

É

Réadaptation au travail

Études et recherches

RAPPORT R-931



Travailleurs avec déchirure de la coiffe des rotateurs et asymptomatiques

Corrélation entre des paramètres morphoanthropométriques
et d'imagerie diagnostique et la fonction de l'épaule

*Nicola Hagemeister
Neila Mezghani
Patrice Tétreault
Skalli Wafa
Nathalie Bureau*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST. Abonnement : preventionautravail.com

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2016
ISBN : 978-2-89631-888-9 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Juin 2016



Réadaptation au travail

Études et recherches

RAPPORT R-931

Travailleurs avec déchirure de la coiffe des rotateurs et asymptomatiques Corrélation entre des paramètres morphoanthropométriques et d'imagerie diagnostique et la fonction de l'épaule

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Nicola Hagemeister^{1,2}, Neila Mezghani^{2,3},
Patrice Tétreault², Skalli Wafa⁴,
Nathalie Bureau¹*

¹ *École de technologie supérieure*

² *Centre de recherche du CHUM*

³ *TÉLUQ*

⁴ *Institut de Biomécanique Humaine Georges Charpak,
Université Arts et Métiers ParisTech*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), la Fondation ParisTech programme BIOMECAM et la Chaire ParisTech (France), qui a financé une partie du projet. Nous exprimons également notre considération pour l'aide que Laurence Marck a apportée à la rédaction du présent document.

SOMMAIRE

Les problèmes chroniques de douleur et de perte de fonction de l'épaule touchent jusqu'à 20 % des adultes. Au Québec, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) rapporte que *les troubles musculosquelettiques constituent près de 37 % des lésions professionnelles indemnisées par la CSST¹ et génèrent plus de 40 % des coûts d'indemnisation*. Des données internes de l'IRSST montrent que pour la période 2005-2007, les coûts totaux générés annuellement par les lésions aux épaules acceptées par la CSST atteignaient 393 204 738\$ (Lebau et coll., 2014). Les syndromes de rupture de la coiffe des rotateurs et de tendinopathie comptent pour une large proportion (68 % dans le cas de tendinites) des jours indemnisés pour les dix lésions les plus fréquentes.

Ces indicateurs montrent l'importance du problème, mais mettent aussi en lumière deux autres aspects de ce phénomène : premièrement, il semble que les lésions à l'épaule nécessitent proportionnellement plus de temps pour retrouver une fonction adéquate et permettre un retour durable au travail ; deuxièmement, il en ressort que, proportionnellement, les travailleurs souffrant de blessures à l'épaule sont pris en charge de manière plus systématique par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). Cela témoigne de l'importance d'identifier rapidement les personnes à risque de développer des problèmes de fonction à l'épaule afin 1) d'orienter seulement les travailleurs qui en ont réellement besoin vers des programmes de réadaptation efficaces et adaptés et 2) d'optimiser l'approche de traitement. Ce dépistage précoce passe par une meilleure compréhension des liens existant entre différents paramètres intrinsèques qui corrélent avec la fonction de l'épaule.

L'objectif général du présent projet est de faire des analyses de corrélation entre différents paramètres d'imagerie diagnostique, morphologiques, posturaux et de pseudo-cinématique et la fonction de l'épaule chez deux groupes de travailleurs avec et sans rupture de la coiffe pour tenter d'établir les déterminants de la fonction de l'épaule.

Les différentes analyses menées ont permis de vérifier certains liens entre la morphologie et la fonction de l'épaule. Nous avons pu démontrer que les travailleurs avec rupture transfixiante de la coiffe des rotateurs et infiltration graisseuse sévère avaient une pseudo-cinématique légèrement différente des travailleurs asymptomatiques de la même tranche d'âge. Bien que les résultats de ce projet ne soient pas directement applicables à ce jour, ils montrent bien l'intérêt de poursuivre l'analyse et de continuer à explorer les paramètres qui pourront démontrer un lien avec la fonction de l'épaule des travailleurs atteints de rupture de la coiffe des rotateurs.

Ce travail a permis, pour la première fois, de mener avec des images en pseudo-cinématique sous radiologie basse dose EOS[®] une étude d'envergure sur l'épaule. Ainsi, la question du lien entre différents paramètres intrinsèques et la fonction de l'épaule a été approfondie.

¹ En janvier 2016, la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) est devenue la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST).

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
1. INTRODUCTION.....	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	1
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	3
4. MÉTHODOLOGIE.....	5
4.1 Description des paramètres mesurés.....	5
4.2 Paramètres morphologiques	5
4.2.1 Mesure de l'orientation de la glène.....	5
4.2.2 Mesure de la longueur de l'acromion	6
4.2.3 Mesure du déport médial	7
4.2.4 Mesure de l'espace sous-acromial	7
4.2.5 Analyse de fiabilité des paramètres	8
4.3 Analyse pseudo-cinématique.....	8
4.3.1 Population à l'étude	8
4.3.2 Mesure de la pseudo-cinématique.....	9
4.4 Paramètre postural : Mesure de l'orientation de l'omoplate par rapport au thorax.....	9
4.5 Paramètres diagnostiques	10

4.6	Mesure de la fonction.....	11
5.	RÉSULTATS.....	13
5.1	Analyse de fiabilité des paramètres morphologiques	13
5.2	Pseudo-cinématique et infiltration graisseuse	14
5.2.1	Population à l'étude	14
5.2.2	Résultats de l'analyse pseudo-cinématique	14
5.3	Paramètre postural	16
5.4	Paramètres diagnostiques	19
5.5	Analyse multivariée	20
6.	DISCUSSION.....	27
6.1	Analyse de fiabilité des paramètres morphologiques	27
6.2	Analyse pseudo-cinématique.....	27
6.3	Paramètre postural : Mesure de l'orientation de l'omoplate par rapport au thorax.....	28
6.4	Paramètres diagnostic	28
6.5	Analyse multivariée	28
7.	PORTÉE ET LIMITES.....	29
8.	CONCLUSION.....	31
9.	BIBLIOGRAPHIE.....	33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Paramètres morphologiques.....	13
Tableau 2 – Caractéristiques des travailleurs de l'étude pseudo-cinématique.....	14
Tableau 3 – Comparaison des travailleurs avec rupture de coiffe et les travailleurs asymptomatiques : infiltration graisseuse et score de Constant.....	14
Tableau 4 – Données démographiques pour l'analyse du paramètre postural.....	17
Tableau 5 – Orientation de l'omoplate pour les trois groupes avec le bras le long du corps.....	18
Tableau 6 - Orientation de l'omoplate pour les trois groupes pour le bras à 90° d'élévation.....	19
Tableau 7 – Description des variables et informations reliées.....	21
Tableau 8 – Coefficient de corrélation entre les variables analysées.....	23
Tableau 9– Valeur de p pour la corrélation observée entre les variables.....	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Version de la glène	6
Figure 2 – Inclinaison de la glène	6
Figure 3 – Longueur de l'acromion	7
Figure 4 – Déport médial	7
Figure 5 – Espace sous-acromial	8
Figure 6 – Déplacement de la tête humérale sur la surface de la glène pour six angles d'élévation du bras (tiré de Zhang et coll., 2015).....	15
Figure 7 – Déplacement du centre de la tête humérale par rapport à la glène pour six angles d'élévation du bras, A/P (antéro-postérieur), S/I (infero-supérieur), M/L (médio-latéral) (tiré de Zhang et coll., 2015)	16
Figure 8 - Représentation des deux premières composantes principales pour les variables à l'étude.....	22

1. INTRODUCTION

La présente étude découle du projet IRSST 0099-8250 (N. Hagemeister et coll., 2014), qui avait pour but de proposer un nouvel indice radiologique et de vérifier si celui-ci corrélait avec la fonction de l'épaule chez des travailleurs souffrant de rupture transfixiante de la coiffe des rotateurs. Pour cela, le protocole du projet IRSST 0099-8250 prévoyait d'acquérir des images diagnostiques (par résonance magnétique, par échographie dynamique et statique), des images en pseudo-cinématique sous radiologie basse dose EOS[®] et de recueillir des informations cliniques pertinentes à l'égard de cette affection auprès de 90 travailleurs. Les travaux de recherche du projet IRSST 0099-8250, qui ont duré trois ans, ont effectivement permis de proposer un indice radiologique à partir d'images de pseudo-cinématique sous radiologie basse dose EOS[®] et de faire tous les tests prévus sur l'ensemble de la cohorte annoncée. L'indice choisi pour cette première étude représentait le déplacement relatif de la tête humérale par rapport à la glène pour sept positions d'élévation active du bras. Pour obtenir cette mesure 3D, la méthode faisait appel à une reconstruction tridimensionnelle de la scapula (omoplate) personnalisée à partir d'un modèle générique paramétré et d'une approximation de la forme et de la position de la tête humérale du travailleur.

Grâce au projet IRSST 0099-8250, nous avons également à notre disposition des données cliniques de 60 travailleurs atteints de rupture transfixiante de la coiffe des rotateurs et de 30 travailleurs asymptomatiques. La base de données a été acquise en s'assurant que les deux groupes étaient comparables selon l'âge et le sexe. Les travailleurs atteints avaient tous au moins une rupture transfixiante du tendon du supra-épineux et des niveaux de fonction variables, comme mesuré par deux questionnaires de perception des incapacités, soit le QuickDASH (Gummesson et coll., 2006) et le score de Constant (Constant et Murley, 1987). Pour tous ces travailleurs, les résultats des examens suivants ont été conservés : imagerie diagnostique par IRM, échographies statique et dynamique, examen clinique, questionnaires.

L'objectif général du présent projet est de faire des analyses de corrélation entre différents paramètres d'imagerie diagnostique, morphologiques, posturaux et de pseudo-cinématique et la fonction de l'épaule chez deux groupes de travailleurs avec et sans rupture de coiffe pour tenter d'établir certains déterminants de la fonction de l'épaule.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Les problèmes chroniques de douleur et de perte de fonction de l'épaule affligent jusqu'à 20 % des adultes (Pope et coll., 1997). La proportion serait plus élevée chez les adultes âgés de plus de 50 ans. En l'an 2000, ces problèmes ont engendré des coûts directs de 7 milliards de dollars aux États-Unis (Meislin et coll., 2005). Au Québec, l'IRSST rapporte que *les troubles musculosquelettiques constituent près de 37 % des lésions professionnelles indemnisées par la CSST et génèrent plus de 40 % des coûts d'indemnisation* (www.irsst.qc.ca). En 2014, le nombre de lésions de type TMS s'établit à 23 972, représentant 27,2 % des dossiers ouverts et acceptés. Pour les années 2011 à 2014, cette proportion est relativement stable, soit un peu plus du quart des dossiers ouverts et acceptés. Des données internes de l'IRSST montrent que pour la période 2005-2007, les coûts totaux générés annuellement par les lésions aux épaules acceptées par la

CSST atteignaient 393 204 738\$ (Lebau et coll., 2014). Les syndromes de rupture de coiffe des rotateurs et de tendinopathie comptent pour une large proportion (68 % dans le cas de tendinites) des jours d'indemnisation pour les 10 lésions les plus fréquentes.

Ces indicateurs montrent l'importance du problème, mais mettent aussi en lumière deux autres aspects du phénomène : premièrement, il semble que les lésions à l'épaule nécessitent proportionnellement plus de temps pour retrouver une fonction adéquate et permettre un retour durable au travail ; deuxièmement, il en ressort que, proportionnellement, les travailleurs souffrant de blessures à l'épaule sont pris en charge de manière plus systématique par la CNESST. Ainsi, il en résulte que ces lésions coûtent plus cher que celles survenant aux membres inférieurs ou au tronc. Cela témoigne de l'importance d'identifier rapidement les personnes à risque de développer des problèmes de fonction à l'épaule afin 1) d'orienter seulement les travailleurs qui en ont réellement besoin vers des programmes de réadaptation efficaces et adaptés et 2) d'optimiser l'approche de traitement. Ce dépistage précoce passe par une meilleure compréhension des liens existant entre différents paramètres intrinsèques qui corréleraient avec la fonction de l'épaule.

Par paramètres intrinsèques, nous entendons l'ensemble des paramètres propres au travailleur, par opposition aux paramètres extrinsèques qui seraient reliés à la nature de son travail. Ainsi, ces paramètres réfèrent à la biomécanique de l'épaule (paramètres pseudo-cinématiques), à sa morphologie (orientation de la glène, longueur de l'acromion, déport médial et espace sous-acromial), à son tableau clinique (paramètres diagnostiques d'imagerie tels que l'infiltration graisseuse et la taille de la déchirure ainsi que le nombre de tendons atteints) et à sa posture (position de l'omoplate par rapport au thorax).

Le choix de ces paramètres intrinsèques se base sur les travaux qui ont montré qu'il y avait probablement un lien entre ces paramètres et la fonction de l'épaule (Terrier et coll., 2006; Roche et coll., 2006; Banas et coll., 1995; Bey et coll., 2007; Gumina et coll., 2009; Picco et coll., 2010).

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif général du présent projet est de faire des analyses de corrélation entre différents paramètres d'imagerie diagnostique, morphologiques, posturaux et de pseudo-cinématique et la fonction de l'épaule chez deux groupes de travailleurs avec et sans rupture de coiffe pour tenter d'établir certains déterminants de la fonction de l'épaule. Plus spécifiquement, nous comptons analyser plusieurs paramètres potentiellement associés à la perte de fonction après une rupture de coiffe, soit des paramètres morphologiques (orientation de la glène, longueur de l'acromion, déport médial, espace sous-acromial), un paramètre postural (position de l'omoplate par rapport au thorax), des paramètres diagnostiques (taille des déchirures, nombre de tendons atteints, rétraction des tendons, infiltration graisseuse) et un paramètre pseudo-cinématique (patron de déplacement du centre de la tête humérale par rapport à la glène).

Cette analyse vise à développer un indice, basé sur la combinaison des différents paramètres corrélés au niveau fonctionnel des travailleurs avec et sans déchirure de coiffe. Si un tel indice peut être défini, il sera alors possible de proposer une nouvelle étude, cette fois-ci prospective, où des travailleurs seront suivis sur une période de temps et où la valeur prédictive de ces paramètres fonctionnels (ou de leur combinaison) pour la récupération fonctionnelle et le retour au travail pourra être confirmée.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 Description des paramètres mesurés

Premièrement, nous avons analysé des **paramètres morphologiques** de la scapula et de l'humérus : *l'orientation de la glène* (version et inclinaison), la *longueur de l'acromion*, le *déport médial de l'humérus* et *l'espace sous-acromial* (sous-section 4.2). Chacun de ces paramètres a une influence théorique sur la mécanique de l'épaule. Pour effectuer cette analyse, nous avons utilisé les modèles 3D personnalisés issus de l'acquisition en pseudo-cinématique EOS[®]. Ensuite, nous avons analysé le **paramètre de pseudo-cinématique** calculé au cours du projet précédent (sous-section 4.3) et un **paramètre postural** (sous-section 4.4), en supposant qu'une omoplate moins rétroversée engendre moins de risques d'accrochage en permettant un meilleur dégagement de l'espace sous-acromial dans les premiers degrés d'élévation du bras. Nous avons également inclus dans l'analyse des **paramètres diagnostiques** issus des images IRM (sous-section 4.5) et la fonction de l'épaule (sous-section 4.6).

4.2 Paramètres morphologiques

La suite du texte présente les différentes mesures de la morphologie de l'omoplate issues du modèle 3D personnalisé obtenu grâce aux reconstructions faites à partir des images EOS[®]. Il faut rappeler ici qu'initialement le modèle 3D issu d'EOS[®] a été bâti dans le but de quantifier le déplacement relatif entre le centre de la tête et le centre de la glène, dont le repère est fixe dans l'espace. Pour cela, il était surtout important de définir un repère de mesure fiable, le repère de la glène. Les résultats d'analyse de répétabilité *in vivo* et de précision *in vitro* ont montré que la fiabilité et la précision de la mesure correspondaient aux exigences requises (Lagacé PY, 2013). Par contre, nous n'avons pas fait d'analyses approfondies pour évaluer la fiabilité des paramètres morphologiques autres, à savoir l'orientation de la glène, la longueur de l'acromion, le déport médial et l'espace sous-acromial. La manière dont ces paramètres ont été définis et mesurés est présentée dans les sections subséquentes.

4.2.1 Mesure de l'orientation de la glène

L'orientation de la glène peut être définie par deux caractéristiques principales : la version et l'inclinaison. Afin de définir ces deux caractéristiques certains plans ont été pris en compte : le plan de la scapula, déterminé par trois points soit, l'angle inférieur, l'épine de la scapula et le point milieu entre le bord supérieur et le bord inférieur de la glène. Le plan de la glène est défini par les bords supérieur, inférieur, antérieur, postérieur de la glène. La version de la glène est l'orientation de celle-ci dans le plan transverse de la scapula (figure 1).

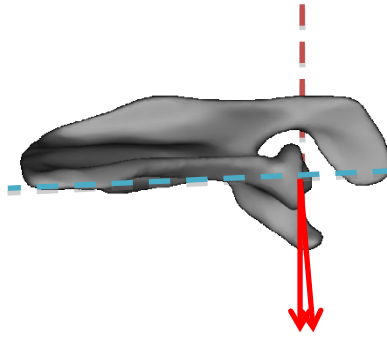


Figure 1 – Version de la glène

L'inclinaison de la glène est l'orientation de celle-ci par rapport au bord latéral de l'omoplate dans le plan frontal. Tous ces plans ont été définis sur les modèles 3D issus des reconstructions à partir des radiographies EOS[®]. La version de la glène est donc mesurée sur les modèles 3D en tenant compte de l'angle entre l'intersection du plan de la scapula et celui de la glène dans ce plan de coupe. L'inclinaison est l'angle entre le plan de la scapula et celui de la glène (par rapport au bord latéral de l'omoplate) (figure 2).

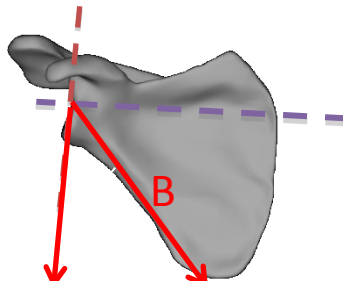


Figure 2 – Inclinaison de la glène

4.2.2 Mesure de la longueur de l'acromion

Sur le modèle 3D, l'acromion est paramétré par une ellipse à l'endroit où celui-ci est à l'intersection au plan de la scapula. Le grand axe de cette ellipse représente la longueur de l'acromion (figure 3).

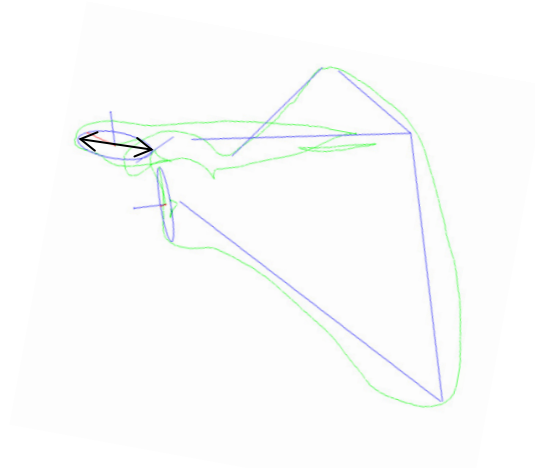


Figure 3 – Longueur de l'acromion

4.2.3 Mesure du déport médial

Toujours sur les modèles 3D, on définit un vecteur représentatif de l'axe longitudinal de l'humérus. On place ensuite un point au centre de la tête humérale, approximée par la technique des moindres carrés et représentée par une sphère. La distance entre le centre de la tête humérale et l'axe représente le déport médial (figure 4).

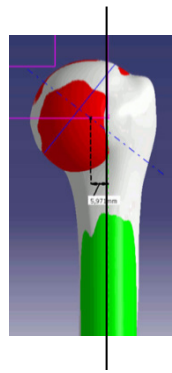


Figure 4 – Déport médial

4.2.4 Mesure de l'espace sous-acromial

Les modèles 3D sont utilisés pour déterminer l'espace sous-acromial, qui est défini comme étant la plus petite distance entre la surface inférieure de l'acromion et la surface supérieure de la tête humérale (figure 5).

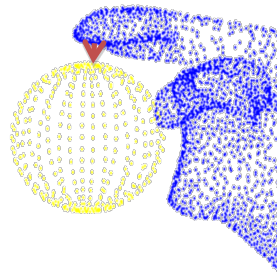


Figure 5 – Espace sous-acromial

4.2.5 Analyse de fiabilité des paramètres

Avant de pouvoir inclure tous ces paramètres dans une analyse multivariée, il nous a semblé nécessaire d'en évaluer la fiabilité. Pour rappel, le modèle 3D personnalisé a été développé au départ dans le but de générer un repère fiable et répétable de la glène pour la mesure de la pseudo-cinématique de l'épaule et non pour obtenir un modèle morphologiquement réaliste.

Pour évaluer la fiabilité de ces mesures, nous avons donc effectué trois reconstructions successives des scapulas de 10 travailleurs, et calculé les écarts types pour ces mesures sur cette population.

4.3 Analyse pseudo-cinématique

4.3.1 Population à l'étude

Pour étudier l'influence de la pseudo-cinématique, nous avons utilisé les données provenant de 15 travailleurs qui présentaient des symptômes à l'épaule (déclin de la fonction ou douleur) pendant plus de trois mois, des ruptures transfixiantes de la coiffe des rotateurs et une infiltration graisseuse, diagnostiquée sur les images de résonance magnétique (IRM). L'ampleur des ruptures des tendons de la coiffe a été évaluée grâce aux tendons du sous-épineux, du sous-scapulaire et de l'infra-épineux, tandis que le muscle petit rond a été exclu afin de simplifier et renforcer l'analyse statistique. L'infiltration graisseuse a été classifiée selon la méthode de Goutallier (Goutallier et coll., 1994), et seuls les travailleurs ayant eu une infiltration grave (échelle Goutallier III ou IV) pour au moins un des trois muscles précités ont été inclus.

Par ailleurs, 28 travailleurs asymptomatiques, d'âge similaire aux travailleurs, ne présentant aucune douleur ou limitation de fonction, et n'ayant jamais subi de traumatisme ou de chirurgie à l'épaule ont été recrutés pour faire partie du groupe de contrôle. Six travailleurs asymptomatiques présentaient des ruptures partielles des tendons de la coiffe, mais aucun d'entre eux ne montrait de rupture transfixiante. Sept travailleurs asymptomatiques présentaient une infiltration graisseuse modérée et quatre autres avaient des ruptures partielles et une infiltration graisseuse légère. Tous ces travailleurs ont été inclus dans la présente étude.

4.3.2 Mesure de la pseudo-cinématique

La valeur de déplacement gléno-huméral par rapport à la glène a été normalisée selon les dimensions des épaules de chaque patient de la manière suivante : le déplacement inféro-supérieur est exprimé en pourcentage de la hauteur de la glène; le déplacement médio-latéral est exprimé en pourcentage de la largeur de la glène et le déplacement antéro-postérieur est exprimé en fonction du diamètre de la tête humérale. Ainsi, les déplacements tête-glène sont adimensionnels, ce qui permet de s'affranchir de la variabilité de la taille des travailleurs ayant participé à l'étude.

Les déplacements 3D gléno-huméraux (antéro-postérieur, inféro-supérieur et médio-latéral) entre travailleurs avec rupture de coiffe et les travailleurs asymptomatiques ont été comparés en utilisant une analyse statistique basée sur un test t sur des échantillons indépendants. Une valeur $p < 0,05$ est considérée comme significative. L'analyse statistique a été réalisée en utilisant MATLAB[®] (version 2014b, MathWorks Inc.).

4.4 Paramètre postural : Mesure de l'orientation de l'omoplate par rapport au thorax

Le paramètre postural correspond à l'orientation de l'omoplate par rapport au thorax. Pour pouvoir définir cette orientation, nous avons déterminé deux repères distincts : un repère scapula et un repère thorax définis de la manière suivante : le repère scapula est établi par un système d'axes dont l'origine est placée au centre de la glène. Lors de la reconstruction 3D, la glène a été paramétrée par une ellipse qui est utilisée pour la description de ce repère : le centre de l'ellipse forme le centre du repère, l'axe x du repère glène est formé par le petit axe de l'ellipse, vers l'avant (en antéro-postérieur). La rotation du corps de la scapula autour de cet axe est la rotation vers le haut (upward rotation). L'axe y du repère glène est formé par le grand axe de l'ellipse, vers le haut et la rotation autour de cet axe est la rotation externe. L'axe z du repère glène est le produit vectoriel des deux axes précédents et la rotation de la scapula autour de cet axe constitue l'inclinaison postérieure (posterior tilt). Le repère thorax est défini selon les recommandations de l'International Society of Biomechanics (ISB) (Wu et coll., 2005). La construction de ce repère nécessite l'utilisation de quatre points anatomiques : C7: apophyse épineuse (spinous process) qui est la septième vertèbre cervicale de la colonne vertébrale; T8 : apophyse épineuse de la huitième vertèbre thoracique; IJ : point le plus profond de ce que l'on appelle l'incisure jugulaire (fourchette sternale); PX : processus xiphoïde (xiphoideus process) qui est le point le plus caudal sur le sternum. Tous ces points ont été définis préalablement lors de l'acquisition radiographique.

Afin d'explorer l'apport du paramètre postural, une étude prospective a été conduite sur 25 travailleurs asymptomatiques et 40 travailleurs pathologiques. L'objectif de cette étude était de vérifier si les altérations fonctionnelles de l'épaule pouvaient être expliquées par l'orientation de l'omoplate à 90° d'élévation du bras dans le plan de l'omoplate (abduction pure). Pour cela, le signe d'accrochage positif a été déterminé à l'aide d'une évaluation clinique par le test de

Hawkins et Neer (Hawkins et coll., 1980; Neer, 1983). Ainsi, 23 travailleurs avaient une rupture de la coiffe accompagnée d'un syndrome d'accrochage tandis que les 17 autres avaient seulement une rupture de la coiffe. L'orientation de l'omoplate par rapport au thorax a été calculée avec le bras au repos pour toute la cohorte. À 90° d'élévation du bras, seuls les travailleurs pour lesquels une élévation a été observée effectivement dans le plan de l'omoplate, c'est-à-dire à 0-30° par rapport au plan frontal, ont été analysés. Cette analyse *a posteriori* a été introduite afin de comparer les données qui correspondaient à des mouvements similaires. Il a en effet été constaté que, malgré des instructions précises données aux travailleurs lors de l'élévation de leur bras dans la cabine EOS[®], ceux-ci ne respectaient pas toujours l'élévation dans le plan de l'omoplate, soit pour des raisons d'exiguïté de la cabine EOS[®], soit pour cause de douleur. L'orientation réelle de l'omoplate étant impossible à évaluer à l'œil nu, cette analyse a dû être faite *a posteriori*.

L'analyse statistique a été effectuée avec le logiciel SPSS (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) et le seuil de signification a été établi à $p < 0,05$. Une analyse de variance univariée a permis de comparer les trois groupes. Les variables dépendantes étaient le score de Constant, l'indice de masse corporelle, la douleur et l'orientation de l'omoplate. Le test de Bonferroni a été utilisé en post-hoc afin de déterminer s'il y avait des différences entre les groupes. Une analyse de covariance a été utilisée pour évaluer si l'indice de masse corporelle était un facteur confondant pour l'orientation de l'omoplate au repos.

4.5 Paramètres diagnostiques

Nous avons exploité les **images diagnostiques** de la manière suivante : nous avons analysé les tailles des déchirures, le nombre de tendons atteints, la rétraction des tendons et l'infiltration graisseuse par les moyens classiques de diagnostic à partir des images échographiques et IRM. Nous avons également analysé le câble de la coiffe, tel que visible sur les images IRM. Le câble est une bande de fibres orientée de manière transversale et qui est issue du ligament coraco-acromial. Il se situe sous la surface des tendons infra et supra-épineux et se termine sur le bord supérieur du petit rond (Clark et coll., 1992). Le câble a la forme d'une parabole et marque une région où les tendons sont relativement peu vascularisés, connue sous le nom de croissant (crescent). Le complexe câble-croissant a été décrit comme étant un pont suspendu qui sert de transmission et de répartition des charges biomécaniques à l'humérus (Burkhart et coll., 1992).

Deux radiologues spécialisés en imagerie musculosquelettique ont analysé les images IRM de 57 épaules pathologiques (âge moyen des travailleurs $57 \pm 6,5$ ans; 58 % d'hommes) et de 30 épaules asymptomatiques (âge moyen des travailleurs $56 \pm 7,3$ ans; 57 % d'hommes) pour dégager un consensus sur les paramètres suivants : la taille (longueur, largeur, épaisseur) des déchirures des tendons du supraépineux (SS) et de l'infra-épineux (IS), la rétraction de ces deux tendons, l'infiltration graisseuse et l'atrophie musculaire du SS et du SI, la taille du câble de la coiffe (largeur, épaisseur) et la position du câble (distance par rapport à la grande tubérosité), l'intégrité des insertions antérieures et postérieures du câble de la coiffe. Pour tous ces travailleurs, nous avons également en notre possession les mesures de la fonction estimée par le score de Constant, le QuickDash et le questionnaire SF-12v2.

Nous avons effectué une analyse univariée pour la combinaison des variables entre elles deux par deux. Puis, nous avons utilisé un modèle de régression linéaire (modèle logistique par étapes) pour déterminer la combinaison de paramètres permettant de prédire la fonction. Le seuil de signification était déterminé à $p < 0,05$.

4.6 Mesure de la fonction

Dans un premier temps, chaque participant a reçu de la part d'un orthopédiste une évaluation clinique comprenant l'anamnèse ainsi qu'un examen physique (manœuvre d'accrochage : Neer, Hawkins... ; manœuvres topographiques de coiffe : Jobe, *full cam test*, *speed*... ; évaluation de l'amplitude articulaire passive et active; palpation). De plus, chaque participant a répondu aux questionnaires QuickDASH, Constant et SF-12v2.

Le QuickDASH est autoadministré et très largement utilisé en clinique (Gummesson et coll., 2006). Le score de Constant a été administré par un physiothérapeute. Il inclut un examen physique et utilise un pointage qui permet d'évaluer spécifiquement la fonction de l'épaule. L'examen physique inclut une mesure de l'amplitude articulaire maximale (par goniomètre) et de la force maximale que le travailleur peut développer (à l'aide d'un dynamomètre). Il a démontré une bonne fidélité inter- et intraobservateur (Kirkley et coll., 2003).

Ces deux scores, qui ont chacun leurs avantages et inconvénients, sont utilisés pour déterminer le niveau fonctionnel des travailleurs. Il est reconnu que les variables âge et sexe ont un impact sur le score de Constant (Katolik et coll., 2005). Les valeurs du score doivent donc être ajustées en fonction de ces variables. Le questionnaire QuickDASH est plus rapide à remplir, plus répandu dans le domaine clinique, mais aussi plus subjectif et il n'inclut pas de mesure directe de la fonction de l'épaule. Aucune étude n'a démontré, à notre connaissance, l'influence des facteurs âge et sexe sur ce dernier. Puisque le score de Constant peut être influencé par la situation psychosociale des travailleurs, nous avons également inclus la mesure du SF-12v2. Ce questionnaire est une version courte et validée du SF-36v2. Il permet de vérifier si l'état psychologique du travailleur constitue une variable confondante dans l'établissement du score fonctionnel.

5. RÉSULTATS

Cette section est divisée en cinq sous-sections présentant chacune les résultats d'études séparées ayant 1) essayé de déterminer la fiabilité de mesures de paramètres morphologiques, 2) vérifié l'impact de l'infiltration graisseuse sur la pseudo-cinématique (Zhang et coll., 2015), 3) contrôlé l'impact du syndrome d'accrochage sur la posture (Ohl et coll., 2015), 4) établi la corrélation de paramètres diagnostiques avec la fonction (Deslauriers et coll., 2015) et 5) consisté en une analyse multivariée avec tous ces paramètres.

5.1 Analyse de fiabilité des paramètres morphologiques

Le Tableau 1 présente les résultats sur la mesure des paramètres morphologiques chez 10 travailleurs dont les omoplates ont été reconstruites trois fois. Il montre la moyenne des trois mesures et son écart-type.

Tableau 1 – Paramètres morphologiques

	Version glène (deg)	Inclinaison glène (deg)	Longueur acromion (mm)	Espace sous- acromial (mm)
Moyenne	3,2	42,0	45,3	5,9
Écart type	2,0	3,9	2,6	2,2

On constate que les écarts types sont parfois très élevés, représentant dans certains cas plus de 50 % de la mesure. Cela démontre la nécessité de raffiner le modèle 3D afin que ces paramètres morphologiques puissent être mesurés avec une plus grande précision et une meilleure fiabilité.

Rappelons ici qu'initialement, le modèle 3D a été développé pour obtenir une référence fiable et précise pour la mesure de la pseudo-cinématique gléno-humérale. Les efforts se sont donc concentrés pour obtenir un repère glène précis et dont le résultat peut être reproduit. Or, les mesures morphologiques présentées ici sont directement issues des modèles 3D personnalisés qui n'ont pas été adaptés ou optimisés pour l'obtention de ces mesures. À ce stade-ci, l'analyse des corrélations entre ces variables et la fonction de l'épaule présente donc un intérêt limité. Nous avons malgré tout inclus plusieurs de ces mesures dans l'analyse multivariée présentée à la sous-section 5.4. Ces mesures sont celles qui peuvent être extraites de manière automatique des modèles 3D personnalisés.

Pseudo-cinématique et infiltration graisseuse

5.1.1 Population à l'étude

Les caractéristiques des travailleurs sont résumées dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Caractéristiques des travailleurs de l'étude pseudo-cinématique

Groupe	Âge (années) *	Homme/Femme	IMC (kg/m ²) **	Total
	(P = .013) (moyenne ± écart type)		(P = .001) (moyenne ± écart type)	
Travailleurs avec rupture de coiffe	59,1 ± 4,7	8/7	30,0 ± 4,4	15
Travailleurs asymptomatiques	55,5 ± 7,5	15/13	23,1 ± 3,0	28

IMC, Indice de masse corporelle. * P < 0.05; ** P < 0.01.

5.1.2 Résultats de l'analyse pseudo-cinématique

Les angles d'élévation gléno-humérale moyens (moyenne ± écart type) que les travailleurs ont maintenus étaient de 15° ± 5°, 24° ± 6°, 29° ± 6°, 40° ± 6°, 58° ± 7° et 84° ± 5°. Ces angles ont été déterminés *a posteriori* sur la base de l'analyse de la reconstruction 3D. Le reste du texte fera référence aux positions indiquées dans le protocole : 10°, 20°, 30°, 45°, 60° et 90°. Le Tableau 3 montre les résultats concernant l'infiltration graisseuse, la taille de la rupture et la fonction de l'épaule pour les travailleurs avec rupture de coiffe et les travailleurs asymptomatiques.

Tableau 3 – Comparaison des travailleurs avec rupture de coiffe et les travailleurs asymptomatiques : infiltration graisseuse et score de Constant

Groupe	Infiltration graisseuse selon le Score Goutallier (0-5)	Taille de la rupture (mm ²) (moyenne ± écart-type)	Douleur (0-10) (moyenne ± écart-type)	Score de Constant **	Total
				(P = .001) (0-100) (moyenne ± écart-type)	
Travailleurs avec rupture de coiffe	3-4	1071 ± 659	6,6 ± 2,3	50,4 ± 18,1	15
Travailleurs asymptomatiques	0-2	-	0	93,8 ± 5,9	28

Score de Goutallier : score du muscle le plus affecté parmi les muscles d'intérêt; ** P < 0.01.

La **Figure 6** montre le déplacement gléno-huméral relatif sur la surface de la glène. On observe un déplacement inféro-supérieur plus grand pour les travailleurs avec rupture de la coiffe (croix rouges) comparativement aux travailleurs asymptomatiques pour les positions à 20 degrés d'élévation du bras et à 45 degrés d'élévation du bras. La Figure 7 illustre les déplacements en fonction des angles d'élévation de l'épaule. Les symboles A/P, S/I et L/M réfèrent aux mesures de déplacement en antéro-postérieur, inféro-supérieur et médio-latéral respectivement. En antéro-postérieur et médiolatéral, aucune différence n'a pu être observée entre les travailleurs avec rupture de la coiffe et les travailleurs asymptomatiques. En inféro-supérieur, à 10° (position de repos), 30°, 60° et 90° d'élévation de l'épaule, aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les travailleurs et les travailleurs asymptomatiques. Cependant, les travailleurs avec rupture de la coiffe ont un déplacement inféro-supérieur supérieur plus grand que les travailleurs asymptomatiques lorsque l'angle d'élévation de l'épaule est de 20° et 45°.

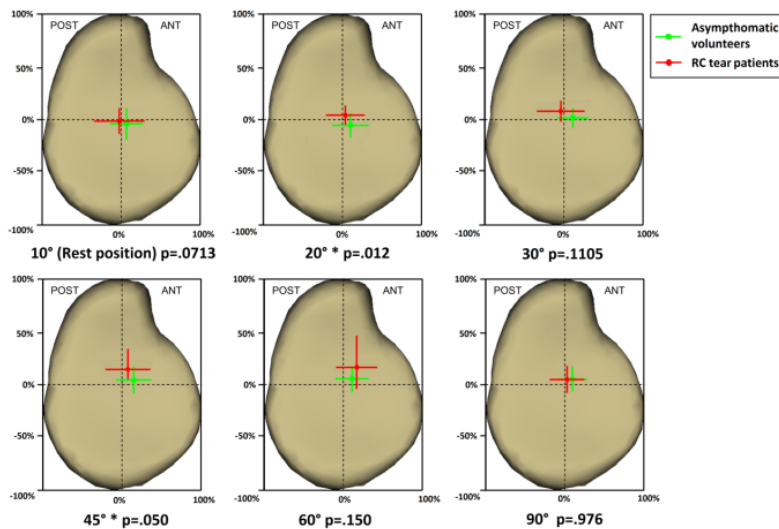


Figure 6 – Déplacement de la tête humérale sur la surface de la glène pour six angles d'élévation du bras (tiré de Zhang et coll., 2015)

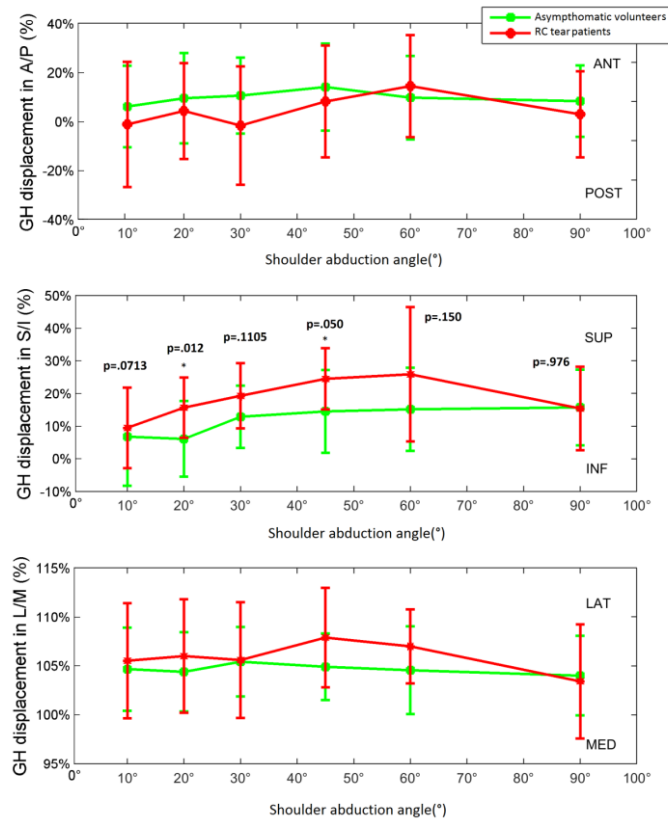


Figure 7 – Déplacement du centre de la tête humérale par rapport à la glène pour six angles d'élevation du bras, A/P (antéro-postérieur), S/I (infero-supérieur), M/L (médio-latéral) (tiré de Zhang et coll., 2015)

5.2 Paramètre postural

Les données démographiques des différents groupes sont présentées dans le **Tableau 4**. On constate qu'il existe des différences significatives au regard des indices de masse corporelle. Lorsque cette variable est introduite dans l'analyse comme variable confondante, il en résulte néanmoins que les résultats ne sont pas affectés.

Tableau 4 – Données démographiques pour l'analyse du paramètre postural

	Travailleurs asymptomatiques (n=25)	Rupture de coiffe (n=17)	Rupture de coiffe et syndrome d'accrochage (n=23)	Valeur de p
Sexe	11 femmes, 14 hommes	10 femmes, 7 hommes	9 femmes, 14 hommes	0,322
Âge (années) (±1 déviation standard)	55,3 (±7,8)	53,3 (±7,9)	57,8 (±7,0)	0,187
Score de Constant (/100) Moyenne (±1 déviation standard)	85,5 (±5,5)	56,1 (±11,8)	49,0 (±13,2)	* p<0,001 † p<0,001 ‡ p=0,017
Échelle visuelle analogue pour la douleur (/10)	0	5,5 (±2)	6,1 (±2)	* p<0,001 † p<0,001 ‡ p=0,447
Indice de masse corporelle (IMC) (kg/m ²) (±1 déviation standard)	23,1 (±3,1)	26,8 (±4,5)	29,2 (±3,6)	* p=0,007 † p<0,001 ‡ p=0,085
• IMC <25 kg/m ²	21 (84 %)	5 (30 %)	4 (17 %)	
• IMC >25 et <30 kg/m ²	2 (8 %)	6 (35 %)	11 (48 %)	
• IMC >30 kg/m ²	2 (8 %)	6 (35 %)	8 (35 %)	

* valeur p pour asymptomatique par rapport à rupture de coiffe

† valeur p pour asymptomatique par rapport à rupture de coiffe et syndrome d'accrochage

‡ valeur p pour rupture de coiffe par rapport à rupture de coiffe et syndrome d'accrochage

Le Tableau 5 suivant illustre l'orientation de l'omoplate par rapport au thorax pour les trois groupes dans la position où le bras est positionné le long du corps. On peut constater qu'il n'existe pas de différence significative entre les groupes dans cette position.

**Tableau 5 – Orientation de l'omoplate pour les trois groupes
 avec le bras le long du corps**

	Travailleurs asymptomatiques (N=25)	Rupture de coiffe (N=17)	Rupture de coiffe et syndrome d'accrochage (N=23)	Valeur de p
Rotation selon y (externe) (± 1 dév std*)	42,6 ($\pm 6,2$)	43,3 ($\pm 6,4$)	46,3 ($\pm 7,0$)	0,137
Rotation selon x (rotation vers le haut) (± 1 dév std*)	6,0($\pm 6,4$)	4,7($\pm 4,0$)	2,1 ($\pm 6,3$)	0,082
Rotation selon z (inclinaison postérieure) (± 1 dév std*)	273($\pm 6,6$)	30,3($\pm 6,0$)	30,7 ($\pm 8,7$)	0,063

*Dév std : déviation standard

Le Tableau 6 montre l'orientation de l'omoplate par rapport au thorax pour les trois groupes avec le bras à 90° d'élévation. Comme mentionné dans la méthodologie, cette analyse exclut les travailleurs qui ont fait une élévation en dehors du plan $0-30^\circ$ par rapport au plan frontal, ce qui explique le nombre réduit de travailleurs. Cela montre également la difficulté de standardiser la position des travailleurs. Les résultats indiquent que les travailleurs avec un syndrome d'accrochage ont tendance à avoir une rotation vers le haut (upward rotation) réduite par rapport aux travailleurs asymptomatiques et aux travailleurs ayant une rupture de la coiffe sans syndrome d'accrochage.

Tableau 6 - Orientation de l'omoplate pour les trois groupes pour le bras à 90° d'élévation

	Travailleurs asymptomatiques (n=12)	Rupture de coiffe (n=7)	Rupture de coiffe et syndrome d'accrochage (N=15)	Valeur de p
Rotation externe (°) le long de l'axe y	4,2 (±10,1)	2,3 (±9,2)	0,7 (±9,9)	0,664
Upward Rotation (°) le long de l'axe x	36,1 (±7,6)	34,9 (±7,9)	30,1 (±7,1)	* p=0,782 † p=0,045 ‡ p=0,492
Basculement postérieur (°) le long de l'axe z	9,0 (±4,3)	8,4 (±6,0)	6,0 (±6,4)	0,368

* p pour asymptomatique par rapport à rupture de coiffe

† p pour asymptomatique par rapport à rupture de coiffe et syndrome d'accrochage

‡ valeur p pour rupture de coiffe par rapport à rupture de coiffe et syndrome d'accrochage

5.3 Paramètres diagnostiques

Parmi les paramètres diagnostic, on trouve l'étendue de la déchirure telle qu'analysée par imagerie par résonance magnétique, nombre de tendons atteints, rétraction des tendons et infiltration graisseuse. Ces paramètres sont connus pour être reliés au niveau fonctionnel des personnes atteintes d'une rupture de la coiffe des rotateurs. Le câble de la coiffe est un paramètre qui n'a pas encore été analysé de manière extensive et qui a fait l'objet d'une analyse plus poussée dans le cadre du présent projet. L'analyse univariée des paramètres d'imagerie a montré que la position du câble de la coiffe était associée de manière significative à l'atrophie du supraépineux (SS) ($p < 0,01$) et à l'infiltration graisseuse ($p < 0,01$). L'intégrité de l'insertion antérieure du câble de la coiffe corrélait inversement avec le score physique du SF-12v2 ($p = 0,048$) et l'atrophie du SS ($p = 0,009$). L'intégrité de l'insertion postérieure du câble de la coiffe était inversement corrélée avec le score physique du SF-12v2 ($p = 0,024$) et l'infiltration graisseuse de l'infra-épineux (IS) ($p = 0,006$). Les paramètres du câble (largeur et épaisseur, distance entre le câble et la grande tubérosité) de la coiffe ne démontraient pas d'effet significatif sur les modèles de régression. En moyenne, le câble de la coiffe était significativement plus étroit ($p < 0,001$) et plus épais ($p < 0,008$), la distance entre le câble de la coiffe et la grande tubérosité était plus grande chez les travailleurs avec rupture transfixiante de la coiffe des rotateurs ($p < 0,001$).

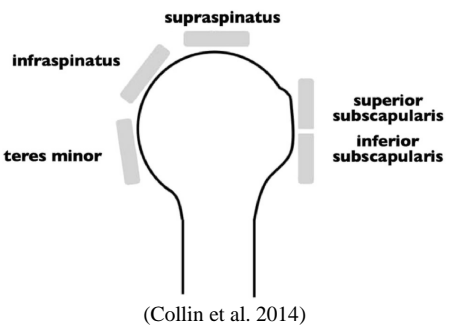
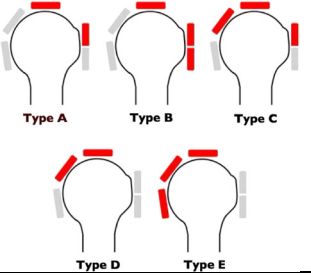
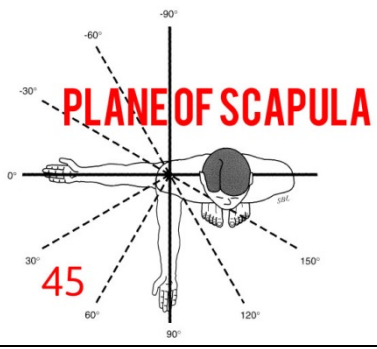
5.4 Analyse multivariée

Les paramètres concernant la pathologie de l'épaule et les caractéristiques du travailleur qui nous intéressent ont été classés dans cinq grandes catégories telles qu'indiquées ci-dessous et précisées dans le tableau ci-après. Ces catégories ont été déterminées à partir des données les plus fiables évaluées précédemment. Ainsi, les paramètres morphologiques qui se sont avérés moins fiables n'ont pas été inclus dans l'analyse. Le câble de la coiffe n'a pas non plus été inclus dans l'analyse multivariée. Pour déterminer quels paramètres étaient corrélés à la fonction, nous avons ajouté ici les données issues des questionnaires QuickDash et Constant.

- Informations générales (variables indépendantes) : âge, sexe, IMC
- Pathologie : douleur, infiltration graisseuse, atrophie musculaire, type et taille de la rupture
- Niveau de fonction de l'épaule : mobilité, force, score de Constant, QuickDash
- Morphologie de l'omoplate : version et inclinaison de la glène
- Pseudo-cinématique : translations de la tête humérale par rapport à la glène, posture de l'omoplate (cyphose)

Le Tableau 7 présente chacune de ces variables, leur type de données et l'intervalle des valeurs de la population à l'étude.

Tableau 7 – Description des variables et informations reliées

Catégorie	Paramètre	Type de données	Intervalle des valeurs	Nota	
Information générale	Sexe	nominales	F/H		
	Âge	discrètes	35 – 67		
	IMC(poids ² /taille)	continues	14.26-35.53		
Information sur la pathologie	Échelle de douleur	discrètes	0,1,2,...,10	Il en existe 2	
	Douleur au sommeil ??	nominales	Oui/Non		
	Type de la rupture	Par la profondeur de lésion	discrètes	Partielle / pleine épaisseur	
		Par location de lésion	nominales/ discrètes	SS;SS+SI; SS+SScap; SS+SI+SScap*(sauf type E)	
					
	Taille de la lésion		continues	0-mm ²	
	Infiltration graisseuse des muscles		discrètes	0-4 grades pour chacun des 4 muscles	
Fonction de l'épaule	Présente/non symptômes	nominales	Oui/Non		
	Mobilité active (score de constant)	discrètes	8-40		
	Force (score de constant)	discrètes	0,6-23,4/25	Assez faible chez les travailleurs sains aussi	
Morphologie de la glène	Version de la glène	continues	-14,8-8,0	Cette valeur doit être revue après amélioration du modèle 3D	
	Inclinaison de la glène	continues	27,8-52,5	idem	
Cinématique de l'épaule	Cyphose (Position initiale)	continues	1-49° (15,1° moyenne)		
	Angle d'élévation du bras (par rapport au y axe du thorax/ z axe de la machine)	continues	0-160° (5-7 vues), on garde l'angle le plus proche de 0°, 30°, 60°, 90°		
	Plan d'élévation du bras	continues	0-90° ou bien/hors plan		
	Amplitude	Antéro-latéral (X)		28,6 % (7,4 %-75,2 %)	
		inféro-supérieur (Y)		30,0 % (7,2 %-79,3 %)	
Médio-latéral (Z)			9,0 % (1 %-39,8 %)		

L'analyse factorielle sert à vérifier s'il existe une combinaison de mesures qui détermine la fonction de manière plus efficace que lorsque celle-ci est seulement évaluée avec les méthodes de diagnostic par imagerie. La Figure 8 montre la projection de chacune des variables sur les deux premières composantes principales (dans l'espace composante 1 et composante 2). Le **Tableau 8** montre les coefficients de corrélation entre les différentes variables analysées, tandis que le Tableau 9 expose la valeur *p* associée à chacune des corrélations.

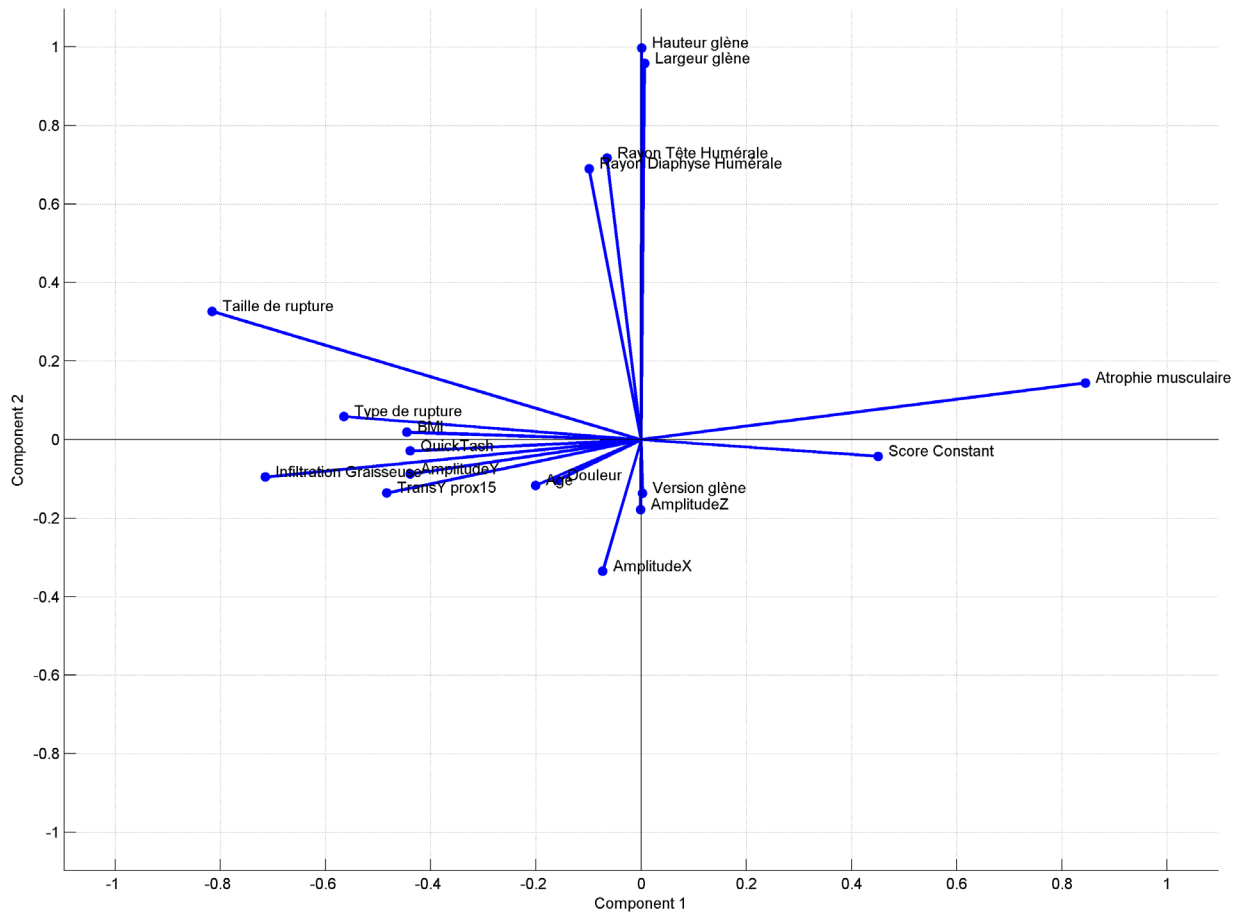


Figure 8 - Représentation des deux premières composantes principales pour les variables à l'étude

Tableau 8 – Coefficient de corrélation entre les variables analysées

Corr Coef	IMC	Age	QuickTash	score Constant	Douleur	Infiltration Graisseuse	Atrophie musculaire	Taille de rupture	Type de rupture	Rayon Diaphyse	Rayon Tête Humérale	Version glène	Largeur glène	Hauteur glène	TransY prox15	AmplitudeX	AmplitudeY	AmplitudeZ	
IMC	1,00																		
Age	0,10	1,00																	
QuickTash	0,48	0,17	1,00																
Score Constant	-0,52	-0,02	-0,87	1,00															
Douleur	0,47	0,12	0,89	-0,86	1,00														
Infiltration Graisseuse	0,48	0,40	0,60	-0,52	0,51	1,00													
Atrophie musculaire	-0,48	-0,25	-0,76	0,68	-0,66	-0,70	1,00												
Taille de rupture	0,55	0,20	0,58	-0,61	0,47	0,64	-0,73	1,00											
Type de rupture	0,60	0,14	0,80	-0,78	0,80	0,57	-0,79	0,70	1,00										
Rayon Diaphyse Humérale	0,03	-0,17	-0,14	0,06	-0,13	-0,16	0,11	0,21	-0,02	1,00									
Rayon Tête Humérale	-0,02	-0,21	-0,02	-0,02	-0,07	-0,14	0,04	0,24	0,06	0,51	1,00								
Version glène	0,09	0,04	0,16	-0,08	0,12	0,06	0,01	0,00	0,01	-0,20	-0,13	1,00							
Largeur glène	0,11	-0,14	0,18	-0,19	0,16	-0,01	-0,07	0,28	0,21	0,57	0,72	-0,10	1,00						
Hauteur glène	0,10	-0,19	0,18	-0,20	0,14	-0,05	-0,03	0,31	0,22	0,60	0,72	-0,16	0,94	1,00					
TransY prox15	0,31	0,08	0,32	-0,30	0,31	0,46	-0,32	0,33	0,28	-0,28	-0,04	0,19	-0,18	-0,14	1,00				
AmplitudeX	0,18	-0,04	0,12	-0,15	0,05	-0,01	-0,18	0,07	0,04	-0,18	-0,07	0,30	-0,22	-0,28	0,17	1,00			
AmplitudeY	0,35	0,05	0,11	-0,21	0,08	0,21	-0,25	0,35	0,21	-0,01	-0,04	0,08	-0,05	-0,10	0,03	0,39	1,00		
AmplitudeZ	0,33	-0,14	0,17	-0,31	0,21	0,10	-0,19	0,22	0,38	-0,03	-0,06	0,06	-0,01	0,01	-0,05	0,25	0,40	1,00	

Légende : en rouge sont indiquées les corrélations supérieures à 0,40. Le signe négatif indique une corrélation négative.

Tableau 9– Valeur de p pour la corrélation observée entre les variables

p-value	IMC	Age	QuickTash	Score Constant	Douleur	Infiltration Graisseuse	Atrophie musculaire	Taille de rupture	Type de rupture	Diaphyse Humérale	Rayon Tête Humérale	Version glène	Largeur glène	Hauteur glène	TransY prox15	Amplitude x	Amplitude y	Amplitude z	
IMC	1																		
Age	,419	1																	
QuickTash	,000	,168	1																
Score Constant	,000	,849	,000	1															
Douleur	,000	,334	,000	,000	1														
Infiltration Graisseuse	,000	,001	,000	,000	,000	1													
Atrophie musculaire	,000	,038	,000	,000	,000	,000	1												
Taille de rupture	,000	,107	,000	,000	,000	,000	,000	1											
Type de rupture	,000	,250	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1										
Rayon Diaphyse Humérale	,824	,163	,257	,614	,277	,190	,386	,081	,889	1									
Rayon Tête Humérale	,902	,079	,879	,894	,588	,261	,761	,052	,626	,000	1								
Version glène	,465	,723	,193	,498	,311	,601	,928	,987	,954	,099	,292	1							
Largeur glène	,385	,268	,128	,110	,177	,935	,553	,019	,091	,000	,000	,396	1						
Hauteur glène	,416	,112	,148	,091	,257	,697	,794	,010	,073	,000	,000	,185	,000	1					
TransY prox15	,010	,498	,007	,014	,009	,000	,007	,005	,022	,018	,752	,128	,134	,253	1				
Amplitude x	,141	,741	,332	,207	,681	,967	,142	,570	,764	,150	,571	,011	,068	,019	,172	1			
Amplitude y	,003	,684	,382	,084	,495	,088	,037	,004	,090	,905	,753	,493	,697	,401	,815	,001	1		
Amplitude z	,006	,255	,155	,011	,078	,402	,124	,067	,001	,794	,610	,604	,946	,941	,666	,036	,001	1	

Dans cette analyse multivariée, nous observons une forte corrélation entre l'infiltration graisseuse, l'atrophie musculaire, la taille de rupture et le type de rupture. En même temps, la morphologie de la glène et les déplacements antéro-postérieur et latéro-médial de la tête humérale ne sont pas corrélés avec les conséquences (outcome) de la pathologie tel que mesuré avec le questionnaire QuickDash et le score de Constant. Les deux méthodes d'évaluation de la fonction de l'épaule, le QuickDash et le score de Constant, corrént entre eux-mêmes.

Cette analyse multivariée montre qu'il n'est pas possible, à ce stade-ci de l'analyse, de déterminer un indice construit à partir de plusieurs mesures différentes et qui représenterait le niveau fonctionnel de l'épaule.

6. DISCUSSION

La présente étude a permis d'explorer s'il existait des liens entre la morphologie et la fonction de l'épaule. Nous avons pu démontrer que les travailleurs avec rupture transfixiante de la coiffe des rotateurs et infiltration graisseuse sévère avaient une pseudo-cinématique légèrement différente des travailleurs asymptomatiques de la même tranche d'âge.

6.1 Analyse de fiabilité des paramètres morphologiques

L'analyse des données à partir des reconstructions 3D obtenues grâce au protocole pseudo-cinématique sous EOS[®] montre qu'il est nécessaire d'améliorer la précision de la reconstruction. En effet, certains paramètres cliniques d'intérêt tels que le déport médial ou la distance sous acromiale ne sont pas assez précis pour être exploités dans le cadre d'une analyse multivariée. D'après notre analyse, il est également pertinent d'améliorer la précision et la reproductibilité des autres paramètres morphologiques.

6.2 Analyse pseudo-cinématique

La migration supérieure de la tête humérale a été observée chez les patients avec des ruptures de la coiffe des rotateurs (Keener et coll., 2009; Paletta et coll., 1997; Poppen et Walker, 1976, Bey et coll., 2011), chez les patients qui ont subi des chirurgies de la coiffe et chez les patients avec douleur à l'épaule (Larribe et coll., 2014) ou syndrome d'accrochage (Ludewig et Cook, 2002). Les recherches qui n'ont pas observé cette migration supérieure de la tête humérale (Bey et coll., 2008; Yamaguchi et coll., 2000) ont généralement été réalisées avec des échantillons de taille réduite. Dans la présente étude, les travailleurs asymptomatiques ont été choisis de manière à être dans la même tranche d'âge que les travailleurs avec rupture de coiffe. Il en résulte que onze de ces travailleurs présentaient soit de l'infiltration graisseuse modérée (sept travailleurs) soit des ruptures partielles des tendons de la coiffe (quatre travailleurs). Cette limite est aussi une force de l'étude qui s'intéresse à l'effet de la rupture de la coiffe plutôt qu'au déclin musculosquelettique lié à l'âge.

La comparaison quantitative des résultats présentés ici avec la littérature est difficile en raison des différentes conditions expérimentales, des populations cibles distinctes et des définitions des repères de la glène qui ne sont pas les mêmes. La présente étude analyse des positions statiques successives plutôt qu'un mouvement continu. De plus, nous avons normalisé les déplacements par rapport à la taille de la glène, ce qui permet de mieux comparer les travailleurs entre eux. Cette normalisation n'a pas été faite dans la littérature à ce jour. Les résultats présentés ici corroborent néanmoins ceux d'autres groupes ayant montré que les déplacements inféro-supérieurs de la tête humérale par rapport à la glène étaient affectés surtout entre 20 et 60° d'élévation (Nishinaka et coll., 2008 ; Teyhen et coll., 2010). Ce résultat pourrait indiquer qu'il est possible de simplifier le protocole d'acquisition en pseudo-cinématique en diminuant le nombre de poses à prendre.

Par ailleurs, on note qu'en direction antéro-postérieure, la tête humérale des travailleurs asymptomatiques est restée en position antérieure au cours de l'élévation de l'épaule, ce qui est comparable à ce qu'observent Graichen et ses collègues, qui ont démontré que la tête humérale reste positionnée en avant jusqu'à 150° d'élévation du bras (Graichen et coll., 2000).

6.3 Paramètre postural : Mesure de l'orientation de l'omoplate par rapport au thorax

Les résultats d'analyse sur les paramètres de posture indiquent que les travailleurs avec un syndrome d'accrochage ont tendance à avoir une rotation vers le haut (upward rotation) réduite par rapport aux travailleurs asymptomatiques et aux travailleurs ayant une rupture de la coiffe sans syndrome d'accrochage. Ces résultats confirment ce qui est observé par plusieurs auteurs (Endo et coll., 2001 ; Lin et coll., 2005, Ludewig et coll., 2000). Pour essayer d'expliquer ce phénomène, Wassinger et coll. (2013) ont induit une douleur de type sous-acromiale chez des sujets sains. Ils ont également pu observer une augmentation de la rotation vers le haut de l'omoplate de ces sujets. Ils en concluent que cette augmentation de la rotation vers le haut serait une sorte de mécanisme protecteur, permettant de maintenir un espace sous-acromial suffisant afin d'éviter la douleur.

6.4 Paramètres diagnostic

Les paramètres diagnostiques ont montré des liens connus entre l'étendue de la rupture et l'atteinte fonctionnelle ainsi que la migration de la tête humérale (Keener et coll., 2009). De même, Kim et coll. (2010) ont montré que la rupture de la partie antérieure du tendon du supra-épineux était le prédicteur le plus significatif de l'importance de l'infiltration graisseuse de ce muscle.

Les études sur le câble de la coiffe sont rares dans la littérature. Quelques-unes ont évalué le câble de la coiffe par résonance magnétique chez des sujets souffrant de rupture de la coiffe des rotateurs. Macarini et coll. (2011) ont décrit la prévalence du câble comme étant de 50%, alors que Morag et coll. (2013) ont rapporté une prévalence de 92% chez des personnes ayant des ruptures partielles ou totales de la coiffe.

Nos résultats montrent que la rupture de la coiffe des rotateurs semble provoquer un déplacement médial du câble de la coiffe et mène à un changement significatif de sa morphologie. Il semble, par contre, que les paramètres du câble de la coiffe ne jouent pas un rôle prépondérant dans la fonction de l'épaule chez les travailleurs souffrant d'une rupture transfixiante de la coiffe des rotateurs.

6.5 Analyse multivariée

L'analyse multivariée est une exploration très préliminaire des données que nous avons en notre possession. Cette analyse a permis de confirmer que les paramètres diagnostiques corrélaient avec la fonction. Elle a aussi montré qu'à ce stade-ci les paramètres morphologiques ne corrélaient pas avec le niveau fonctionnel des travailleurs.

7. PORTÉE ET LIMITES

Bien que les résultats de ce projet ne soient pas directement applicables à ce jour, la base de données acquise permet de poursuivre l'analyse et de continuer à explorer les paramètres qui pourront démontrer un lien avec la fonction de l'épaule des travailleurs atteints de rupture de la coiffe des rotateurs. En effet, l'analyse visuelle des données de reconstructions (modèles 3D personnalisés) nous a montré qu'il était possible d'améliorer la qualité des modèles et la précision des paramètres morphologiques en introduisant le traitement des images dans la méthode et en approximant mieux le modèle 3D pour qu'il corresponde aux images de chaque travailleur. Les travaux effectués dans notre laboratoire sur d'autres structures anatomiques nous enseignent aussi que l'automatisation des méthodes apporte une diminution de la variabilité des mesures. Ce sont donc des avenues envisagées pour la suite du projet.

L'analyse de la posture nous a montré également qu'il y avait des limites quant à la standardisation du pseudo-mouvement à étudier. Il y a donc lieu de raffiner la méthode (et les instructions données au sujet et au technologue en radiologie) afin que les sujets effectuent une élévation dans le plan de l'omoplate.

Par ailleurs, il y a lieu de réduire à l'avenir les divers facteurs confondants qui étaient présents dans les populations étudiées. En effet, les différences de types de rupture, de niveau d'infiltration graisseuse, d'IMC devront être explorées plus à fond, une fois que la méthode de reconstruction 3D aura été améliorée. Pour rappel, le recrutement des travailleurs pathologiques et asymptomatiques au cours du projet précédent avait été fait dans l'optique de conduire une étude observationnelle sur une population dont on sait qu'elle présente des symptômes radiologiques et cliniques très variés. À l'avenir, il y aura lieu de conduire une nouvelle étude sur des populations plus homogènes. Il n'en demeure pas moins que la base de données utilisée ici constitue un terrain de recherche très riche, avec des informations très complètes et devrait, à terme, mener vers une meilleure compréhension du lien entre la fonction de l'épaule et les différents paramètres morphofonctionnels.

8. CONCLUSION

Ce travail a permis, pour la première fois, de mener avec EOS[®] une étude d'envergure sur l'épaule. En effet, lors du développement de la méthode au cours d'une étude antérieure financée par l'IRSST (N. Hagemeister et coll., 2014), seules des analyses exploratoires avaient été faites sur un nombre très limité de travailleurs, pour faire la preuve de concept des méthodes de reconstruction 3D. La présente étude a permis d'approfondir la question du lien entre différents paramètres intrinsèques et la fonction de l'épaule, de consolider l'intérêt de cette reconstruction, et bien sûr d'établir les pistes d'amélioration : le nombre de vues peut être diminué, la reconstruction 3D doit encore être améliorée pour obtenir de manière précise certains paramètres cliniques d'intérêt. Ce travail constitue une étape essentielle vers l'utilisation d'EOS[®] en routine clinique pour l'analyse fonctionnelle quantitative 3D de l'épaule.

Les résultats de ce projet mettent en évidence un certain nombre de paramètres d'intérêt pour l'analyse des travailleurs souffrant d'une rupture transfixiante de la coiffe des rotateurs. Des paramètres d'imagerie montrent une altération de la morphologie du câble de la coiffe, ce qui pourrait avoir un impact sur le diagnostic par résonance magnétique. Ils montrent également que l'infiltration graisseuse semble jouer un rôle dans la mécanique de l'épaule. Néanmoins, il reste à exploiter d'avantage les modèles 3D issus de la reconstruction EOS[®]. Ceux-ci avaient été bâtis pour pouvoir effectuer une analyse du déplacement de la tête humérale par rapport à la glène avec une précision et une répétabilité acceptable, mais pas pour obtenir une information précise et fiable sur la géométrie de certaines parties de l'omoplate (version et inclinaison de la glène; déport médial; longueur de l'acromion). Leur analyse dans le cadre de ce projet a donc montré que les paramètres morphologiques n'apportaient pas à ce stade d'information supplémentaire utile pour bâtir un indice représentatif de la fonction des travailleurs souffrant d'une rupture transfixiante de la coiffe des rotateurs.

Pour cette raison, nous proposons d'améliorer la qualité de la reconstruction 3D de l'omoplate, notamment en raffinant le modèle 3D et en ajoutant des informations visibles dans l'image pour la construction du modèle 3D. Cette suite du projet est déjà en cours à l'Institut de Biomécanique Humaine Georges Charpak d'Arts et Métiers ParisTech, qui collabore au projet depuis plusieurs années. Une fois le modèle 3D personnalisé amélioré et raffiné, nous referons les analyses multivariées pour vérifier si nos hypothèses quant au lien entre la morphologie et la fonction de l'épaule sont fondées.

9. BIBLIOGRAPHIE

- Banas, MP., RJ. Miller et S. Totterman. « Relationship between the lateral acromion angle and rotator cuff disease ». *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, vol. 4, n° 6, 1995, p. 454-461.
- Bey, MJ., CD. Peltz, K. Ciarelli, SK. Kline, GW. Divine, M. van Holsbeeck, S. Muh, PA. Kolowich, TR. Lock et V. Moutzouros. « In vivo shoulder function after surgical repair of a torn rotator cuff: glenohumeral joint mechanics, shoulder strength, clinical outcomes, and their interaction ». *The American Journal of Sports Medicine*, vol. 39, n° 10, 2011, p. 2117-2129.
- Bey, MJ., SK. Brock, WN. Beierwaltes, R. Zael, PA. Kolowich et TR. Lock. « In vivo measurement of subacromial space width during shoulder elevation: technique and preliminary results in patients following unilateral rotator cuff repair ». *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, doi:10.1016/j.clinbiomech.2007.04.006.
- Bey, MJ., SK. Kline, R. Zael, TR. Lock et PA. Kolowich. « Measuring dynamic in-vivo glenohumeral joint kinematics: technique and preliminary results ». *Journal of Biomechanics*, doi: 10.1016/j.jbiomech.2007.09.029.
- Burkhart SS. « Fluoroscopic comparison of kinematic patterns in massive rotator cuff tears. A suspension bridge model ». *Clin Orthop Relat Res*. 1992(284):144-52.
- Clark JM, Harryman DT, 2nd. « Tendons, ligaments, and capsule of the rotator cuff. Gross and microscopic anatomy ». *J Bone Joint Surg Am*. 1992;74(5):713-25.
- Constant, CR. et AH. Murley. « A clinical method of functional assessment of the shoulder ». *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 4, n°214, 1987, p160-164.
- Deslauriers M; Lepage-Saucier M, Tetreault P, Rouleau D, Hagemeister N; Bureau NJ. Rotator Cable Morphologic Parameters at MRI in Patients with Symptomatic Full-thickness Rotator Cuff Tears: Correlation with Functional Outcomes and Health-related Quality of Life. RSNA, Chicago, dec 2015.
- Endo K, Ikata T, Katoh S, Takeda Y. Radiographic assessment of scapular rotational tilt in chronic shoulder impingement syndrome. *J Orthop Sci* 2001;6:3-10.
- Goutallier, D., JM. Postel, J. Bernageau, L. Lavau et MC. Voisin. « Fatty muscle degeneration in cuff ruptures. Pre- and postoperative evaluation by CT scan ». *Clinical Orthopaedics and Related Research*, n° 304, 1994, p. 78-83.
- Gummeson, C., MM. Ward et I. Atroshi. « The shortened disabilities of the arm, shoulder and hand questionnaire (QuickDASH): validity and reliability based on responses within the full-length DASH ». *BMC Musculoskelet Disord*, doi : 10.1186/1471-2474-7-44.
- Hagemeister, Nicola, Lagacé Pierre-Yves, Hereter Gregori Joan, Marck Laurence, Rouleau Dominique, Bureau Nathalie, Tetreault Patrice, Roy André, Al-Shakfa Fidaha. Développement d'un indice radiologique représentatif de la fonction de l'épaule chez des travailleurs souffrant de rupture de la coiffe des rotateurs, Rapport R-812, 56 pages.

Hawkins, RJ. et JC. Kennedy. « Impingement syndrome in athletes ». *American Journal of Sports Medicine*, vol. 8, n° 3, 1980, p. 151-158.

Katolik, LI., AA. Romeo, BJ. Cole, NN. Verma, JK. Hayden et BR. Bach. « Normalization of the Constant score ». *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, vol. 14, n° 3, 2005, p. 279-285.

Keener, JD., AS. Wei, HM. Kim, K. Steger-May et K. Yamaguchi. « Proximal humeral migration in shoulders with symptomatic and asymptomatic rotator cuff tears ». *The American Journal of bone and joint surgery*, doi: 10.2106/jbjs.h.00854.

Keener JD, Wei AS, Kim HM, Steger-May K, Yamaguchi K. Proximal humeral migration in shoulders with symptomatic and asymptomatic rotator cuff tears. *J Bone Joint Surg Am*. 2009;91(6):1405-13

Kim HM, Dahiya N, Teefey SA, Keener JD, Galatz LM, Yamaguchi K. Relationship of tear size and location to fatty degeneration of the rotator cuff. *J Bone Joint Surg Am*. 2010;92(4):829-39.

Kirkley, A., S. Griffin et K. Dainty. « Scoring systems for the functional assessment of the shoulder ». *Arthroscopy*, vol. 19, n° 10, 2003, p. 1109-1120.

Lagacé, PY. *Développement et validation d'une méthode d'évaluation des translations glénohumérales 3D sous EOS*. Montréal, Canada, École de technologie supérieure. Département de génie de la production automatisée, 2013, 160 p. Doctorat en génie (Ph.D.).

Larribe, M., PE. Laurent, S. Acid, R. Aswad, P. Champsaur et T. Le Corroller. « Anterior shoulder instability: the role of advanced shoulder imaging in preoperative planning ». *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, doi: 10.1055/s-0034-1384828.

Lebau M, Duguay P, Boucher A. Les coûts des lésions professionnelles au Québec, 2005-2007. (version révisée) RAPPORT R-769. 2014. 48 pages.

Lin JJ, Hanten WP, Olson SL, Roddey TS, Soto-quijano DA, Lim HK, et al. Functional activity characteristics of individuals with shoulder dysfunctions. *J Electromyogr Kinesiol* 2005;15:576-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2005.01.006>

Ludewig PM, Cook TM. Alterations in shoulder kinematics and associated muscle activity in people with symptoms of shoulder impingement. *Phys Ther* 2000;80:276-91.

Ludewig, PM. et TM. Cook. « Translations of the humerus in persons with shoulder impingement symptoms ». *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, doi: 10.2519/jospt.2002.32.6.248.

Macarini L, Muscarella S, Lelario M, et al. Rotator cable at MR imaging: considerations on morphological aspects and biomechanical role. *Radiol Med*. 2011;116(1):102-13.

Morag Y, Jamadar DA, Miller B, Brandon C, Gandikota G, Jacobson JA. Morphology of large rotator cuff tears and of the rotator cable and long-term shoulder disability in conservatively treated elderly patients. *J Comput Assist Tomogr*. 2013;37(4):631-8.

Meislin, R.J., JW. Sperling et TP. Stitik. « Persistent shoulder pain: epidemiology, pathophysiology, and diagnosis ». *American Journal of Orthopedics (Belle Mead, N.J.)*, vol. 34, n° 12 Suppl, 2005, p. 5-9.

Neer, CS. 2nd. « Impingement lesions ». *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 173, 1983, p. 70-77.

Nishinaka, N., H. Tsutsui, K. Mihara, K. Suzuki, D. Makiuchi, Y. Kon, TW. Wright, MW. Moser, K. Gamada, H. Sugimoto et SA. Banks. « Determination of in vivo glenohumeral translation using fluoroscopy and shape-matching techniques ». *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, doi : 10.1016/j.jse.2007.05.018.

Ohl X, Hagemeister N, Zhang C, Billuart F, Gagey O, Bureau NJ, Skalli W. 3D scapular orientation on healthy and pathologic subjects using stereoradiographs during arm elevation. *J Shoulder Elbow Surg.* 2015 Nov;24(11):1827-33.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jse.2015.04.007>

Paletta, GA. Jr., JJ. Warner, RF. Warren, A. Deutsch et DW. Altchek. « Shoulder kinematics with two-plane x-ray evaluation in patients with anterior instability or rotator cuff tearing ». *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, vol. 6, n° 6, 1997, p. 516-527.

Picco, BR., SL. Fischer et CR. Dickerson. « Quantifying scapula orientation and its influence on maximal hand force capability and shoulder muscle activity ». *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, doi : 10.1016/j.clinbiomech.2009.09.008.

Pope, DP., PR. Croft, CM. Pritchard et AJ. Silman. « Prevalence of shoulder pain in the community : the influence of case definition ». *Annals of the Rheumatic Diseases*, vol. 56, n° 5, 1997, p. 308-312.

Poppen, NK. et PS. Walker. « Normal and abnormal motion of the shoulder ». *The American Journal of bone and joint surgery*, vol. 58, n° 2, 1976, p. 195-201.

Roche, C., L. Angibaud, PH. Flurin, T. Wright, E. Fulkerson et J. Zuckerman. « Anatomic validation of an "anatomic" shoulder system ». *Bulletin (Hospital for Joint Diseases)*, vol. 63, n° 3-4, 2006, p. 93-97.

Terrier, A., P. Buchler et A. Farron. « Influence of glenohumeral conformity on glenoid stresses after total shoulder arthroplasty ». *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, doi : 10.1016/j.jse.2005.09.021.

Teyhen, DS., TR. Christ, ER. Ballas, CW. Hoppes, JD. Walters, DS. Christie, G. Dreitzler et EJ. Kane. « Digital fluoroscopic video assessment of glenohumeral migration : Static vs. Dynamic conditions ». *Journal of Biomechanics*, doi : 10.1016/j.jbiomech.2010.01.026.

Wassinger CA, Sole G, Osborne H. Clinical measurement of scapular upward rotation in response to acute subacromial pain. *J Orthop Sports Phys Ther* 2013;43:199-203. <http://dx.doi.org/10.2519/jospt.2013.4276>

Wu, G., FC. van der Helm, HE. Veeger, M. Makhsous, P. Van Roy, C. Anglin, J. Nagels, AR. Karduna, K. McQuade, X. Wang, FW. Werner et B. Buchholz. « ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint

motion--Part II : shoulder, elbow, wrist and hand ». *Journal of Biomechanics*, vol. 38, n° 5, 2005, p. 981-992.

Yamaguchi, K., JS. Sher, WK. Andersen, R. Garretson, JW. Uribe, K. Hechtman et RJ. Neviasser. « Glenohumeral motion in patients with rotator cuff tears : a comparison of asymptomatic and symptomatic shoulders ». *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, vol. 9, n° 1, 2000, p. 6-11.

Zhang, C., W. Skalli, PY. Lagace, F. Billuart, X. Ohl, T. Cresson, NJ. Bureau, DM. Rouleau, A. Roy, P. Tetreault, C. Sauret, JA. de Guise et N. Hagemeister. « Investigation of 3D glenohumeral displacements from 3D reconstruction using biplane X-ray images : Accuracy and reproducibility of the technique and preliminary analysis in rotator cuff tear patients ». *Journal of Electromyography and Kinesiology*, doi : 10.1016/j.jelekin.2015.08.002.