorso-lombaire présente une seule courbure qui se modifie en passant d'une position fléchie à une position droite (tableau 5, figure 2 et 7). Au cours de ce mouvement le tronc remplit plusieurs fonctions ⁽⁵⁰⁾ :

- Chaîne de transmission entre les membres inférieurs et les membres supérieurs.
- Élément de développement de l'amplitude à l'avant lors de la prise d'eau (élongation axiale)
- Élément moteur permettant d'augmenter l'amplitude du geste et la force de propulsion

Accessoirement, il intervient dans la correction de l'assiette du bateau permettant le maintien du plan de travail horizontal des bras.

Figure 7 : LE MOUVEMENT DU TRONC

d'après le modèle fédéral :



Prise d'eau (flexion 30°)

Dégagé (extension <30°)

Tableau 5 : POSITION DU DOS AU COURS DU GESTE D'AVIRON (figure 7)

modifié d'après Garcia « Le dos du rameur » ⁽⁵⁰⁾

Phase	Position du tronc	Angle /vertical	Rachis lombaire ****	Rachis dorsal	Travail musculaire
INVERSION :					

Prise d'eau	Flexion du tronc en élévation maximale vers l'avant	30° av	Flexion en L1 (cyphose)	Dos droit +/- légère cyphose	Verrouillage en isométrie + élévation axiale
PROPULSION :	Flexion en avant	30° av	Flexion L1	Dos droit	Idem
Appui	Tronc à la verticale	0°	Dos droit	Dos droit	Travail concentrique des extenseurs
Mi propulsion	Extension du tronc à l'arrière	28° ar	Dos droit	Dos droit	Idem + travail freinateur excentrique des fléchisseurs puis isométrie
Fin propulsion					
INVERSION :					
Dégagé	Extension du tronc à l'arrière	<30° ar	Dos droit	Dos droit	Verrouillage en isométrie
RETOUR :					
Renvois mains	Faible extension du tronc	<30° ar	+/- légère lordose	Flexion D9 - D12	Travail concentrique des fléchisseurs
Mi retour	Tronc à la verticale	0°	Dos droit	Dos droit	Idem + travail freinateur excentrique des extenseurs puis isométrie
Fin retour	Tronc en flexion en élévation maximale vers l'avant	30° av	Idem à flexion L1 (cyphose)	Dos droit +/- légère cyphose	Verrouillage en isométrie

**** Il y a une constante inversion de la courbure lombaire

1- Rôle de chaîne de transmission - travail de verrouillage du rachis :

Pendant tout le geste d'aviron, le tronc doit transmettre le mouvement et la force générés par les membres inférieurs et les additionner à ceux générés par les membres supérieurs (40, 41). La colonne vertébrale est soumise à deux forces : à l'arrière une très puissante force issue de la contraction des extenseurs et à l'avant la force due à la traction opérée sur la rame par l'intermédiaire des bras. Morris (93), Boland (10) et Hosea (66, 67) montrent que le rachis lombaire reçoit des contraintes axiales 4,6 à 7 fois supérieures à celles liées au seul poids du corps (de 4000 à 6000N) et des contraintes cisailantes allant de 660 à 848N selon les études. Ces contraintes peuvent expliquer l'augmentation de la densité minérale des vertèbres lombaires observées chez les rameurs (93).

a- Travail de verrouillage :

+ Le tronc doit soutenir, par un travail isométrique, la force de poussée des jambes de manière à ce qu'aucune perte de force n'intervienne entre le bassin et l'épaule (affaissement du dos en particulier) (21, 27, 30, 40, 41, 43, 65, 79, 84, 102, 104, 115, 120, 129, 147, 157). Muller (94) montre que, dans tous les plans, la force isométrique des muscles du tronc des rameurs est supérieure à la moyenne.

+ Au début de la propulsion, ce travail de verrouillage s'effectue dans une position de flexion maximale des articulations intervertébrales lombaires (129). Les études (38, 66, 68, 134), en particulier de Essam (38), montrent que les muscles des chaînes arrières sont en étirement maximal lors de l'inversion avant. Howell (68) montre que l'hyper-flexibilité lombaire est une qualité nécessaire à la performance à haut niveau en aviron.

+ Selon Colou (26) la phase purement isométrique de verrouillage du rachis dure environ 0.35 seconde (**) (55% de la phase aquatique), ensuite le tronc exerce son action motrice ce qui suppose un parfait contrôle du rachis en même temps que se fait l'extension.

+ Lors de la fin du retour et lors de l'inversion avant le verrouillage - gainage - du rachis est essentiel au maintien de la glisse et à la préparation de la propulsion suivante (41, 42, 45, 129). Ce contrôle permet au rameur de "tirer sur la planche de pied" pour "faire passer le bateau sous lui" sans heurter sa glisse. En effet pour ne pas freiner la coque il faut éviter de déplacer le poids du corps sur le bateau afin d'empêcher une surcharge de l'arrière de la coque (41, 41, 42, 45) (voir I4b).

b- Rôle de la ventilation :

+ Les muscles ventilatoires jouent un rôle important dans la propulsion au travers du blocage de la ventilation par une manœuvre de valsalva qui permet de créer une hyper pression intra-thoracique et intra-abdominale qui assure une meilleure fixation du rachis et une transmission optimale des forces (21, 27, 39, 86, 136). Manning (136) montre que le placement correcte de l'expiration permet d'augmenter la pression intra-abdominale notamment au milieu du coup au moment où s'exerce les contraintes maximales sur le rachis.

+ Les études de Carles (21) montrent que la cage thoracique est gonflée par l'inspiration qui précède l'inversion avant. L'apnée ventilatoire est obtenue par un travail isométrique du diaphragme, des abdominaux et des intercostaux (21, 39, 136). Les études de Coquisart (27) et Manning

⁽¹³⁶⁾ montrent que les abdominaux effectuent leur activité maximale lors du retour (expiration), à la prise d'eau (fixation du rachis) et en fin de phase aquatique (action freinatrice de l'extension du tronc). Elles confirment la parfaite synchronisation de la ventilation sur le mouvement : chez le rameur expérimenté l'inspiration est placée avant la prise d'eau et il n'y a pas d'inspiration lors de la phase aquatique. Carles ⁽²¹⁾ observe que la force de contraction des muscles ventilatoires est augmentée par l'entraînement en aviron. Voliantis ^(148, 149, 150) montre que la force développée par les muscles inspiratoires est un élément déterminant de la performance.

c- Elongation axial du rachis dorsal :

A la prise d'eau, le rachis est maintenu en élongation axiale maximale, de manière à augmenter l'amplitude du mouvement sur l'avant afin d'augmenter l'angle de balayage des rames lors de la phase aquatique ^(40, 41, 42). Au niveau des vertèbres dorsales, il y a un important travail de redressement (auto-grandissement) afin de rechercher une longueur maximale à l'avant ^(66, 68, 134). Ce travail s'oppose à une cyphose dorsale qui effondre les épaules et réduit l'efficacité du geste.

2- Mouvement et cinétique du tronc en couple : (tableau 5, figure 7)

La fonction motrice du tronc dans le coup d'aviron a été contestée par certains auteurs anciens. Toutefois dans le geste actuel de l'aviron, les études biomécaniques ^(26, 66, 117), électromyographiques ^(30, 66), et télémétriques ^(26, 117) montrent nettement une participation motrice active du rachis dans l'allongement et la force du coup. Verhaegen ⁽¹⁴⁷⁾ montre que le redressement de la courbure vertébrale implique une contraction des extenseurs, selon Hosea ⁽⁶⁶⁾ ce travail moteur des muscles lombaires est 54% supérieur à celui de la course à pied. Nelson ⁽¹⁰²⁾ montre que ce travail dynamique est essentiel à l'accélération du coup d'aviron.

a- Mouvement du tronc lors de phase aquatique : (voir figure 2 et 7 et tableau 5)

+ Selon Colou ⁽²⁶⁾ le travail dynamique du tronc débute vers 55% de la phase aquatique et prédominerait jusqu'à 85% soit une durée d'environ 0.2 secondes (**).

+ A la prise d'eau, chez le bon rameur, le rachis est en position fléchi en cyphose lombaire. Les vertèbres dorsales sont en position d'étirement axial maximal ^(66, 134) en cyphose nulle ou très modérée ⁽⁵³⁾. La flexion du tronc par rapport à la verticale est inférieure ou égale à 30° ^(40, 41, 43, 68, 84, 129). L'angle entre le fémur et le thorax est de 30° ^(40, 41, 43, 51, 66, 67, 84, 112, 129) et la flexion du rachis sur le sacrum est de 50 à 60° (voir plus loin). La flexion rachidienne est faible par rapport à la flexion maximale permise par le rachis dorso-lombaire mais elle est pour l'essentiel localisée au niveau lombaire or les données anatomiques montrent que l'angle maximal de flexion du rachis lombaire sur le bassin est inférieur à 35°. L'ensemble confirme le fait que les vertèbres lombaires sont soumises à une hyperflexion. Morris ⁽⁹³⁾ et Simone ⁽¹²⁹⁾ affirme que cette position soumet les disques lombaires à des contraintes axiales et cisailantes responsables de stress compressifs à l'avant et d'étirements maximaux à l'arrière.

+ Au dégagé, le thorax est dans l'axe du sacrum (dos droit) et fait un angle de 110 à 115° par rapport aux fémurs ^(40, 41, 51, 129). L'extension du tronc est de 25°-30° par rapport à la verticale ^(50, 67, 129), il n'y a pas de cambrure ou d'hyper-extension mais plutôt une légère cyphose du secteur lombaire plus ou moins accentuée selon le rameur. Cette extension est faible par rapport à l'angle d'extension maximal du rachis dorso-lombaire. L'essentiel de cette extension s'effectue au niveau dorsal par annulation de la cyphose.

+ L'amplitude du mouvement du tronc est faible (60°). Les observations précédentes montrent que ce mouvement est un déroulement progressif du rachis qui s'étage sur les articulations inter-vertébrales entre S1 et C7. Les vertèbres lombaires passent d'une position d'hyperflexion à une position neutre et les dorsales d'une position neutre à une position de semi-extension ^(50, 147).

b- Remarque sur l'inversion avant :

Selon le niveau des rameurs, lors de l'inversion sur l'avant il n'est pas rare d'observer une légère extension du tronc (< 20 degré) qui correspond à l'entrée de la pelle dans l'eau et à la création de l'appui (début de la prise d'eau). Cette extension du dos sans charge est d'autant plus importante que la flexion du tronc sur l'avant a été tardive et exagérée (cyphose dorsale) (40, 41). Elle est d'autant plus limitée que la prise d'appui est rapide et efficace (40, 42).

Il n'est pas établi que cette extension soit le résultat d'un travail concentrique des chaînes arrières, il peut s'agir d'un relâchement des fléchisseurs à la prise de l'appui (affaissement du dos). Dans tous les cas, ce mouvement pénalise la qualité du geste d'aviron (40, 42, 51), en retardant la poussée de jambe (perte d'efficacité) et peut être la cause de douleurs lombaires (surcroît de travail des extenseurs du dos) (121). Il est dû à une mauvaise synchronisation ou à une faiblesse des muscles fixateurs du rachis.

Chez le bon rameur, il est admis qu'une flexion supérieurs à 30° sur la verticale ne produit pas plus d'amplitude utile au niveau de la palette. Lors de l'inversion avant et du début de phase aquatique le dos doit être parfaitement tenu et en position d'étirement à l'avant (40, 41, 42).

c- Mouvement du tronc lors de l'inversion arrière et du retour : (voir tableau 5)

+ Au cours de la fin de la phase aquatique et du dégagé, les abdominaux assurent un freinage de l'extension rachidienne puis un verrouillage qui est essentiel à l'accélération finale du mouvement des bras et conditionne celle de la coque (86). L'action des fléchisseurs induit parfois un léger affaissement lombaire (affaissement du rachis en cyphose) (117) qui est préjudiciable à la qualité de l'inversion arrière. Ce temps de verrouillage du tronc sur l'arrière dure d'autant moins longtemps que la vitesse de la coque et la cadence sont élevées. Ce travail des abdominaux doit être très contrôlé, sa durée doit être limitée au maximum pour ne pas porter le poids du corps sur la pointe avant du bateau et permettre l'exécution du retour sans gêner la glisse du bateau.

+ Dans la suite du retour, en même temps que le renvoi des mains, le tronc est rapidement replacé en position de flexion - étirement axial par un mouvement rapide freiné. Ce mouvement est inverse de celui de la propulsion, son amplitude est d'environ 60°. Verhaegen (147) observe un léger mouvement de redressement du rachis dorsal consécutif à l'affaissement parfois observé en fin de phase aquatique (voir plus haut).

d- Mouvements de rotation ou d'inclinaison latérale – correction de l'assiette du bateau :

En couple, il n'y a normalement pas de mouvement de rotation ou d'inclinaison latérale du rachis. Le geste exige une parfaite symétrie des mouvements. La répartition des forces et des masses doit être équilibrée sur l'axe du bateau (40, 41). Toutefois lorsque le plan d'eau est agité, surtout par des vagues latérales, ou lorsque la maîtrise technique n'est pas parfaite (défauts de stabilité), la coque est soumise à des mouvements latéraux (roulis) qui sont transmis au bassin par l'intermédiaire de la coulisse. Afin de maintenir le plan de travail horizontal des membres supérieurs, ces mouvements devront être compensés au niveau du rachis (entre S1 et C7) par des mouvements d'inclinaison latérale et de rotation. Dans son étude Garcia (50) propose que ces contraintes latérales accidentelles puissent être l'origine du déclenchement de crises lombalgiques.

3- Muscles impliqués et régimes de contraction en couple :

Les études de Muller (94) et de Sklad (130) montrent que la pratique de l'aviron induit un développement des muscles du tronc qui se traduit par une augmentation de la force isométrique dans tous les plans, une forte diminution du rapport extenseurs/fléchisseur et une meilleure résistance à la fatigue musculaire (notamment une moindre diminution de la coordination et de la vitesse lors d'efforts longs). Ce dernier fait est confirmé par Morris (93).

a- Muscles impliqués :

+ Au niveau du tronc 4 ensembles musculaires sont impliqués dans le geste (27, 51, 68, 84, 112) :

* Agonistes de la propulsion - extenseurs :

- Carré des lombes – Iliocostal – Long dorsal – Epi-épineux - Grand dorsal - Petits dentelés
- Muscles profonds spinaux extenseurs du tronc (intertransversaire, inter-épineux et transversaire épineux)

* Antagonistes de la propulsion – fléchisseurs :

- Abdominaux (grand droit, petit et grand obliques et transverse)
- Psoas

* Muscles de la ventilation - responsables de la manœuvre de Valsalva :

- Intercostaux internes et externes - Diaphragme - Abdominaux – et muscles du cou.

* Le travail rachidien n'est possible qu'avec un verrouillage du bassin par les muscles des chaînes arrières : fessiers, demi-tendineux et demi-membraneux et biceps crural (voir plus loin) (50, 68, 79, 102). Compte tenu de ce rôle et des angles de travail ces muscles présentent une hyper-mobilité spécifique (68).

b- Modalités de contraction et travail musculaire lors de la phase aquatique :

Le travail musculaire du tronc lors de la propulsion se fait en deux temps (30, 79, 102, 115, 129) :

- un travail isométrique de soutien de la charge
- un travail dynamique d'extension du rachis en charge prédominant entre 55 et 85% de la phase aquatique.

+ Dans le premier temps, les extenseurs du rachis travaillent en co-contraction avec les fléchisseurs pour assurer la stabilité du rachis par rapport au bassin et aux épaules (30, 86, 115, 129, 147). Les muscles superficiels maintiennent la position générale du tronc tandis que les muscles profonds assurent la stabilité des différents étages rachidiens en luttant contre l'affaissement de la colonne. Au plan superficiel, il existe une véritable chaîne de transmission de la force : fessiers - lombaires - dorsaux dont l'action intervient dès la poussée de jambe (147). Howell (68) montre que l'entraînement en aviron est à l'origine d'un gain de force et d'une hypertrophie des muscles lombaires, du grand dorsal et du trapèze.

Lors de ce travail isométrique en charge (chaîne fermée) les muscles des chaînes arrières sont étirés par la position d'allongement sur l'avant (travail en course externe). Howell (68) montre que les muscles lombaires et ischio-jambiers du rameur de haut niveau présentent une hyper-mobilité. La contraction isométrique synchrone des muscles ventilatoires (manœuvre de Valsalva) permet une augmentation de la pression intra-thoracique et abdominale qui joue un rôle majeur dans la transmission des forces (21, 27, 39, 86, 104, 136). Reid (112) met en avant le rôle majeur des transverses et obliques en co-contraction avec les lombaires dans la stabilisation du segment lombaire. Cette action implique un travail actif isométrique des abdominaux associé à celui du psoas pour le maintien du bassin (voir plus loin). Les chaînes avant sont raccourcies pendant cette phase isométrique du geste d'aviron. Un relâchement des muscles fléchisseurs induit une perte de force dans la chaîne de transmission entre les membres inférieurs et les membres supérieurs à l'origine d'une perte de contrôle du verrouillage du rachis.

+ Dans un second temps, les muscles extenseurs du rachis ajoutent leur raccourcissement au mouvement de propulsion par une contraction musculaire concentrique explosive (26, 30, 84, 115, 147). La vitesse de raccourcissement est d'environ 300°/s. Malho (84) montre que la qualité de ce travail est grandement influencée par le travail isométrique précédemment décrit qui permet une « pré-tension » en course externe des extenseurs. La cinétique du geste est contrôlée pour être en phase avec le travail des membres inférieurs et supérieurs afin d'obtenir une sommation optimale des mouvements et des forces (40, 41, 51, 115). Rodriguez (115) montre que la fin du mouvement est freinée par un travail excentrique des antagonistes (fléchisseurs du rachis) ce qui permet le contrôle de l'extension et le maintien de la statique rachidienne (dos droit).

c- Inertie rachidienne lors de la phase aquatique : (figure 2)

+ Dans le détail, le rachis se comporte comme un accumulateur d'énergie jouant un rôle complexe. Outre la transmission de la force générée par les membres inférieurs et l'ajout de la composante de force créée par les muscles extenseurs du rachis, l'ensemble de la musculature rachidienne opère un travail d'ajustement entre la cinétique des membres inférieurs et celle des membres supérieurs en compensant les éventuels retards ou faiblesses.

C'est pourquoi les faiblesses des membres inférieurs ou supérieurs ou les retards dans la dynamique du mouvement des membres inférieurs ou supérieurs (défaut de coordination, différence de cinétique...) entraînent des compensations et un surcroît de sollicitation des muscles extenseurs du rachis (50, 51, 102, 121, 129).

+ Dans leur action de verrouillage du rachis, les muscles rachidiens peuvent avoir leur propre faiblesse (en particulier les déséquilibres entre les fléchisseurs et les extenseurs) ou leur propre défaut de coordination et ce à chacun des différents étages rachidiens (129). L'étude de Gjessing (51) montre les limites rencontrées par certains rameurs dans la stabilisation ou l'extension du rachis lors de la propulsion du fait d'une faiblesse de la musculature. Le rameur tend à fermer l'angle axe du sacrum - axe des cervicales (flexion) ce qui produit un affaissement du dos (cyphose lombaire et dorsale) et induit un travail excentrique des muscles des chaînes arrières du tronc à l'origine d'un risque de traumatisme au niveau des articulations intervertébrales.

d- Modalités de contraction et travail musculaire lors du retour :

La cinétique du mouvement du rachis lors du retour est rigoureusement l'inverse de celle de la phase aquatique. Le travail musculaire se fait en deux temps :

- un travail de flexion dynamique freinée
- un travail isométrique de soutien sans charge

+ Dans un premier temps, une flexion rapide du rachis - jambes tendues - permet de retrouver la position « sur l'avant ». Le travail des chaînes avant - fléchisseur du rachis (grand et petit oblique, grand droit et psoas iliaque partie psoas) - est dynamique explosif sans charge, de courte amplitude et en course interne (les muscles travaillent en raccourcissement). Afin d'éviter un à-coup préjudiciable à la glisse du bateau, l'inertie de cette phase dynamique est régulée par un travail freinateur excentrique des chaînes arrières (40, 41, 45, 115).

+ Dans un second temps, le rachis est maintenu en flexion par un travail isométrique en co-contraction (gainage). Les chaînes avant sont en position de raccourcissement et les chaînes arrières en position d'étirement maximal (41, 45, 115).

+ Howell (68) montre l'absence de relâchement des muscles lombaires lors du retour ce qui peut expliquer des lombalgies.

4- Cas de la technique de pointe :

a- Mouvements du rachis : (voir figure 3)

+ En pointe le bassin se déplace dans le plan sagittal tandis que l'axe des épaules effectue un mouvement de rotation voisin de celui de la rame (147). La rotation de l'axe des épaules est due à l'antépulsion de l'omoplate extérieur à l'aviron et à la rétropulsion de l'omoplate intérieur, couplée à une rotation du rachis qui se répartit entre les vertèbres de S1 à C7 avec une incidence maximale sur la zone lombaire (40, 41, 50, 53, 134, 147). L'ensemble produit une rotation d'environ 80-90°. MC Stallard (134) observe que l'amplitude du mouvement de pointe (depuis les nouveaux réglages des bateaux) atteint les limites de la rotation rachidienne en position assise, ce qui peut justifier l'apparition d'une traumatologie lombaire en flexion rotation (voir chapitre C page 39).

+ En outre, le mouvement de la pointe induit une très légère inclinaison rachidienne du côté de la rame. Ce mouvement se répartit entre les vertèbres de S1 à C7. Cette inclinaison est plus ou moins accentuée selon le niveau des rameurs.

b- Travail musculaire :

+ Lors de la phase aquatique, les muscles responsables de la rotation du rachis sont (50, 68, 117) : l'ilio-costal, le transversaire épineux, le grand oblique (coté intérieur) et le petit oblique (coté

extérieur). Roy ⁽¹¹⁷⁾ confirme de rôle déterminant de l'ilio-costal dans la rotation du dos lors de la phase aquatique.

+ Lors du retour, les muscles responsables de la rotation du rachis sont les mêmes mais du côté opposé ⁽⁵⁰⁾.

+ Le carré des lombes est responsable de l'inclinaison latérale ⁽⁵⁰⁾.

+ La cinétique du travail musculaire est la même que celle de la couple. Lors de la propulsion, les muscles travaillent d'abord en isométrie en charge puis en concentrique explosif. Au retour, ils travaillent sans charge d'abord en concentrique puis en isométrie.

+ Toutefois les amplitudes du travail musculaire et les intensités des contractions (force développée) ne sont pas les mêmes des deux côtés de l'axe rachidien, ce qui induit une forte dissymétrie ^(50, 134, 68, 75, 94, 105, 117, 147). Parkin ⁽¹⁰⁵⁾ confirme l'existence d'une asymétrie de l'activité des muscles spinaux et Howell ⁽⁶⁸⁾ montre que l'entraînement régulier en aviron produit une augmentation de la force et une hypertrophie des muscles lombaires, du grand dorsal et des trapèzes du côté opposé à la bordée de la rame (côté extérieur). Selon Verhaegen ⁽¹⁴⁷⁾ les muscles intérieurs travaillent sur un faible raccourcissement tandis que les muscles extérieurs travaillent sur une grande amplitude et à partir d'une position d'étirement maximale.

+ L'hyper-laxité des muscles lombaires, ischio-jambiers et fessiers est également davantage sollicitée du côté extérieur, ce qui aboutit à une rétraction musculaire du côté intérieur et à une hyper-mobilité de l'autre côté, cette situation peut être à l'origine de lombalgies.

+ Roy ⁽¹¹⁷⁾ observe que le développement musculaire asymétrique entre L2 et L5 (notamment de l'ilio-costal) s'accompagne d'une meilleure capacité de récupération se traduisant en particulier par une plus grande vitesse d'élimination des métabolites. Morris ⁽⁹³⁾ confirme cet effet (voir page 7).

5- Synthèse de l'étude du travail du tronc :

Le rachis joue trois rôles essentiels :

- transfert du mouvement et des forces de la ceinture pelvienne vers la ceinture scapulaire.
- ajout d'une composante de mouvement et de force propre par l'extension de la colonne.
- ajustement des cinétiques des membres inférieurs et supérieurs en fonction des retards ou des faiblesses.

Ces fonctions sont ajustées à chacun des étages rachidiens en fonction de la force des muscles et du dynamisme propre de chaque articulation. La ventilation joue un rôle essentiel dans le maintien du rachis et la transmission des forces.

+ Le geste de l'aviron nécessite une bonne flexion lombaire et dorsale, et provoque un étirement maximal des chaînes arrières et des articulations intervertébrales entre S1 et C7. Il n'y a normalement pas d'hyper-extension (cambrure), d'inclinaison ou de rotation du rachis en couple. L'angle de travail efficace du rachis est de 60° et le mouvement est un déroulement de l'ensemble des vertèbres lombaires à dorsales entre S1 et C7, c'est à dire depuis le bassin jusqu'à la zone de fixation des muscles responsables du mouvement de l'épaule (grand dorsal, rhomboïde et faisceau inférieur du trapèze). Le travail est maximal dans la zone lombaire.

+ Les muscles rachidiens exercent trois types d'action : un travail concentrique agoniste du mouvement d'extension, un travail isométrique de fixation du rachis en co-contraction et un travail excentrique freinateur antagoniste (en fin de mouvement sur l'avant et sur l'arrière).

+ L'amplitude des contractions est faible et les cinétiques sont très spécifiques :

Au cours de la phase aquatique, les chaînes arrières travaillent de façon stato-dynamique en course externe (position étirée liée à la flexion du rachis). Le raccourcissement n'est jamais maximal (absence d'hyperextension ou de cambrure) mais est explosif (300°/s). Sur le retour, les chaînes avant passent d'un travail concentrique explosif sans charge en course interne sur un mouvement freiné à un travail en isométrie sans charge dans une position raccourcie.

+ Au cours du mouvement d'aviron, il n'y a pas de position d'étirement des chaînes avant ou de raccourcissement important des chaînes arrières, ni de temps de relâchement au niveau des muscles du rachis ou de la ventilation.

+ Par rapport à la couple, la pointe est caractérisée par un mouvement de rotation axiale d'amplitude maximale et une forte dissymétrie du travail des muscles rachidiens à la fois dans l'amplitude et dans la force des contractions.

L'étude a permis de préciser 3 éléments clefs pouvant avoir une incidence sur la lombalgie :

- D'une part le caractère très particulier des mouvements et du travail du rachis : hyper-flexion, inversion de la courbure lombaire...
- D'autre part l'importance du travail musculaire et des équilibres des forces entre fléchisseurs, extenseurs, rotateurs...
- Enfin la complexité du contrôle neuro-moteur : inversion des actions motrices (agoniste, antagoniste...), travail en synergie musculaire, explosivité des contractions...

Il convient de rappeler également l'existence de mouvements de latéralité rotatoire si le plan d'eau est agité (mouvements du bateau).

L'ensemble s'inscrivant dans un contexte d'instabilité avec une répétitivité du geste sur un effort long à forte charge lactique intramusculaire.

V- ETUDE DU ROLE DU BASSIN :

Le bassin, les pieds et les mains sont les trois points reliant le rameur à la coque.

Le rameur est assis sur un siège à coulisse dont la forme ergonomique épouse le contour des ischions. Les ischions sont calés sur la coulisse, il n'y a pas de déplacement entre le bassin et la coulisse au cours du mouvement d'aviron.

Les études de Timm ⁽¹³⁹⁾ sur l'équipe américaine, montrent que les disjonctions sacro-iliaques touchent 54,1% des rameurs et qu'elles prédominent en pointe (66% des cas) par rapport à la couple. Ces données attestent de l'importance du bassin dans la transmission des forces et des mouvements lors du geste de l'aviron

1- Réflexion sur le mouvement du bassin en aviron (figure 7) :

Aucune étude sur la position et le rôle du bassin dans le coup d'aviron n'a été trouvée. Toutefois une analyse du geste d'aviron et de ces déterminants biomécaniques permet de cerner quelques éléments de réponse.

a- Etude de la position du bassin lors de la prise d'eau :

+ Antéversion du bassin à la prise d'eau :

L'antéversion augmente la tension passive des ischio-jambiers et des fessiers et diminue celle des quadriceps, des psoas et des abdominaux (rapprochement des insertions). De ce fait, elle limite l'explosivité de l'inversion en entraînant une perte de vitesse de contraction des quadriceps et affecte le maintien de l'équilibre de la statique rachidienne par l'affaiblissement des muscles fléchisseurs du rachis (abdominaux, psoas). L'ensemble entraîne un retard dans la prise d'appui qui se marque par un arrêt de la coulisse sur l'avant et un développement plus faible de la force à la prise d'eau (manque de vitesse de contraction). Cette perte d'efficacité est considérée comme un défaut technique "arrêt sur l'avant" ^(40, 41, 42).

L'antéversion tend également à créer une lordose qui est source de traumatisme.

+ Rétroversion du bassin à la prise d'eau :

La rétroversion effondre le bas du dos (accentuation de la cyphose lombaire et dorsale) et diminue les tensions passives des muscles fessiers et ischio-jambiers (rapprochement des insertions). L'ensemble limite l'amplitude du mouvement sur l'avant et l'explosivité de l'inversion. Cette perte d'efficacité est considérée comme un défaut technique qui a les mêmes conséquences que celles décrites plus avant ("le rameur s'écrase sur l'avant").

En outre l'exagération de la flexion du rachis est source de traumatismes.

b- Etude de la position du bassin lors du dégagé :

+ Antéversion du bassin au dégagé :

L'antéversion crée une cambrure lombaire (bassin antéversé sous un rachis en extension) qui limite l'amplitude de l'extension du tronc. Le développement du geste d'aviron est réduit, la fin de coup n'est plus accélérée. Le déroulement du rachis n'est plus homogène (cambrure), il y a une rupture dans la transmission des forces et risque de traumatisme suite à la lordose.

+ Rétroversion du bassin au dégagé :

La rétroversion effondre le bas du dos (accentuation de la cyphose lombaire et dorsale). Il y a un relâchement des muscles maintenant la statique rachidienne ce qui limite l'explosivité de l'inversion et le maintien de la chaîne de tension membres inférieurs - tronc - membres supérieurs (rupture de la continuité de la chaîne). D'autre part, le poids du rameur est reporté sur l'avant du bateau en alourdissant la pointe ce qui est préjudiciable à la glisse du bateau (augmentation du freinage de la coque). L'ensemble entraîne une perte de force lors de la fin de coup qui nuit à l'accélération finale du geste et au dégagé en ralentissant l'inversion arrière et en diminuant le contrôle de la vitesse de la coque au retour. Cette perte d'efficacité est considérée comme un défaut technique "écrasement du corps sur l'arrière" (voir plus haut) (40, 41, 44).

c- Mouvement de bascule du bassin lors de la phase aquatique et du retour :

+ Chez le débutant on observe souvent une bascule du bassin d'une position avant en antéversion (prise d'eau avec une fermeture de l'angle Jambe/Tronc) souvent accompagnée d'une flexion excessive du rachis dorsal (affaissement), à une position arrière en rétroversion (dos très incliné, vertèbres lombaires et dorsales en cyphose).

Le mouvement de bascule n'est pas incompatible avec le geste d'aviron mais en réduit le rendement à 3 niveaux :

- il augmente la durée des inversions (perte d'explosivité des actions musculaires).
- il induit une perte d'efficacité de la transmission des forces par la ceinture pelvienne.
- enfin, il accentue le déplacement longitudinal du centre de gravité ce qui casse la glisse du bateau (enfouissement des pointes augmentant le freinage de la coque).

Le mouvement de bascule du bassin sur la coulisse est une faute technique qui traduit un défaut de maîtrise du bassin. Il est dû à une mauvaise synchronisation des chaînes musculaires, ou à un manque de force de certains muscles fixateurs (voir en 2). Il peut expliquer l'apparition d'irritations cutanées au niveau des ischions et le développement d'une traumatologie d'usure rachidienne par excès de sollicitation (accentuation de la flexion).

+ Simone (129) indique que les mouvements du bassin lors du coup d'aviron accompagnent le mouvement d'extension du rachis lombaire afin de maintenir le rythme lombo-pelvien. Il observe une corrélation entre l'amplitude et la vitesse des mouvements du tronc et le mouvement du bassin. Cette corrélation correspondrait à une régulation entre la force et la mobilité des muscles ischio-jambier et quadriceps et permettrait de faire le lien avec le travail d'extension des membres inférieurs. L'ensemble se traduit par un léger mouvement de bascule du bassin dans la continuité du mouvement lombaire.

d- Conclusion de l'étude du mouvement du bassin lors du coup d'aviron (figure 7) :

+ Les observations précédentes montrent que le sacrum doit rester dans l'axe de la colonne dans une position neutre entre l'antéversion et la rétroversion permettant à la fois l'extension des membres inférieurs et du dos :

- Sur l'avant il ne peut pas y avoir de rétroversion ou d'antéversion accentuée. L'angle par rapport à la verticale doit être dans la continuité de l'enroulement des vertèbres lombaires.
- Sur l'arrière le sacrum est gainé dans l'axe du rachis lombaire. L'angle sur la verticale est le même que celui du rachis, soit environ 25 à 30° (voir III).

+ Il ne semble pas que le bassin ait un mouvement spécifique de bascule par rapport à la coulisse. Au contraire le développement d'un tel mouvement est considéré comme une faute technique qu'il convient de limiter par un travail de verrouillage et de rééquilibrage musculaire précis des articulations ilio-fémorales et sacro-lombaires.

+ Enfin, le respect de la continuité et du rythme lombo-pelvien lors du coup d'aviron est le gage d'une bonne harmonie entre les mouvements des hanches et des vertèbres lombaires (figure 7).

2- Mouvement du fémur par rapport au bassin :

Il a été vu précédemment (I) que les muscles de la hanche insérés sur le bassin et actifs lors du coup d'aviron sont : le droit antérieur et le psoas-iliaque (fléchisseurs de la hanche) ; les ischio-jambiers et les fessiers (extenseurs de la hanche).

Ces muscles participent à la poussée des jambes lors de la phase aquatique et au mouvement de groupement des jambes sur le bassin lors du retour. En raison des synergies musculaires propres à ces mouvements, ces muscles sont contractés simultanément (travail en co-contraction) et assurent également le verrouillage du bassin dont il a été évoqué la nécessité précédemment (50, 51,

84, 102, 115, 129).

+ Lors de la phase aquatique : les fessiers et les ischio-jambiers en fin de mouvement réalisent l'extension de la hanche (102), le droit antérieur participe à l'extension du genou (102). Le verrouillage du bassin nécessaire au travail des fessiers et des ischio-jambiers (travail en co-contraction) est assuré par le psoas-iliaque (partie iliaque).

+ Lors du retour : le droit antérieur et le psoas-iliaque (ainsi que le tenseur du fascia-lata et le couturier) réalisent la flexion de la hanche, les ischio-jambiers réalisent la flexion du genou. Le verrouillage du bassin est assuré par les fessiers et les ischio-jambiers (115).

+ Lors des inversions, le bassin doit rester fixé malgré l'inversion du travail musculaire et du sens des contraintes, ce qui implique, sur un temps extrêmement court, une parfaite synchronisation des contractions des chaînes musculaires antérieures et postérieures.

3- Mouvement du rachis par rapport au bassin :

Dans la partie III le travail du rachis a été étudié, toutefois il apparaît nécessaire de replacer l'action du rachis par rapport au bassin. Dans son article Guinaudeau (53) rappelle que le bassin est le pivot principal du mouvement et qu'il subit à ce titre les pressions maximales. La zone lombaire est souple et joue un rôle d'amortisseur et d'amplificateur en réalisant la sommation des forces et des actions motrices des membres inférieurs et supérieurs. Dans cette action la chaîne intervertébrale S1-L5 joue un rôle clef. Elle subit un mouvement conjugué d'écrasement vertical ; de flexion - extension et de rotation - inclinaison dans le cas de la pointe (93, 129, 112, 132).

+ Les principaux muscles insérés sur le rachis et sur le bassin sont les abdominaux (transverse, petit et grand oblique, grand droit) et le psoas (muscles fléchisseurs) ; le carré des lombes, le long dorsal, l'ilio-costal et le grand dorsal (muscles extenseurs du rachis sur le bassin).

+ Lors de la phase aquatique la première partie isométrique implique un verrouillage du rachis et du bassin. Les muscles, surtout obliques, transverses et lombaires (112), vont travailler en synergie pour fixer le bassin et les vertèbres (flexion à l'avant) (129). Ce verrouillage est nécessaire à la transmission de la force et du mouvement généré par les membres inférieurs. L'apnée ventilatoire qui participe à ce verrouillage mobilise les abdominaux au travers d'un important travail isométrique (21, 27, 39, 136). Le grand dorsal – courroie de transmission entre les ceintures pelviennes et scapulaires – joue un rôle majeur dans la transmission des forces (27). Il y a une synergie entre le verrouillage du bassin et de la colonne et l'extension de la hanche au travers du respect du rythme lombo-pelvien (voir plus haut) (129, 112).

+ La deuxième partie (extension du rachis) implique un travail des extenseurs et un relâchement des fléchisseurs qui s'opère sans déstabilisation du bassin et s'achève par une position axiale de la colonne sur le sacrum. Il y a donc une dissociation des abdominaux qui se relâchent et du psoas qui contrôle la position du bassin à l'avant.

+ Sur le retour, la flexion du rachis sur le bassin se fait par un travail concentrique des fléchisseurs et un relâchement contrôlé des extenseurs. Ces derniers ont une action freinatrice en fin de mouvement (68, 115). Le verrouillage arrière du bassin est assuré par les ischio-jambiers et les fessiers (50, 51, 68, 84, 115). Le verrouillage isométrique du rachis lors de la seconde partie du retour est assuré par l'ensemble des muscles des chaînes avant et arrière. Il existe une synergie permettant d'assurer à la fois le verrouillage du bassin et de la colonne et la flexion de la hanche au travers du rythme lombo-pelvien (voir plus haut).

+ Les inversions se font sur un bassin et un rachis fixés malgré l'inversion des contraintes, ce qui nécessite une parfaite synchronisation des muscles. La qualité de cette fixation détermine l'efficacité du geste du rameur.

4- Cas de la pointe :

+ Au niveau du bassin, il n'y a aucune différence entre la technique de la couple et de la pointe. Le mouvement de la coulisse se fait dans le plan sagittal et les observations qui ont été faites précédemment concernant le rôle du bassin s'appliquent également à la pointe.

+ Toutefois il a été vu qu'en pointe la dynamique des forces générées par les membres inférieurs internes et externes n'est pas la même.

+ Au niveau du tronc il a été vu précédemment qu'il existe une différence dans l'amplitude des mouvements des cotés externes et internes qui est induite par le travail de rotation, inclinaison.

+ En pointe, la ceinture pelvienne doit également assurer l'harmonisation des dissymétries des forces générées par les membres inférieurs et des mouvements de rotation du rachis dorso-lombaire. Il va donc y avoir un ensemble complexe de contraintes qui vont se répercuter sur les articulations lombo-sacrées, sacro-iliaques et pubienne et doivent être contrôlés par les muscles de la ceinture pelvienne. L'ensemble peut expliquer l'apparition de disjonctions sacro-iliaques deux fois plus fréquentes en pointe qu'en couple (cf données citées en introduction).

5- Synthèse de l'étude du rôle du bassin :

+ L'étude précédente confirme que le bassin est un point d'ancrage et un relais osseux essentiel au mouvement d'aviron.

+ La synergie des différents muscles insérés sur le bassin est essentielle à son verrouillage et doit être contrôlée au niveau des articulations de la hanche et du sacrum. La fixation du bassin tient compte de la mobilité spécifique de chaque articulation et permet aux muscles de générer leurs actions tout en assurant une parfaite transmission de la force développée par les membres inférieurs vers le tronc dans le respect du rythme lombo-pelvien.

+ La position permettant une transmission optimale des forces, sans risque de traumatisme et garantissant une réactivité maximale des muscles lors des inversions est une position intermédiaire pour laquelle le mouvement de bascule du bassin est limité et reste dans la continuité du mouvement des vertèbres lombaires. Il n'existe aucune antéversion du bassin sur l'avant et sur l'arrière l'angle du sacrum sur la verticale est de 25 à 30°.

+ Dans le plan frontal, dans la mesure où la qualité technique du rameur est satisfaisante, le bassin est en appui en équilibre horizontal sur la coulisse.

+ En pointe, les dissymétries des forces et des mouvements générés par les membres inférieurs et la rotation du rachis induisent des contraintes particulières qui doivent être contrôlées au niveau du bassin afin de maintenir l'équilibre lombo-sacré, sacro-iliaque et pelvien.

+ L'importance des contraintes transitant par le bassin est attestée par la fréquence des disjonctions sacro-iliaques signalées par Timm (139).

VI- SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE BIOMÉCANIQUE : RÔLE DE L'ENSEMBLE CEINTURE PELVIENNE - RACHIS - CEINTURE SCAPULAIRE :

(Synthèse voir figure 7b et tableau 5b ci-après)

a- Aspect biomécanique :

- + Les amplitudes des mouvements des membres inférieurs et supérieurs ne sont jamais extrêmes. Toutes les actions se réalisent selon les directions normales au jeu articulaire.
- + Au niveau du tronc, l'amplitude des mouvements est très limitée (exception faite de l'omoplate). Ceux-ci sont exécutés en charge et selon des angles de travail parfois extrêmes :
 - Lors de l'antépulsion, les omoplates sont au maximum de leur course en abduction et lors de la rétropulsion (fin du coup d'aviron) elles sont au maximum de leur course en adduction.
 - Au départ du geste, le rachis est en charge en flexion vers l'avant (étirement maximal). L'amplitude de cet étirement à l'avant est un élément déterminant de la performance, c'est pourquoi la souplesse musculaire et la mobilité articulaire (notamment du rachis et des omoplates) sont des qualités essentielles au rameur.

b- Aspect musculaire :

- + Les cinétiques du travail musculaire sont très complexes, avec l'alternance sans temps d'arrêt, de contractions concentriques et isométriques. Les groupes musculaires agonistes et antagonistes s'opposent par un important travail en co-contraction ou un travail excentrique freinateur. Le travail concentrique musculaire est essentiellement explosif.
- + Les muscles des jambes jouent un rôle majeur dans le développement de la force, tandis que ceux des membres supérieurs ont une action essentielle dans l'accélération et l'allongement de la fin de coup.
- + L'ensemble confirme l'importance des coordinations neuro-motrices dans l'exécution des différentes actions musculaires. Celles-ci ont été observées à deux niveaux :
 - d'une part au niveau intra-musculaire dans le développement simultané d'une force explosive et d'une force endurance.
 - d'autre part au niveau inter-musculaire dans le contrôle des vitesses de contraction par les synergies entre les contractions des agonistes et des antagonistes.

c- Rôle du tronc :

- + Lors du coup d'aviron, le tronc développe sa propre composante de mouvement et de force en passant d'une position d'hyperflexion à une position droite du rachis entre S1 et C7. Le travail est maximal au niveau lombaire et sollicite les muscles rachidiens dans un travail concentrique de faible amplitude, isométrique et excentrique freinateur. Les chaînes avant travaillent en course interne alors que les chaînes arrière travaillent en course externe. Il n'y a aucun moment de relâchement ou de rééquilibrage.
- + Au niveau du tronc, il faut souligner l'importance du travail en co-contraction tout au long du geste. Celui-ci doit être extrêmement précis pour assurer l'équilibre général du rachis et la transmission parfaite des forces des membres inférieurs vers les avirons et leur addition optimale à celles développées par les membres supérieurs. Les muscles ventilatoires et les abdominaux participent largement à cette stabilisation de la colonne.
- + Il ne faut pas négliger l'incidence des déséquilibres de cette chaîne de transmission sur le rachis. Ceux-ci peuvent venir du milieu extérieur (roulis dû aux vagues ou aux fautes techniques), des deux maillons extrêmes (retard ou faiblesse des membres inférieurs et/ou des membres supérieurs) ou des maillons internes de la chaîne (mobilités articulaires intervertébrales, scapulaire ou sacro-lombaire, faiblesses spécifiques de certains muscles stabilisateurs du rachis, de la ceinture pelvienne ou scapulaire...).
- + L'ensemble des déséquilibres sont plus ou moins compensés au niveau des différents étages rachidiens entraînant un surcroît de travail des muscles stabilisateurs (voir un travail excentrique) et potentiellement des problèmes musculaires, tendineux ou articulaires...
- + La pointe en ajoutant une composante de rotation - inclinaison latérale est responsable d'une dissymétrie du travail musculaire à l'origine de développements asymétriques et de déformations scoliotiques du rachis.

d- Rôle du bassin :

+ Le bassin est un point d'ancrage essentiel qui assure la transmission et la sommation des forces et des mouvements des membres inférieurs au rachis en harmonisant les déséquilibres et en compensant les dissymétries. L'importance des contraintes qu'il subit, notamment en pointe où elles sont dissymétriques, explique la fréquence des disjonctions sacro-iliaques en aviron.

+ Il n'y a pas de mouvement spécifique de bascule du bassin au cours du geste d'aviron. Son verrouillage par les muscles de la ceinture pelvienne dans une position optimale (25°) en continuité avec la courbure lombaire, est un élément essentiel à la qualité de la transmission des forces et à la prévention des traumatismes lombaires.

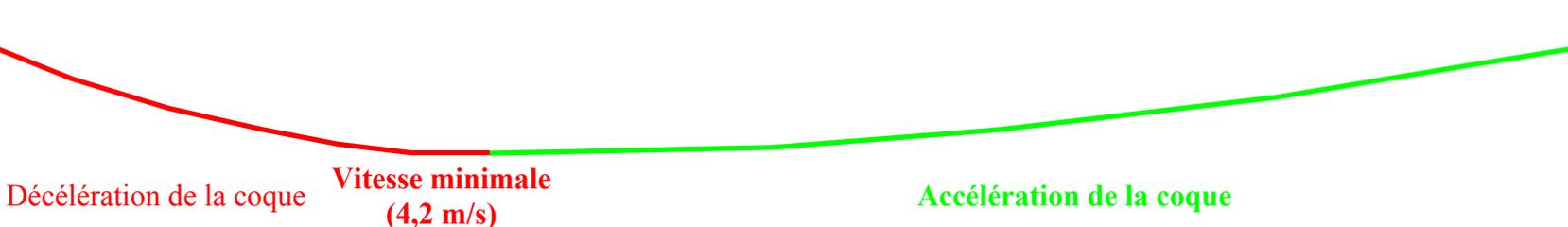
e- Cas de la pointe :

La pointe, en ajoutant une composante de rotation et une dissymétrie dans la répartition du mouvement et des forces entre les membres internes et externes supérieurs et inférieurs, accentue encore le déséquilibre et les compensations des différents étages rachidiens.

(les angles indiqués sont les angles de la rame par rapport à l'axe du bateau.)*

*(** les temps sont calculés à vitesse de compétition – cadence +/- 36 - sur la base de l'étude de Colou (26))*

Figure 7b - Tableau 5b : SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE BIOMÉCANIQUE DU GESTE D'AVIRON

PHASE											
Nom phase	PRISE D'EAU Entrée des pelles dans l'eau	PHASE AQUATIQUE Création de l'appui Poussée de jambe Extension du dos Traction des bras Accélération finale									
Temps (**)	<0,05 seconde (instantané)	0,10"		0,25"		0,35"	0,45"				0,70"
% de la phase aquatique	>25°		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Angle de la rame (*)		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°
Efficacité de la rame	NULLE		Faible				Zone d'efficacité maximale			Faible	
Vitesse de la coque	 <p>Décélération de la coque Vitesse minimale (4,2 m/s) Accélération de la coque</p>										
Force développée	 <p>0N Montée explosive 600N Montée lente 650N Force maximale 500N Diminution lente 25% 0N Diminution rapide</p>										

MOUVEMENT DES SEGMENTS

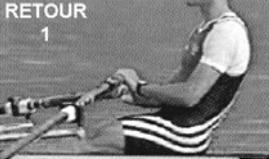
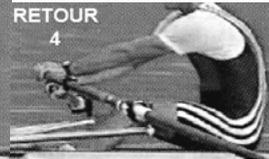
MEMBRES INFÉRIEURS	<i>INVERSION</i>	EXTENSION DES JAMBES ET DES HANCHES		FIXES
DOS	FIXE Dos fixé en hyper-flexion		EXTENSION DU DOS	FIXE Dos fixé en légère extension
MEMBRES SUPÉRIEURS	extension des épaules	FIXES	FLEXION DES BRAS	

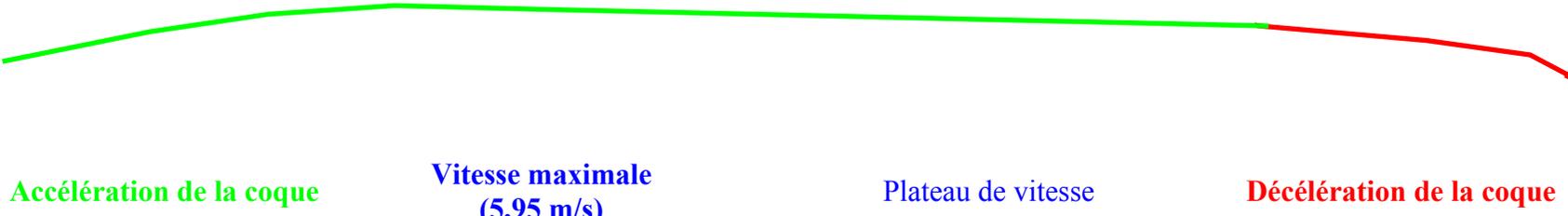
TRAVAIL ARTICULAIRE

Genou	50 à 70°	Extension de 110°		Vitesse max	160 à 180°
Hanche	30°	Extension de 80°		Vitesse max	110 à 115°
Dos/verticale	30° avant		Extension de 60°		25 à 30° arrière
Omoplates	Antépulsion maximale			Adduction explosive	Légère rétropulsion
Epaules/vertical	Extension de 20°	80°		Flexion de 20°	Vitesse max 60°
Epaules/sagittal	10°			Abduction de 70°	Vitesse max 80 à 90°
Coude	160°			Flexion de 85°	Vitesse max 75°

TRAVAIL MUSCULAIRE

Quadriceps Ischio-jambiers Fessiers	Inversion instantanée de la contraction	Explosif	Concentrique (F max)	(diminution de la force)	Isométrie	
		Concentrique				
Abdominaux Lombaires		Isométrie		Excentrique	Isométrie	
				Explosif		
Extenseurs bras		Isométrie			Repos	Repos
Fléchisseurs bras					Explosif	

PHASE						
Nom phase	DEGAGE	RETOUR				
	Sortie des pelles de l'eau	Renvoi des mains	Remplacement du dos	Flexion des jambes	Préparation des pelles	

Temps (**)	<0,10 seconde (instantané)	0,80"					1,70"
Angle de la rame (*)	<135°	130°	105°	80°	55°		<30°
Vitesse de la coque							
	Accélération de la coque	Vitesse maximale (5,95 m/s)		Plateau de vitesse		Décélération de la coque	

MOUVEMENT DES SEGMENTS

MEMBRES INFÉRIEURS	FIXES		FLEXION DES JAMBES ET DES HANCHES
DOS	FIXE	FLEXION DU DOS	FIXE
MEMBRES SUPÉRIEURS	<i>INVERSION</i> abaisssement des mains	EXTENSION DES BRAS	FIXES

TRAVAIL ARTICULAIRE

Genou	160 à 180°		Flexion contrôlée de 110°	50 à 70°
Hanche	110° à 115°		Flexion contrôlée de 80°	30°
Dos/verticale	25 à 30° arrière	Flexion de 60°	30° avant	
Omoplates	Légère rétropulsion	Abduction explosive	Antépulsion maximale	
Epaules/vertical	60°			
Epaules/sagittal	80 à 90°	Adduction de 90°	Abduction de 10°	
Coude	75°	Extension de 85°	160°	

TRAVAIL MUSCULAIRE

Quadriceps	Isométrie		Excentrique freinateur
Ischio-Jambiers			Concentrique
Fessiers			Excentrique freinateur
Abdominaux	Isométrie	Explosif	Isométrie
Lombaires		Excentrique freinateur	
Extenseurs bras	Repos	Explosif	Isométrie
Fléchisseurs bras		Repos	

(* les angles indiqués sont les angles de la rame par rapport à l'axe du bateau.)

(** les temps sont calculés à vitesse de compétition – cadence +/- 36 - sur la base de l'étude de Colou (26))