

Pathologie locomotrice et médecine orthopédique

Exercice musculaire excentrique

Sous la direction de
J.L. Croisier
P. Codine

 **MASSON**

Concept d'équilibre agoniste / antagoniste de l'épaule : analyse critique

Forthomme B.¹, Crielaard J.M.¹, Croisier J.L.¹

Le centre de la cavité glénoïdale est défini par la perpendiculaire passant par le milieu de cette cavité. L'articulation glénohumérale reste stable au cours d'un mouvement lorsque la résultante des forces agissantes passe par ce centre articulaire et induit une action coaptatrice [2,16,60]. Ainsi, une épaule présente une fonction de qualité lorsque les couples de forces transversales (coiffe antérieure et postérieure) et frontales (coiffe antéro-postérieure et deltoïde) interagissent de manière équilibrée [7,53] (**Figure 1**). La stabilisation ligamentaire passive intervient préférentiellement dans les amplitudes extrêmes mais demeure moins efficace pour les positions intermédiaires, les forces de coaptation et la coordination inter-musculaire de la coiffe assurant alors la stabilité [25,40,53,55]. Lors du mouvement actif, une action musculaire équilibrée, associée à l'intégrité des surfaces articulaires, limite les translations humérales [55]. Un déséquilibre de force entre muscles d'action antagoniste provoque une excursion anormale de la tête de l'humérus dans la cavité glénoïdale, source éventuelle de conflit ou d'instabilité [16,20,37,49,52]. Sous l'action deltoïdienne, les vecteurs de forces horizontaux et inférieurs assurés par les muscles infra-épineux, petit rond et subscapulaire stabilisent la tête de l'humérus [16,34,53]. Poppen et Walker [52] et Whiting et Zernicke [60] observent une translation de la tête de l'humérus supérieure à 6 mm en cas de pathologie de la coiffe des rotateurs ; ce glissement génère un tiroir supérieur de l'humérus et provoque un contact trochitérien contre l'acromion [16].

¹ Université et CHU de Liège, Département des Sciences de la Motricité, Service de Médecine Physique et Kinésithérapie-Réadaptation, 4000 Liège, Belgique

L'objectivation quantitative de l'équilibre de force entre muscles d'actions opposées nécessite l'étude des ratios agonistes / antagonistes [6,18]. L'isocinétisme reste la technique de choix dans l'évaluation de la performance musculaire maximale et pour le calcul de la balance musculaire entre groupes agonistes et antagonistes [11,14,24].

Classiquement, l'étude des ratios agonistes / antagonistes concerne la seule contraction concentrique. Néanmoins, l'épaule en mouvement met en jeu des actions concentriques mais également excentriques. Ceci justifie l'élaboration de ratios plus proches de la réalité fonctionnelle en combinant les deux modes de contraction.

I. Elaboration de ratios mixtes et de ratios fonctionnels

Lors de pratiques sportives impliquant spécifiquement le membre supérieur, la coiffe des rotateurs joue un double rôle dans le cycle armer – lancer : mobilisant l'articulation scapulo-humérale, elle stabilise également celle-ci en prévenant une translation excessive de la tête de l'humérus dans la cavité glénoïdale [4,28,43,51,61,62,63]. Plusieurs auteurs décrivent l'action essentielle de cette coiffe dans les séquences successives du geste de lancer [21,28,32,43,49,54]. Pendant l'armer, l'infra-épineux et le petit rond assurent la rotation externe de l'humérus, tandis que le subscapulaire décélère la fin du mouvement [28,54]. Cette sangle antérieure assure ensuite la phase d'accélération du bras et agit comme moteur essentiel du lancer [28,43,54]. Ainsi, les rotateurs internes (RI) transforment leur action frénatrice (excentrique) initiale en force motrice (concentrique) lors de l'accélération. Les rotateurs externes (RE) convertissent leur contraction concentrique de l'armer en un contrôle excentrique lors de la séquence finale de décélération du bras [28,43].

Le mode de contraction excentrique apparaît ainsi hautement spécifique du cycle armer – lancer par l’enchaînement d’actions musculaires frénatrices assumées successivement par les RI et RE [1,19,46,47,48,56,58]. En conséquence, l’exploration musculaire de l’épaule du sujet sportif devrait idéalement comporter un volet excentrique. Noffal [48] critique judicieusement les protocoles exclusivement concentriques car, s’ils précisent la force développée, ils ne reflètent pas exactement la fonctionnalité des séquences gestuelles. Sirota et al. [56] rappellent la complémentarité des deux modes de contraction intervenant lors du lancer. L’action excentrique joue un rôle essentiel dans la prévention lésionnelle : les rotateurs externes freinent le bras dans la phase de décélération finale du membre supérieur, limitant ainsi l’augmentation exagérée des forces de distraction [56]. Lors de travaux antérieurs consacrés à l’exploration isocinétique de l’épaule [23,27], nous avons souligné la reproductibilité satisfaisante du MFM excentrique des RI et des RE avec des CV atteignant respectivement 8,4 % et 12 % à la vitesse de 60°/s. Diverses observations justifient l’utilisation préférentielle de vitesses lentes à intermédiaires en excentrique. Hageman et al. [30] et Mayer et al. [41] rapportent une diminution du MFM excentrique à vitesse élevée (180°/s) en comparaison à une vitesse lente (60°/s). Ce comportement particulier des muscles de l’épaule, non conforme à la relation force – vitesse établie sur le muscle isolé [29,31], ainsi que les plaintes nociceptives et les appréhensions régulièrement rapportées aux vitesses excentriques élevées, justifient notre choix de la vitesse de 60°/s. Rappelons également qu’au genou, la validité de la mesure du MFM en excentrique à haute vitesse a été critiquée [15].

a) Ratio mixte

L’exploration excentrique permet l’élaboration d’un **ratio agonistes – antagonistes mixte** plus fonctionnel [24,25,26,27], rapportant le MFM excentrique (exc) des RE au MFM

concentrique (conc) des RI. A l'image du ratio mixte proposé pour le genou [13,14,15], le choix de la vitesse concentrique élevée de 240°/s pour les RI répond aux critères de spécificité (plus rapide) et de validité de la mesure de force maximale. Pour les motifs exposés précédemment, la vitesse excentrique des RE a été fixée à 60°/s. La reproductibilité (procédure de test-retest) du ratio mixte se caractérise par un CV de 10,5 % [24,27].

Lors d'une comparaison entre différentes populations sportives de haut niveau (volley, tennis, javelot, badminton) et sujet sédentaires, nous observons des ratios mixtes réduits chez les sportifs (volley : $1,07 \pm 0,23$, javelot : $1,04 \pm 0,21$, badminton : $1,05 \pm 0,16$, tennis : $1,10 \pm 0,17$) par rapport aux sédentaires ($1,30 \pm 0,27$) [24]. La réduction s'avère significative ($p < 0,05$) pour les lanceurs de javelot et les joueurs de badminton [26]. Elle correspond à une majoration des performances maximales des RI en mode concentrique entraînés par la pratique sportive, sans augmentation des RE en excentrique. La limite inférieure du ratio mixte chez les sédentaires définissant un contexte « normal » est 1,11. Dans ce travail, tous les sportifs de haut niveau présentent des ratios mixtes plus bas que cette limite. Un tel profil pourrait s'avérer préjudiciables par rapport aux lésions tendineuses de l'épaule sportive.

b) Ratio fonctionnel

Le rôle frénateur des RI en fin d'armer justifie l'élaboration d'un ratio fonctionnel mettant en relation les RI dans leur fonction excentrique et les RE en mode concentrique. Le ratio fonctionnel rend compte du potentiel de stabilité de la sangle antérieure dans des positions luxantes comme l'armer. Malgré toute sa justification biomécanique, ce ratio s'avère actuellement moins exploité dans la littérature [11].

Nous avons élaboré un ratio fonctionnel, dans le cadre d'une étude concernant des épaules instables, en mettant en relation les RE à 60°/s en mode concentrique et les RI à 60°/s en mode excentrique. Le choix de vitesses lentes pour les deux groupes musculaires se justifie par une corrélation d'un bon niveau ($r = 0,75$) entre ce ratio fonctionnel et le potentiel de « repositionnement articulaire » en mode passif d'une position d'armer prédéterminée sur le dynamomètre isocinétique (résultats personnels non publiés). Par ailleurs, même si la phase d'accélération se produit à des vitesses élevées, suggérant le choix de vitesses rapides pour les RI dans le ratio mixte, la phase d'armer présente, elle, une durée plus longue avec une rotation externe du bras se déroulant à vitesse plus lente. Le ratio fonctionnel se situe chez des hommes sédentaires jeunes en moyenne à 0,64 ($\pm 0,11$). Un ratio fonctionnel plus élevé signifierait une faiblesse des RI en mode excentrique par rapport à la performance maximale des RE en concentrique, rendant ainsi l'épaule potentiellement instable. La limite supérieure définit un contexte normal équivalent, dans notre expérience, à 0,75.

II. Effets délétères du déséquilibre agonistes / antagonistes

a) Ratio mixte

Croisier et al. [15] démontrent le caractère hautement discriminant du ratio mixte par rapport aux ratios concentriques classiques lors de l'exploration isocinétique du genou de sportifs présentant des lésions récurrentes des ischio-jambiers. L'intérêt d'un tel ratio mixte pour l'épaule a déjà été suggéré par Wang et Cochrane [57]. Dans leur étude prospective consacrée au volley-ball [57], seule la réduction du ratio mixte (RE exc / RI conc), parmi différents examens de pré-saison (mesure de mobilité gléno-humérale, objectivation de la

position des scapula sur le thorax, test isocinétique concentrique et excentrique des rotateurs d'épaule), apparaît liée au développement de douleurs de l'épaule dominante de type conflit tendineux au cours de la saison suivante. Un ratio mixte déséquilibré, illustrant la faiblesse des RE en mode excentrique, constituerait le facteur de risque principal de la douleur tendineuse de l'épaule [57].

Nous avons démontré que les ratios RE/RI concentriques et mixte d'athlètes semblent réduits du côté dominant, même si le niveau de signification statistique n'est pas toujours atteint en raison d'une variabilité interindividuelle importante. L'altération de l'équilibre agonistes / antagonistes chez le sportif spécialisé se marque particulièrement sur le ratio mixte, avec des valeurs systématiquement inférieures à la limite définie pour l'épaule sédentaire saine [24]. L'augmentation de la force concentrique des RI n'apparaît donc pas proportionnellement compensée par l'action frénatrice des RE. Noffal [48] décrit, pour l'épaule dominante en base-ball, un ratio mixte à 300°/s significativement ($p < 0,05$) plus faible que celui de non sportifs (respectivement $1,17 \pm 0,20$ versus $1,37 \pm 0,30$) ; aucune différence n'est établie entre les deux populations du côté non dominant. Plus classiquement pour des ratios purement concentriques, la plupart des études [1,3,9,10,11,12,17,33,35,42,44,45,47,50,58,59,63,64] confirment la faiblesse relative des RE comparativement aux RI. Ceci s'avère préjudiciable au fonctionnement du complexe de l'épaule : les rotateurs externes jouent un rôle essentiel en fin d'armer car, en maintenant la tête de l'humérus dans la cavité glénoïdale, ils limitent la mise en tension du ligament gléno-huméral inférieur [8]. Sur le plan biomécanique, l'intégration de la contraction excentrique des RE dans la construction du rapport agoniste / antagoniste paraît évidente. Le travail excentrique de la sangle musculaire postérieure assure un rôle protecteur essentiel lors du lancer : ce travail frénateur limite la translation antérieure de la tête de l'humérus lors de la contraction concentrique puissante des RI.

Wilk et Arrigo [62], Wilk et al. [63] et Kibler [37,38,39] proposent, au terme d'une prise en charge préventive et curative de l'épaule du sportif, des exercices de renforcement concentrique et excentrique des RE, afin de compenser la faiblesse de la sangle postérieure [22]. Il importe de souligner qu'un renforcement compensatoire adéquat des antagonistes (RE) ne semble pas préjudiciable à la performance de terrain [17,65].

b) Ratio fonctionnel

Nous avons évalué, en isocinétisme, les performances maximales des RI et RE de 14 épaules instables symptomatiques (résultats personnels non publiés). Dans ce travail, le test comprend 2 séries concentriques à 60°/s (3 répétitions) et 240°/s, et une série excentrique à 60°/s (4 répétitions). La comparaison de l'épaule instable aux limites supérieures caractérisant des populations saines de mêmes genre et âge, montre, chez 36 % des patients instables, une majoration du ratio fonctionnel (RE concentrique 60°/s / RI excentrique 60°/s). Les performances excentriques des RI de ces épaules instables restent trop faibles par rapport aux performances concentriques des RE. Dans la position de l'armer, la contraction excentrique des RI stabilise pourtant la tête de l'humérus lors de la contraction concentrique des RE. Une fonction frénatrice adéquate de la sangle antérieure devrait contribuer à limiter l'instabilité gléno-humérale antérieure.

Dans notre travail, les résultats du score « *Oxford Shoulder Instability Score* » (OSIS), quantifiant la sensation d'instabilité par le patient dans ses différentes activités quotidiennes, apparaissent fortement corrélés au ratio fonctionnel ($r = 0,99$). Une augmentation du score OSIS, indiquant un ressenti d'instabilité plus important, explique à 98 % une augmentation du

ratio fonctionnel (diminution relative des RI en excentrique par rapport aux RE en concentrique). Ce ratio fonctionnel s'avère donc en relation particulièrement étroite avec la sensation d'instabilité de l'épaule. Ceci met bien en exergue le rôle fonctionnel, frénateur et protecteur de la contraction excentrique des muscles RI au complexe articulaire de l'épaule pour des gestes tels l'armer. Le ratio fonctionnel, peu connu, devrait à l'avenir faire partie des paramètres construits et analysés lors de l'évaluation isocinétique de l'épaule instable.

III. Ratios et efficacité du geste

a) Ratio mixte

Dans une étude mettant en relation la performance spécifique de terrain chez le sportif de haut niveau et les résultats obtenus lors de l'évaluation isocinétique des rotateurs de l'épaule, nous avons trouvé une corrélation satisfaisante ($r = - 0,52$) entre le ratio mixte (RE excentrique 60°/s / RI concentrique 240°/s) et la performance du smash en volley-ball [25]. Nos résultats suggéreraient l'intérêt de RI forts en mode concentrique avec des RE peu performants en excentrique pour garantir l'efficacité du geste en volley-ball. Néanmoins, les cinq volleyeurs (sur l'effectif total de 19) souffrant de lésions tendineuses présentaient tous des ratios RE/RI concentriques et mixte nettement réduits. Nous rappelons la relation observée par Wang et Cochrane [57] entre le ratio mixte diminué et la lésion tendineuse de l'épaule du volleyeur. Noffal et al. [48] observent des RE excentriques moins performants au niveau de l'épaule dominante de joueurs de base-ball. Brindle et al. [5] mesurent, par EMG de surface chez le sportif entraîné, une activation moindre de la coiffe postérieure (infra-épineux, petit rond) et du deltoïde postérieur lors d'une poussée déséquilibrante (imposée par l'expérimentateur)

vers la rotation interne, le bras en position d'armer. Cette particularité permettrait, lors du lancer, une meilleure accélération du membre supérieur à plus haute vitesse, sans freinage antagoniste. La décélération soudaine et de courte durée en fin de lancer, grâce à l'activation excentrique de la coiffe postérieure, autoriserait le freinage du bras [5]. Néanmoins, un déficit de contrôle musculaire excentrique dans le transfert de force pourrait solliciter le système capsulo-ligamentaire de l'épaule et de la coiffe de rotateurs, entraînant des lésions anatomiques et une altération de la performance [21,36,43,63].

Nous pensons que le renforcement préventif des RE pour les deux modes de contraction concentrique et excentrique, tout en maintenant des RI performants, éviterait un déséquilibre agonistes / antagonistes, sans pour autant nuire à la performance de terrain. Des études portant sur le rééquilibrage des ratios, l'évolution de la performance et le statut lésionnel de l'épaule devraient s'envisager.

b) Ratio fonctionnel

Une relation entre ratio fonctionnel et performance gestuelle sportive n'a pas été établie dans nos études consacrées aux sportifs spécialisés (relation performance de terrain et évaluation isocinétique).

Le travail concernant l'épaule instable (résultats personnels non publiés) montre qu'une relation positive ($r = 0,71$) existe entre le ratio fonctionnel (RE concentrique 60°/s / RI excentrique 60°/s) et l'aptitude du patient à repositionner son bras dans une position proche de l'armer (70° de rotation externe), les yeux fermés. Dans ce protocole, axé sur l'évaluation

proprioceptive, nous utilisons un dynamomètre isocinétique en mode arthromoteur, le sujet étant installé en décubitus dorsal, bras à 90° d'abduction frontale. La distance (en degrés) à laquelle le sujet peut repositionner son bras par rapport à une position servant de référence (après 3 répétitions d'apprentissage) définit les qualités de repositionnement passif.

Les qualités proprioceptives de repositionnement dans la position luxante de l'armer apparaissent liées à notre ratio fonctionnel, mettant en relation les capacités analytiques des RI dans leur rôle frénateur et la force maximale des RE concentriques. Ce ratio correspondant à la séquence gestuelle de l'armer, les sujets équilibrés au niveau musculaire présenteraient de bonnes qualités proprioceptives.

IV. Conclusions

L'analyse de ratios concentriques RE conc / RI conc représente la démarche classique lors de l'analyse isocinétique de l'équilibre agonistes / antagonistes. L'accès à l'évaluation excentrique autorise l'établissement de ratios mixtes (RE exc / RI conc) et fonctionnels (RE conc / RI exc), particulièrement justifiés dans l'évaluation de l'épaule sportive saine ou pathologique.

Un ratio mixte réduit apparaît lié à la lésion tendineuse de l'épaule du volleyeur. La faiblesse des RE en mode excentrique semble préjudiciable au fonctionnement musculo-tendineux optimal de l'épaule sportive. Les liens établis entre un ratio mixte réduit et la vitesse de la balle lors du smash en volley-ball ne peuvent justifier le déséquilibre agonistes / antagonistes. Un sportif, pour être performant, devrait-il présenter des déséquilibres musculaires et risquer la lésion ?

Un ratio fonctionnel élevé accompagne l'épaule instable. La sensation importante d'instabilité (score OSIS élevé) correspond à une majoration du ratio fonctionnel (RI excentrique insuffisamment performants par rapport à la performance concentrique des RE). Par ailleurs, un sujet démontrant des qualités proprioceptives, à travers une épreuve de repositionnement passif, présente le plus souvent un ratio fonctionnel équilibré.

Summary

Title: Agonist / Antagonist ratio and shoulder: a critical analysis

Besides the concentric classical ratios, the eccentric isokinetic assessment of the muscle shoulder allows us to build some specific ratios.

The mixed ratio combines the eccentric maximal contraction of the external rotators (ER) and the concentric maximal strength of the internal rotators (IR). The mixed ratio is frequently decreased among overhead athletes. This imbalance could rise to shoulder tendinopathy, but seemed to be linked with field performance.

The functional ratio corresponds to the balance between the ER in concentric mode and the IR in eccentric contraction. The unstable shoulder shows a trend to lower functional ratios, highlighting the weakness of the eccentric IR in that pathology.

Références

1. Alfredson H, Pietila T, Lorentzon R. Concentric and eccentric shoulder and elbow muscle strength in female volleyball players and non-active females, *Scand J Med Sci Sports* 1998;8:265-70.
2. Andrews JR, Harrelson GL, Wilk KE, eds. Physical rehabilitation of the injured athlete. 3rd edition. USA : Elsevier, 2004.
3. Bigliani LU, Levine WN. Current concepts review. Subacromial impingement syndrome, *J Bone Joint Surg* 1997;79:1854-68.
4. Bradley JP, Tibone JE. Electromyographic analysis of muscle action about the shoulder, *Clin Sports Med* 1991;10:789-805.
5. Brindle TJ, Nyland J, Shapiro R, Caborn DNM, Stine R. Shoulder proprioception: latent muscle reaction times, *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:1394-8.
6. Brown LE Ed. Isokinetics in Human Performance. USA : Human Kinetics, 2000.
7. Burkhart SS. Arthroscopic treatment of massive rotator cuff tears, *Clin Orthop Relat Res* 2001; 390:107-18.
8. Cain PR, Mutschler TA, Fu FH, Lee SK. Anterior stability of the glenohumeral joint. A dynamic model, *Am J Sports Med* 1987;15:144-8.
9. Chandler TJ, Kibler WB, Stracener EC, Ziegler AK, Pace B. Shoulder strength, power, and endurance in college tennis players, *Am J Sports Med* 1992;20:455-8.
10. Codine P, Bernard PL, Pocholle M, Herisson C. Evaluation et rééducation des muscles de l'épaule en isocinétisme : méthodologie, résultats et applications, *Ann Readapt Med Phys* 2005;48 :80-92.
11. Codine P, Bernard PL, Pocholle M, Benaim C, Brun V. - Influence of sports discipline on shoulder rotator cuff balance, *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:1400-5.

12. Cook EE, Gray VL, Savinar-Nogue E, Medeiros J. Shoulder antagonistic strength ratios: a comparison between college-level baseball pitchers and nonpitchers, *J Orthop Sports Phys Ther* 1987;8:451-461.
13. Croisier JL. Factors associated with recurrent hamstring injuries, *Sports Med* 2004;34:681-695.
14. Croisier JL, Crielaard JM. Isocinétisme et traumatologie sportive, *Rev Med Liege* 2001;56:360-368.
15. Croisier JL, Forthomme B, Namurois MH, Vanderthommen M, Crielaard JM. Hamstring muscle strain recurrence and strength performance disorders, *Am J Sports Med* 2002;30:184-188.
16. Donatelli RA, ed. Physical therapy of the shoulder. 4th edition. Churchill Livingstone : Elsevier Science, 2004.
17. Dupuis C, Tourny-Chollet C, Delarue Y, Beuret-Blaquart F. Influence of baseball practice on strength ratios in shoulder rotator muscles: a new position for isokinetic assessment, *Isokinet Exerc Sci* 2004;12:149-157.
18. Dvir Z, Ed. Isokinetics. Muscle testing, interpretation and clinical applications. 2nd edition; Churchill Livingstone : Elsevier Science, 2004.
19. Ellenbecker TS, Davies GJ, Rowinski MJ. Concentric versus eccentric isokinetic strengthening of the rotator cuff. Objective data versus functional test, *Am J Sports Med* 1988;16:64-69.
20. Enoka RM, ed. Neuromechanics of human movement. 3rd Edition. USA : Human Kinetics, 2002.
21. Fleisig GS, Barrentine SW, Escamilla RF, Andrews JR. Biomechanics of overhand throwing with implications for injuries, *Sports Med* 1996;21:421-435.

22. Forthomme B. Ed. Rééducation raisonnée de l'épaule opérée et non opérée. 2^{ème} édition. Paris : Frison-Roche, 2004.
23. Forthomme B, Croisier JL. Evaluation isocinétique de l'épaule. Médecine Physique et Réadaptation, *ANMSR* 2003;67:fiche 11.
24. Forthomme B. Exploration musculaire isocinétique de l'épaule. Faculté de Médecine. Liège, Université de Liège. Thèse de Doctorat en Kinésithérapie et Réadaptation, 2005.
25. Forthomme B, Croisier JL, Ciccarone G, Crielaard JM, Cloes M. Factors correlated with volleyball spike velocity, *Am J Sports Med* 2005;33:1513-9.
26. Forthomme B, Forthomme L, Crielaard JM, Croisier JL. Field performance of javelin throwers: Relationship with isokinetic findings, *Isokinet Exerc Sci* 2007;15:195-202.
27. Forthomme B, Maquet D, Crielaard JM, Croisier JL. Shoulder isokinetic assessment: a critical analysis, *Isokinet Exerc Sci* 2005;13:59-60.
28. Glousman R. Electromyographic analysis and its role in the athletic shoulder, *Clin Orthop Rel Search* 1993;288:27-34.
29. Goubel F, Lensele-Corbeil G, eds. Biomécanique. Eléments de mécanique musculaire. 2^{ème} édition. Paris : Masson, 1998.
30. Hageman PA, Mason DK, Rydland KW, Humpal SA. Effects of position and speed on eccentric and concentric isokinetic testing of the shoulder rotators, *J Orthop Sports Phys Ther* 1989;11:64-69.
31. Hill AV. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle, *Proc Roy Soc B* 1938 ;126:136-95.
32. Imman VT, Saunders JB, Abbott LC. Observations on the function of the shoulder joint, *J Bone Joint Surg* 26:1-30, 1994.

33. Jerosch J, Castro WH, Sons HU. Secondary impingement syndrome in athletes, *Sportverletz Sportschaden* 1990;4:180-5.
34. Kapandji IA. Ed. Physiologie articulaire : membre supérieur. Tome 1. 5^{ème} édition. Paris : Maloine, 1980.
35. Kennedy K, Altchek DW, Glick IV. Concentric and eccentric isokinetic rotator cuff ratios in skilled tennis players, *Isokinet Exerc Sci* 1993;3:155-9.
36. Kibler WB. Biomechanical analysis of the shoulder during tennis activities, *Clin Sports Med* 1995;14:79-85.
37. Kibler WB. Rehabilitation of rotator cuff tendinopathy, *Clin Sports Med* 2003;22:837-47.
38. Kibler WB. Shoulder rehabilitation: principles and practice, *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:S40-S50.
39. Kibler WB. The role of the scapula in athletic shoulder function, *Am J Sports Med* 1998;26:325-6.
40. Levine WN, Flatow EL. The pathophysiology of shoulder instability, *Am J Sports Med* 2000;28:910-7.
41. Mayer F, Horstmann T, Rocker K, Heitkamp HC, Dickhuth HH. Normal values of isokinetic maximum strength, the strength/velocity curve, and the angle at peak torque of all degrees of freedom in the shoulder, *Int J Sports Med* 1994;15:S19-S25.
42. McCann PD, Bigliani LU. Shoulder pain in tennis players, *Sports Med* 1994;17:53-64.
43. Meister K. Injuries to the shoulder in the throwing athlete. Part one: Biomechanics / pathophysiology / classification of injury, *Am J Sports Med* 2000;28:265-275; 587-601.
44. Miniaci A, Fowler PJ. Impingement in the athlete, *Clin Sports Med* 1993;12:91-110.

45. Mont MA, Cohen DB, Campbell KR, Gravare K, Mathur SK. Isokinetic concentric versus eccentric training of shoulder rotators with functional evaluation of performance enhancement in elite tennis players, *Am J Sports Med* 1994;22:513-17.
46. Ng GYF, Lam PCW. A study of antagonist / agonist isokinetic work ratios of shoulder rotators in men who play badminton, *J Orthop Sports Phys Ther* 2002;32:399-404.
47. Ng LR, Kramer JS. Shoulder rotator torques in female tennis and nontennis players, *J Orthop Sports Phys Ther* 1991;13:40-6.
48. Noffal GJ. Isokinetic eccentric-to-concentric strength ratios of the shoulder rotator muscles in throwers and nonthrowers, *Am J Sports Med* 2003;31:537-41.
49. Pappas AM, Zawacki RM, Sullivan TJ. Biomechanics of baseball pitching. A preliminary report, *Am J Sports Med* 1985;13:216-22.
50. Perrin DH, Robertson RJ, Ray RL. Bilateral isokinetic peak torque, torque acceleration energy, power, and work relationships in athletes and nonathletes, *J Orthop Sports Phys Ther* 1987;9:184-9.
51. Perry J. Anatomy and biomechanics of the shoulder in throwing, swimming, gymnastics and tennis, *Clin Sports Med* 1983;2:247-70.
52. Poppen NK, Walker PS. Normal and abnormal motion of the shoulder, *J Bone Joint Surg* 1976;58:195-201.
53. Rockwood CA, Matsen FA, Wirth MA, Lippitt SB, eds. The shoulder. 3rd edition. USA : Elsevier, 2004.
54. Rokito AS, Jobe FW, Pink MM, Perry J, Brault J. Electromyographic analysis of shoulder function during the volleyball serve and spike, *J Shoulder Elbow Surg* 1998;7:256-63.

55. Schiffrn SC, Rozenywaig R, Antoniou J, Richardson ML, Matsen FA. Anteroposterior centering of the humeral head on the glenoid in vivo, *Am J Sports Med* 2002;30:382-7.
56. Sirota SC, Malanga GA, Eischen JJ, Laskowski ER. An eccentric- and concentric-strength profile of shoulder external and internal rotator muscles in professional baseball pitchers, *Am J Sports Med* 1997;25:59-64.
57. Wang HK, Cochrane T. Mobility impairment, muscle imbalance, muscle weakness, scapular asymmetry and shoulder injury in elite volleyball athletes, *J Sports Med Phys Fitness* 2001;41:403-10.
58. Wang HK, Macfarlane A, Cochrane T. Isokinetic performance and shoulder mobility in elite volleyball athletes from the United Kingdom, *Br J Sports Med* 2000;34:39-43.
59. Warner JJP, Micheli LJ, Arslanian LE, Kennedy J, Kennedy R. Patterns of flexibility, laxity, and strength in normal shoulders and shoulders with instability and impingement, *Am J Sports Med* 1990;18:366-75.
60. Whiting WL, Zernicke RF, eds. Biomechanics of musculoskeletal injury. USA : Human Kinetics, 1998.
61. Wilk KE, Andrews JR, Arrigo CA, Keirns MA, Erber DJ. The strength characteristics of internal and external rotator muscles in professional baseball pitchers, *Am J Sports Med* 1993;21:61-6.
62. Wilk KE, Arrigo C. Current concepts in the rehabilitation of the athletic shoulder, *J Orthop Sports Phys Ther* 1993;18:365-77.
63. Wilk KE, Meister K, Andrews JR. Current concepts in the rehabilitation of the overhead throwing athlete, *Am J Sports Med* 2002;30:136-51.

64. Witvrouw E, Cools A, Lysens R, Cambier D, Vanderstraeten G, Victor J, Sneyers C, Walravens M. Suprascapular neuropathy in volleyball players, *Br J Sports Med* 2000;34:174-80.
65. Wooden MJ, Greenfield B, Johanson M, Litzelman L, Mundrane M, Donatelli RA. Effects of strength training on throwing velocity and shoulder muscle performance in teenage baseball players, *J Orthop Sports Phys Ther* 1992;15:223-8.

Légendes des figures

Figure 1 : Epaule équilibrée : résultante de force coaptatrice passant par la cavité glénoïdale
(D'après : Rockwood et al., 2004).