



HAL
open science

Réflexion sur une nouvelle méthode d'assistance opératoire à l'implantation glénoïdienne d'une prothèse d'épaule. Partie 1 : modélisation statistique d'une glène normale pré-morbide

Julien Berhouet, Luc Favard, David Boas, Théo Voisin, Mohamed Slimane

► To cite this version:

Julien Berhouet, Luc Favard, David Boas, Théo Voisin, Mohamed Slimane. Réflexion sur une nouvelle méthode d'assistance opératoire à l'implantation glénoïdienne d'une prothèse d'épaule. Partie 1 : modélisation statistique d'une glène normale pré-morbide. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*, 2019, 105, pp.122 - 128. 10.1016/j.rcot.2019.01.006 . hal-03486552

HAL Id: hal-03486552

<https://hal.science/hal-03486552>

Submitted on 20 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Mémoire original

Réflexion sur une nouvelle méthode d'assistance opératoire à l'implantation glénoïdienne d'une prothèse d'épaule

Partie 1 : Modélisation statistique d'une glène normale pré-morbide¹

Thoughts on a new surgical assistance method for implanting the glenoid component during total shoulder arthroplasty

Part 1: Statistical modeling of the native premorbid glenoid

Julien **Berhouet**, ^{1,2,3*}, Luc **Favard**, ^{1,3}, David **Boas**, ², Théo **Voisin**, ², Mohamed **Slimane**, ²

¹ Université François Rabelais de Tours – Faculté de Médecine de Tours - CHRU
Trousseau Service d'Orthopédie Traumatologie, 1C Avenue de la République, 37170
Chambray-les-Tours, FRANCE

² Université François Rabelais de Tours – Ecole d'Ingénieurs Polytechnique Universitaire de
Tours – Laboratoire d'Informatique EA6300, Equipe Reconnaissance de Forme et Analyse de
l'Image, 64 Avenue Portalis, 37200 Tours

³ Société d'Orthopédie de L'Ouest (SOO) / HUGORTHO, 18, Rue de Bellinière, 49800
Trélazé, France

¹ Article issu de la Société d'orthopédie de l'ouest (SOO), congrès de Tours 2017

* Auteur correspondant : J Berhouet. Université François Rabelais de Tours - CHRU

Trousseau Service d'orthopédie traumatologie 1C, Avenue de la République, 37170

Chambray-les-Tours, France

Téléphone : 02 47 47 86 44

Fax : 02 47 47 59 12

Mail : julien.berhouet@gmail.com

Ne pas utiliser, pour citation, la référence française de cet article, mais celle de l'article original paru dans *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, en utilisant le DOI ci-dessus.

Remerciements : Christian Proust, PhD²

Résumé

Introduction : L'objectif de l'étude était d'identifier des points de la scapula à partir desquels une prédiction de l'anatomie glénoïdienne pré-morbide normale pouvait être obtenue.

Matériels et méthodes: Quarante-trois scapulae normales reconstruites en 3D et positionnées dans un référentiel commun ont été utilisées. Vingt points répartis entre l'échelle de la scapula, partie considérée comme normale dans le temps et servant de référence, et la glène, partie considérée comme pathologique et à reconstruire, ont été relevés manuellement. Treize distances (X) entre 2 points ne se trouvant pas sur la glène, et 31 distances (Y) entre 2 points dont au moins un point était localisé sur la glène, ont ensuite été calculées automatiquement. Une méthode statistique de régression linéaire multiple a alors été appliquée, avec pour objectif de calculer les distances Y à partir des distances X, et de ne

retenir que les 4 meilleures équations selon leur coefficient de détermination (R^2) pouvant expliquer un point de la glène à reconstituer ($p < 0,05$). La modélisation glénoïdienne a été faite avec pour première hypothèse que la totalité de la glène était détruite. Elle a ensuite été conduite avec pour seconde hypothèse que la glène était usée uniquement dans sa partie inférieure.

Résultats : En cas de glène totalement détruite, l'erreur moyenne pour une distance choisie pour un point donné de la glène a été calculée à 2,4 mm (4.e-3 mm ; 12,5 mm). En cas de destruction partielle, l'erreur moyenne était de 1,7 mm (4.e-3 mm ; 6,5 mm) pour la même distance évaluée pour un point donné de la glène.

Discussion-conclusion : Le modèle statistique proposé a permis de prédire l'anatomie pré-morbide de la glène avec un niveau de précision acceptable. Cette information nouvelle pour le chirurgien pourrait être utilisée lors de la planification pré opératoire et en per opératoire, via un nouveau support d'assistance chirurgicale.

Abstract

Introduction : The aim of the study was to identify scapula points from which a prediction of normal pre-morbid glenoid anatomy could be obtained.

Materials and methods: Forty-three normal scapulae reconstructed in 3D and positioned in a common reference system were used. Twenty points divided between the scapula blade considered as normal and used as a reference, and the glenoid considered pathological and to be reconstructed, were taken manually. Thirteen distances (X) between 2 points not on the glenoid, and 31 distances (Y) between 2 points with at least one point located on the glenoid, were then calculated automatically. A statistical method of multiple

linear regression was then applied, with the objective of calculating the distances Y from the distances X, and to retain only the 4 best equations according to their coefficient of determination (R²) which could explain a point of the glenoid to reconstitute ($p < 0.05$). Glenoid modeling was done with the first hypothesis that the entire glenoid was destroyed. It was then conducted with the second hypothesis that the glenoid was worn only in its lower part.

Results: In case of full destroyed glenoid, the mean error for a selected distance for a given glenoid point was calculated at 2.4 mm (4.e-3 mm, 12.5 mm). In case of partial destruction, the mean error was 1.7 mm (4.e-3 mm, 6.5 mm) for the same distance evaluated for a given point of the glenoid.

Discussion-conclusion: The proposed statistical model predicted the pre-morbid anatomy of the glenoid with an acceptable level of precision. This new information for the surgeon could be used during the pre operative planning and intra operatively, via a new support of surgical assistance.

Mots clés : glène pré-morbide ; régression linéaire multiple ; prédiction statistique ; assistance opératoire ; prothèse d'épaule

Keywords : pre morbid glenoid ; multiple linear regression; statistical prediction; operative assistance; shoulder arthroplasty

Introduction

La démarche de toute technique d'assistance opératoire est d'essayer de se référer d'une part à ce qui est visible pour que le chirurgien puisse se repérer, et d'autre part à ce qui est considéré comme habituellement normal pour que le chirurgien puisse adapter son geste opératoire de correction de la pathologie en cause. La technologie récente des guides spécifiques patients (GSP) appliquée à la chirurgie de l'épaule en est un exemple, avec la conception d'un guide sur mesure pour le positionnement glénoïdien. Le GSP vient se fixer sur la glène, seul relief visible pour le chirurgien. Il intègre dans son dessin la correction de la déformation à apporter après qu'un planning pré opératoire, basé sur la restitution de paramètres anatomiques normaux (version et inclinaison), ait été fait (1-4). Les limites de la technologie GSP restent cependant que le chirurgien se repère et utilise, pour support de son guide, une glène pathologique, dont l'usure est variable et parfois difficilement reconnaissable. Il ne dispose à aucun moment d'un référentiel anatomique environnemental normal fiable, auquel il peut revenir en cas d'aléa technique. Il n'a par ailleurs aucun critère d'évaluation peropératoire de la qualité du geste réalisé. Il peut s'agir finalement d'une situation chirurgicale équivalente ou pouvant évoluer vers ce que le chirurgien pouvait connaître avant le développement de cette technologie GSP d'assistance opératoire.

Une information visuelle pré et peropératoire du statut glénoïdien normal à atteindre à l'issue de l'opération pourrait être bénéfique pour aider le chirurgien pendant son geste. Une autre information peropératoire, cette fois de localisation anatomique et d'orientation de la scapula dans son entièreté, au sein de son environnement musculaire très dense, constituerait également un progrès conséquent pour la compréhension et le repérage du chirurgien dans son environnement opératoire (5).

L'objectif de fournir au chirurgien une information visuelle per opératoire sur l'aspect de la glène pré-morbide, telle qu'elle était avant usure, doit passer par un processus de conception équivalent à celui mis en place pour la technologie GSP (2, 3, 6-9). Cette dernière, avant fabrication définitive du guide sur mesure, repose sur une étape préalable de planification pré opératoire utilisant une reconstruction tomodensitométrique (TDM) tridimensionnelle (3D) de la scapula (4, 9, 10). Une première étape, dite de modélisation de l'anatomie glénoïdienne normale ou pré-morbide, est ainsi nécessaire avant d'envisager une reconstitution de la glène pathologique en une glène normale, et enfin le transfert de cette information sous la forme d'une assistance visuelle per opératoire. Le challenge scientifique de cette restitution d'une glène normale réside dans le fait que les informations glénoïdiennes disponibles à cette étape préopératoire sont, par définition, incomplètes voire manquantes car pathologiques. Le seul support anatomique normal utilisable à ce stade reste donc l'écaille de la scapula. C'est à partir de ces reliefs scapulaires, théoriquement stables dans le temps car épargnés par le processus pathologique arthrosique, que la glène normale va pouvoir être reconstituée. L'objectif de cette première partie de travail est d'identifier des points de la scapula à partir desquels une prédiction de l'anatomie glénoïdienne pré-morbide normale peut être faite grâce à une modélisation mathématique, employant des techniques de régression linéaire multiple.

Matériels et Méthodes

1/ Matériels

a/ Imagerie de scapulae

Quarante-trois TDM évaluées comme normales au niveau de l'articulation gléno-humérale ont été utilisées dans ce travail. Une pré sélection des examens, reposant sur l'âge du patient et la nature de l'indication de l'examen, a été réalisée au préalable. Les TDM provenaient donc de patients de 43,3 ans (28-55 ans) d'âge moyen. Les examens avaient été indiqués initialement pour le bilan d'un polytraumatisme ou d'une fracture de l'extrémité supérieure de l'humérus. Chaque TDM retenue avait dans tous les cas été visualisée et analysée dans sa totalité pour s'assurer de la normalité du versant glénoïdien (absence d'arthrose, de dysplasie, de séquelles traumatiques) et de l'acquisition de la scapula dans son entier. Ces examens étaient initialement en format DICOM. Une importation dans le logiciel ImageJ® avait été faite, afin d'en extraire uniquement la scapula dans sa totalité. Des fichiers en format .tiff étaient obtenus. Une dernière étape de conversion en format .obj était alors réalisée afin que les fichiers soient exploitables par le logiciel d'imagerie 3D choisi pour l'ensemble du travail de cette troisième partie, en l'occurrence Blender®.

b/ Logiciel d'imagerie 3D:

Blender® (Fondation Blender, Netherlands) est un logiciel libre de modélisation, d'animation et de rendu en 3D. Il dispose de fonctions avancées de modélisation, de sculpture 3D, de texturage, de trucage, d'armaturage, d'animation 3D et de rendu. La version 2.68a a été utilisée dans ce travail.

Les informations de fonctionnement du logiciel Blender® : coordonnées et centre d'un objet, ont été primordiales à vérifier lors des différentes expérimentations, afin de s'assurer qu'un même référentiel de travail était utilisé pour les 43 scapulae manipulées.

c/ Logiciel de traitement et d'analyse des données

Le logiciel R® a été utilisé pour ce travail. Il s'agit d'un logiciel libre de traitement des données et d'analyse statistique, mettant en œuvre le langage de programmation R, lui-même inspiré par Scheme (The R foundation).

2/ Méthodologie

L'objectif de modélisation d'une glène normale a nécessité plusieurs étapes. La première a été de constituer une base de données sur le jeu des 43 scapulae saines. L'application des techniques de régression linéaire pour modéliser la glène normale a ensuite été conduite.

a/ Base de données

Un pointage manuel précis de chacune des 43 scapulae normales reconstruites en 3D et positionnées dans un référentiel commun a été réalisé sur Blender®. Vingt points ont été relevés par le chirurgien. Ces points ont été choisis pour qu'ils soient facilement identifiables lors de leur sélection sur chaque scapula. Une analyse comparative du pointage effectué par 2 opérateurs indépendants non chirurgiens, avait permis de valider en amont la reproductibilité et la précision du relevé à répéter sur les 43 scapulae. Les points étaient répartis entre l'écaille de la scapula, partie considérée comme normale dans le temps, et servant donc de référence, et la glène, partie considérée comme devenant pathologique dans le temps, et donc potentiellement à reconstruire. Pour chaque scapula de l'étude, un fichier tableur CSV (Comma-Separated Value) a été créé, donnant les coordonnées (x, y, z) de chacun des 20 points relevés. Ces points étaient les suivants, avec leur représentation en *Figure 1*:

- P₁ : point supérieur de la glène ;

- P₂ : point inférieur de la glène ;
- P₃ : point le plus postérieur de la glène ;
- P₄ : point le plus antérieur de la glène ;
- P₅ : point le plus supérieur sur l'écaïlle ;
- P₆ : point le plus inférieur sur l'écaïlle ;
- P₇ : point le plus médial sur l'écaïlle (ou trigonum spinae);
- P₈ : point du milieu de la base de l'épine projeté sur la glène ;
- P₉ : point le plus postérieur de l'acromion ;
- P₁₀ : point le plus antérieur de la pointe de l'acromion ;
- P₁₁ : point de la pointe de la coracoïde ;
- P₁₂ : point au fond de l'échancrure coracoïdienne ;
- P₁₃ : point de réunion des reliefs antérieur et postérieur du pilier ;
- P₁₄ : point antéro-supérieur du pilier projeté sur la glène ;
- P₁₅ : point postéro-supérieur du pilier projeté sur la glène ;
- P₁₆ : point inférieur de la base de l'épine projetée sur la glène ;
- P₁₇ : point supérieur de la base de l'épine projetée sur la glène ;
- P₁₈ : point postérieur du pied de la coracoïde projeté sur la glène ;
- P₁₉ : point antérieur du pied de la coracoïde projeté sur la glène ;
- P₂₀ : point du milieu du pied de la coracoïde projeté sur la glène.

A partir de ce relevé de points, il a ensuite été défini, initialement, 44 distances à calculer correspondant aux variables nécessaires à l'application des méthodes de régression :

- les distances $X_{i,j}$: au nombre de 13, il s'agissait des distances entre 2 points, P_i et P_j, ne se trouvant pas sur la glène. Ces distances constituaient les variables explicatives, car

restant inchangées même en cas de glène pathologique. Ont donc été retenues: $X_{5,6}$, $X_{5,7}$, $X_{5,10}$, $X_{5,11}$, $X_{6,7}$, $X_{6,9}$, $X_{6,11}$, $X_{7,9}$, $X_{7,10}$, $X_{7,12}$, $X_{9,10}$, $X_{10,11}$, $X_{11,12}$.

- les distances $Y_{i,j}$: au nombre de 31, il s'agissait des distances dont au moins un point, P_i ou P_j , se situait sur la glène. Ces distances constituaient les variables à expliquer, permettant la reconstruction de la forme de la glène une fois qu'un modèle était choisi pour chacune d'elle. Ont donc été sélectionnées: $Y_{1,2}$, $Y_{3,4}$, $Y_{1,7}$, $Y_{2,7}$, $Y_{3,7}$, $Y_{4,7}$, $Y_{7,8}$, $Y_{7,14}$, $Y_{7,15}$, $Y_{7,16}$, $Y_{7,17}$, $Y_{7,18}$, $Y_{7,19}$, $Y_{7,20}$, $Y_{2,13}$, $Y_{13,14}$, $Y_{13,15}$, $Y_{6,14}$, $Y_{6,15}$, $Y_{1,12}$, $Y_{2,12}$, $Y_{3,12}$, $Y_{4,12}$, $Y_{8,12}$, $Y_{12,14}$, $Y_{12,15}$, $Y_{12,16}$, $Y_{12,17}$, $Y_{12,18}$, $Y_{12,19}$, $Y_{12,20}$.

Les distances choisies entre les points ont été calculées de façon automatique grâce au développement en langage Java d'un outil de calcul adapté. Ce dernier générait alors une matrice de 44 distances pour chacune des 43 scapulae ou individus. Plusieurs vérifications successives des matrices des variables ont été conduites afin de s'assurer de l'absence d'individus ou de mesures aberrants.

b/ Application de la régression linéaire multiple

L'objectif était de définir par prédiction chaque point relevé sur la glène selon ses coordonnées (x, y, z) . Celles-ci étaient bien évidemment connues au préalable pour pouvoir vérifier la cohérence et la précision de notre modèle de prédiction. S'agissant d'un espace à 3 dimensions, il était nécessaire pour retrouver les coordonnées d'un point de glène d'avoir 4 distances calculées à partir de points dont les coordonnées étaient connues. Ainsi, pour chaque point, un modèle local au point était composé de 4 équations de distances. En prenant pour exemple le cas présenté en *Figure 2*, il fallait pour déterminer les coordonnées inconnues du point P_1 l'estimation des distances P_1/P_{10} , P_1/P_{11} , P_1/P_7 , P_1/P_{13} , les coordonnées des points

$P_i, \forall i \neq 1$, étant connues. Pour chacune de ces distances, était calculée une équation prédictive et c'était l'ensemble de ces équations qui formait le modèle local au point P_1 . Les distances $P_1/P_{10}, P_1/P_{11}, P_1/P_7, P_1/P_{13}$ étaient elles-mêmes estimées en fonction des distances connues ($P_{10}/P_{11}, P_{10}/P_7, P_{10}/P_{13}, P_{11}/P_{13} \dots$) lors de l'utilisation de la régression linéaire multiple.

Appliqué spécifiquement au projet de modélisation d'une glène normale, la première problématique de régression a été d'identifier les distances $X_{i,j}$ à utiliser pour expliquer les distances $Y_{i,j}$. Toutes les combinaisons $X_{i,j}$ possibles ont été finalement prises en compte. Les meilleures combinaisons ont ensuite été sélectionnées sur leur coefficient de détermination R^2 le plus haut possible, et au minimum de 0,75, leur p-value inférieur à 0,05, et des tests évaluant la variance des résidus (tests de Breusch-Pagan et de Breusch-Godfroy). Il a aussi été décidé de se limiter à 4 variables explicatives au maximum par équation.

La seconde problématique a été d'identifier parmi les distances $Y_{i,j}$ à expliquer, calculées, les 4 meilleures équations permettant de définir les coordonnées du point de glène recherché P_i . Il a alors été construite une matrice des distances des $Y_{i,j}, \forall j$ tel que P_j était hors glène. Un nouveau script sélectionnait les 4 meilleures équations significatives selon la valeur de leur coefficient de détermination R^2 .

Cette méthodologie a ainsi été appliquée pour caractériser chacun des points de la glène (*Figure 1*), à l'exception des points P_8 et P_{20} finalement exclus car jugés redondants vis-à-vis des points environnants. La modélisation glénoïdienne a été faite avec pour première hypothèse que la totalité de la glène était dégradée par le processus pathologique. En pratique, l'usure glénoïdienne est le plus souvent localisée, comme en attestent les classifications de Walch *et al.* (11) et Favard *et al.* (12). Une modélisation a par conséquent aussi été conduite avec pour seconde hypothèse que la glène était seulement usée dans sa partie inférieure. La même méthodologie de régression a donc été appliquée sur uniquement des points du cadran

inférieur de la glène supposés manquants, en cas d'usure inférieure. Deux nouveaux fichiers de configuration ont toutefois été testés pour cette seconde hypothèse. L'un comprenait la matrice des distances avec les $X_{i,j}$ identiques à ceux de la première hypothèse, mais avec le retrait des variables $Y_{k,l}$ incluant les points k supérieurs de la glène, ces derniers n'étant plus à caractériser. Dans l'autre s'ajoutaient de nouvelles variables explicatives de type « X » ; correspondant aux nouveaux points, maintenant « connus », du cadran supérieur de la glène : $P_1, P_{16}, P_{17}, P_{18}, P_{19}$. Dans cette configuration, les distances de type « Y » concernant ces points, considérées comme « à expliquer » dans la première hypothèse posée, devenaient elles-mêmes des variables explicatives pour la seconde hypothèse de modélisation. (*fig 3*)

Résultats

1/ Les équations

Dans la première hypothèse d'une glène totalement détruite, les points de l'échelle de la scapula permettant de prédire au mieux les coordonnées des points de la glène étaient les points P_5 et P_6 . Des distances les concernant se retrouvaient systématiquement dans les 2 premières équations des modèles de chaque point. Les autres points isolés dans les 2 autres équations de chaque modèle étaient en revanche de prédiction plus variable. Une partie de ces résultats rapportant les 4 meilleures équations de distances $Y_{i,j}$ à expliquer pour caractériser l'ensemble des points de la glène sont reportés dans le *fig 4*.

Dans la seconde hypothèse d'une glène partiellement détruite dans sa partie inférieure, l'introduction de nouveaux points avec coordonnées connues, au plus proche de la glène détruite à « reconstruire » (grâce à un nouveau fichier de configuration de matrice des distances enrichies de nouveaux « X » (i.e. $X_{q,5}$, $X_{q,6}$, $X_{q,7}$, avec $q \in \{1, 16, 17, 18, 19\}$), permettait une amélioration sensible des coefficients de détermination, avec confirmation de l'intérêt des points P_5 , P_6 et du point P_7 . (*fig 5*)

2/ Pertinence des équations

Une vérification de la qualité des équations obtenues pour les 2 modèles précédemment décrits, à l'échelle des 43 scapulae retenues dans ce travail, a été menée en calculant l'erreur moyenne induite par ces équations grâce à la moyenne de résidus. Dans le modèle de glène totalement détruite, l'erreur moyenne pour une distance choisie pour un point donné a été calculée à 2,4 mm (4.e-3 mm ; 12,5 mm). Dans le modèle de glène partiellement détruite, l'erreur moyenne a été évaluée à 1,7 mm (4.e-3 mm ; 6,5 mm) pour la même distance évaluée pour un point donné (le nombre de points à prédire étant plus faible pour ce modèle).

L'erreur moyenne et sa valeur maximale étaient donc divisées par 2 par rapport au premier modèle.

Discussion

Une démarche complète de mise au point d'un modèle de prédiction d'une glène normale pré-morbide, reposant sur une méthode mathématique de régression linéaire multiple à partir d'un jeu de données de 43 scapulae saines, a été présentée. La précision de prédiction d'un point donné de la glène variait de 1,7 à 2,4 mm selon le caractère partiel ou complet de la glène à reconstituer, et par conséquent selon le nombre initial de points connus disponibles pour appliquer le modèle statistique.

Les points les plus contributifs pour la prédiction étaient les sommets supérieur, inférieur et médial (trigonum spinae) de l'échelle scapulaire. Ces 2 derniers points ont déjà été retenus, avec le centre de la glène, pour établir un plan de référence anatomique coronal de la scapula (13). Un plan scapulaire axial ou transverse 3D de référence a aussi été défini, orthogonalement au précédent, passant par le point médial du trigonum spinae et le centre glène. La définition initiale de ces plans avait pour objectif de proposer une méthode d'analyse fiable de l'anatomie glénoïdienne. Le référentiel scapulaire ainsi créé était indépendant de la position de l'épaule du patient ou de l'orientation de la scapula lors de l'examen, et par conséquent de son environnement. Il pouvait être utilisé pour mesurer les déformations en version et inclinaison de la glène pathologique à corriger par la pose d'une prothèse. Néanmoins, l'évaluation de ces critères descriptifs glénoïdiens nécessitait de définir un plan de référence de la glène elle-même. Plusieurs méthodes, bidimensionnelles (2D) et 3D, ont été rapportées (13-16). En plus d'une mise en œuvre fastidieuse, ces méthodes se sont confrontées à la difficulté de définir les points d'intérêt de la glène pour en reconstruire le plan, a fortiori en situation pathologique d'usure voire de destruction articulaire. Plus récemment, des logiciels de reconstruction 3D et de segmentation automatique ont été développés et mis à la disposition du chirurgien. Leur but est d'une part de permettre une

planification pré opératoire précise de la pose d'une prothèse d'épaule (4, 5, 17), et d'autre part de concevoir un GSP utile au transfert et à la réalisation per opératoire du planning préalablement établi. L'un des logiciels actuellement le plus abouti est celui proposé par la société Imascap (Plouzané, France). Le logiciel en question, Glénosys®, permet de créer automatiquement par une méthode des moindres carrés de nouveaux plans scapulaire et glénoïdien, à partir de l'ensemble des points 3D de la scapula, et ceci quel que soit le niveau d'atteinte articulaire (17-19). C'est finalement à partir de l'ensemble de ses observations, que ce travail de recherche pour le développement d'un modèle statistique de prédiction de la glène pré-morbide a été mis en place. Au-delà d'une description de la glène pathologique comme cela est fait communément, la modélisation d'une glène normale a été retenue pour objectif. Il s'agit en pratique de ce que le chirurgien cherche à atteindre lors de la pose d'une prothèse d'épaule. Ce dernier essaie de prendre pour repères les données d'anatomie normale qu'il a à disposition, telle que l'écaille de la scapula.

La connaissance préalable de l'anatomie glénoïdienne pré-morbide à reconstituer pourrait être une information complémentaire de celle fournie par la planification 3D et la conception d'un GSP. La précision de positionnement glénoïdien avec une instrumentation conventionnelle à main levée a été évaluée entre 7 et 11° pour les version et inclinaison. La précision pour le placement du point d'entrée de la broche de préparation glénoïdienne après utilisation d'un GSP a été estimée à 3 mm (1). En cas d'usure glénoïdienne importante, avec nécessité d'une greffe ou d'une compensation par un implant augmenté, on peut penser que ces niveaux de précision soient moindres. Pour l'assistance GSP, c'est en effet le point d'entrée de la broche qui est planifié. En cas de greffe, ce point d'introduction ne correspond plus au centre de la platine glénoïdienne pour une configuration de prothèse inversée. Il n'y a par ailleurs en per opératoire aucune information ou possibilité de contrôler la précision du geste réalisé, ou de revenir à une information sur l'objectif de correction recherché. La mise à disposition pendant

l'intervention d'une reconstruction de la glène pré morbide pourrait donc être bénéfique au chirurgien.

Cette même réflexion sur la connaissance de l'anatomie pré-morbide a été récemment rapportée pour la description de l'extrémité proximale de l'humérus (18). La problématique de reconstruire l'épiphyse humérale, notamment en situation traumatique, est comparable à celle de la correction d'une glène arthrosique. Les repères anatomiques sont en effet souvent manquants et peuvent donc rendre difficile ou approximative l'ostéosynthèse et l'implantation humérale prothétique.

L'étude présentée comporte de nombreuses limites. Les premières sont d'ordre méthodologique. L'ensemble des étapes préalables à l'élaboration du modèle statistique a fait appel à des procédures manuelles du traitement de l'image (reconstruction 3D, segmentation, relevé de points) avec différents logiciels (ImageJ®, Blender®). L'apprentissage des différentes opérations et leur maîtrise peuvent avoir été à l'origine d'imprécisions pour constituer la base de données initiale. Une étude de reproductibilité inter-observationnelle a été conduite afin de s'assurer de la pertinence et de la précision des points anatomiques relevés sur chaque scapula.

Une autre limite est le fait de n'avoir évalué la précision de notre modèle statistique que sur la population des 43 scapulae utilisée pour la création des équations de régression. Cette population a été finalement son propre témoin pour juger de la méthode de prédiction développée. Il aurait été intéressant de tester les équations élaborées en situation pathologique, autrement dit sur des scapulae avec des glènes arthrosiques déjà usées et déformées. Il s'agit d'ailleurs de l'un des points méthodologiques forts de l'étude proposée pour la prédiction de l'anatomie pré-morbide de l'humérus proximal. Le modèle statistique mis au point a été éprouvé dans des situations de fractures ou de pertes de substance de

l'humérus (18).

Il serait enfin intéressant de tester notre méthodologie de prédiction non pas sur des points de la glène à définir, mais sur des caractéristiques morphologiques descriptives plus complexes, telles que la version ou l'inclinaison. Ce sont effectivement ces informations qui guident en pratique la stratégie de correction et d'implantation glénoïdienne.

La démarche de l'étude présentée reste intéressante et originale. Les développements récents de la planification 3D et de la technologie GSP ne donnent qu'une information partielle sur l'objectif de positionnement prothétique, et sur lequel le chirurgien n'a finalement aucun rétro-contrôle pendant l'intervention. La possibilité de connaître l'anatomie glénoïdienne pré-morbide peut constituer une nouvelle information pré et per opératoire, aidant le chirurgien à réaliser la correction nécessaire et à choisir les caractéristiques d'implant le plus adapté à l'anatomie normale reconstruite.

Conclusion :

Un modèle statistique de prédiction de l'anatomie pré-morbide de la glène a été présenté dans ce travail. Il s'agit d'une information nouvelle pour le chirurgien, qui pourrait être complémentaire à celle apportée par la planification 3D pré opératoire et la conception des GSP. Le prochain défi à relever reste à trouver et à développer le support par lequel cette information pourrait être accessible et délivrée au chirurgien. L'émergence des techniques de réalité augmentée serait l'une des nouvelles voies possibles d'assistance opératoire. C'est cette seconde piste qui sera explorée et développée dans la 2^{ème} partie de ce travail.

Conflit d'intérêt : aucun conflit en rapport avec l'étude pour chacun des auteurs

Source de financement : aucune

Contribution des auteurs :

Julien Berhouet: auteur principal, concepteur et investigateur de l'étude

Luc Favard: encadrement

Mohamed Slimane: conception et encadrement

David Boas: extraction de données

Théo Voisin: extraction de données

Références bibliographiques

- 1. Gauci MO, Boileau P, Baba M, Chaoui J, Walch G. Patient-specific glenoid guides provide accuracy and reproducibility in total shoulder arthroplasty. The bone & joint journal. 2016 Aug;98-B(8):1080-5. PubMed PMID: 27482021.**
- 2. Hendel MD, Bryan JA, Barsoum WK, Rodriguez EJ, Brems JJ, Evans PJ, et al. Comparison of patient-specific instruments with standard surgical instruments in determining glenoid component position: a randomized prospective clinical trial. The Journal of bone and joint surgery American volume. 2012 Dec 5;94(23):2167-75. PubMed PMID: 23224387.**
- 3. Heylen S, Van Haver A, Vuylsteke K, Declercq G, Verborgt O. Patient-specific instrument guidance of glenoid component implantation reduces inclination variability in total and reverse shoulder arthroplasty. Journal of shoulder and elbow surgery / American Shoulder and Elbow Surgeons [et al]. 2016 Feb;25(2):186-92. PubMed PMID: 26456430.**
- 4. Iannotti J, Baker J, Rodriguez E, Brems J, Ricchetti E, Mesiha M, et al. Three-dimensional preoperative planning software and a novel information transfer technology improve glenoid component positioning. The Journal of bone and joint surgery American volume. 2014 May 7;96(9):e71. PubMed PMID: 24806017.**
- 5. Berhouet J, Gulotta LV, Dines DM, Craig E, Warren RF, Choi D, et al. Preoperative planning for accurate glenoid component positioning in reverse shoulder arthroplasty. Orthopaedics & traumatology, surgery & research : OTSR. 2017 May;103(3):407-13. PubMed PMID: 28238965.**
- 6. Levy JC, Everding NG, Frankle MA, Keppler LJ. Accuracy of patient-specific guided glenoid baseplate positioning for reverse shoulder arthroplasty. Journal of**

shoulder and elbow surgery / American Shoulder and Elbow Surgeons [et al]. 2014 Apr
13. PubMed PMID: 24739791.

7. Suero EM, Citak M, Lo D, Krych AJ, Craig EV, Pearle AD. Use of a custom alignment guide to improve glenoid component position in total shoulder arthroplasty. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA. 2013 Dec;21(12):2860-6. PubMed PMID: 22932691.

8. Throckmorton TW, Gulotta LV, Bonnarens FO, Wright SA, Hartzell JL, Rozzi WB, et al. Patient-specific targeting guides compared with traditional instrumentation for glenoid component placement in shoulder arthroplasty: a multi-surgeon study in 70 arthritic cadaver specimens. Journal of shoulder and elbow surgery / American Shoulder and Elbow Surgeons [et al]. 2015 Jun;24(6):965-71. PubMed PMID: 25535020.

9. Wylie JD, Tashjian RZ. Planning software and patient-specific instruments in shoulder arthroplasty. Current reviews in musculoskeletal medicine. 2016 Jan 25. PubMed PMID: 26809956.

10. Iannotti JP, Spencer EE, Winter U, Deffenbaugh D, Williams G. Prosthetic positioning in total shoulder arthroplasty. Journal of shoulder and elbow surgery / American Shoulder and Elbow Surgeons [et al]. 2005 Jan-Feb;14(1 Suppl S):111S-21S. PubMed PMID: 15726070.

11. Walch G, Badet R, Boulahia A, Khoury A. Morphologic study of the glenoid in primary glenohumeral osteoarthritis. The Journal of arthroplasty. 1999 Sep;14(6):756-60. PubMed PMID: 10512449.

12. Sirveaux F, Favard L, Oudet D, Huquet D, Walch G, Mole D. Grammont inverted total shoulder arthroplasty in the treatment of glenohumeral osteoarthritis with massive rupture of the cuff. Results of a multicentre study of 80 shoulders. The Journal

of bone and joint surgery British volume. 2004 Apr;86(3):388-95. PubMed PMID: 15125127.

13. Kwon YW, Powell KA, Yum JK, Brems JJ, Iannotti JP. Use of three-dimensional computed tomography for the analysis of the glenoid anatomy. Journal of shoulder and elbow surgery / American Shoulder and Elbow Surgeons [et al]. 2005 Jan-Feb;14(1):85-90. PubMed PMID: 15723018.

14. Bryce CD, Davison AC, Lewis GS, Wang L, Flemming DJ, Armstrong AD. Two-dimensional glenoid version measurements vary with coronal and sagittal scapular rotation. The Journal of bone and joint surgery American volume. 2010 Mar;92(3):692-9. PubMed PMID: 20194328.

15. Bryce CD, Pennypacker JL, Kulkarni N, Paul EM, Hollenbeak CS, Mosher TJ, et al. Validation of three-dimensional models of in situ scapulae. Journal of shoulder and elbow surgery / American Shoulder and Elbow Surgeons [et al]. 2008 Sep-Oct;17(5):825-32. PubMed PMID: 18490182.

16. Budge MD, Lewis GS, Schaefer E, Coquia S, Flemming DJ, Armstrong AD. Comparison of standard two-dimensional and three-dimensional corrected glenoid version measurements. Journal of shoulder and elbow surgery / American Shoulder and Elbow Surgeons [et al]. 2011 Jun;20(4):577-83. PubMed PMID: 21324716.

17. Chaoui J, Hamitouche C, Stindel E, Roux C. Recognition-based segmentation and registration method for image guided shoulder surgery. Conference proceedings : Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Annual Conference. 2011;2011:6212-5. PubMed PMID: 22255758.

18. Poltaretskyi S, Chaoui J, Mayya M, Hamitouche C, Bercik MJ, Boileau P, et al. Prediction of the pre-morbid 3D anatomy of the proximal humerus based on statistical

shape modelling. *The bone & joint journal*. 2017 Jul;99-B(7):927-33. PubMed PMID: 28663399.

19. Moineau G, Levigne C, Boileau P, Young A, Walch G, French Society for S, et al. Three-dimensional measurement method of arthritic glenoid cavity morphology: feasibility and reproducibility. *Orthopaedics & traumatology, surgery & research : OTSR*. 2012 Oct;98(6 Suppl):S139-45. PubMed PMID: 22964089.

Légendes des figures / Figures legends

Figure 1 : Représentation du pointage d'une scapula (avec vue sagittale à gauche et vue frontale à droite).

Figure 2: Représentation de l'objectif fixé pour le modèle de régression linéaire multiple. Exemple schématique de la détermination d'un point (P_1) de la glène à partir des différents points scapulaires situés en dehors de la glène ($P_5, P_6, P_7, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{13}$). Quatre équations de distances ($P_1-P_{10}, P_1-P_{11}, P_1-P_7, P_1-P_{13}$) étaient retenues à chaque fois.

fig 3 : Fichiers de configurations de la matrice des distances utilisés pour les régressions.

A gauche, dans l'hypothèse d'une glène totalement détruite. A droite, dans l'hypothèse d'une glène partiellement usée dans sa partie inférieure, avec une première configuration ne prenant pas en compte les nouvelles variables X avec les nouveaux points disponibles de la glène supérieure, et une deuxième configuration les prenant en compte.

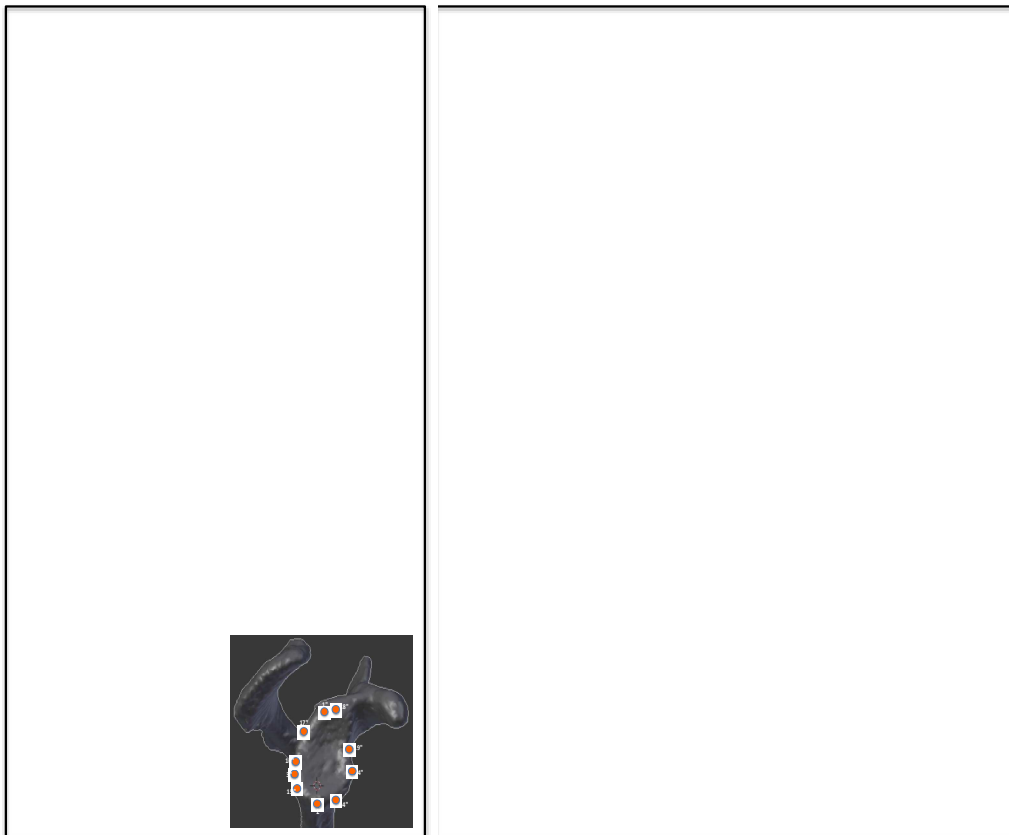


fig 4 : Exemples d'équations de régression de distances, les 4 meilleures, expliquant les points de la glène en situation totalement détruite. Les points de l'écaille de la scapula permettant de prédire au mieux les coordonnées des points de la glène étaient les points P₅ et P₆.

Equation P₁	Rsquared	Equation P₁₅	Rsquared
Y1.5 = (0.244 X5.6) + (0.239 X6.11) + (-0.339 AngleA) + (-2.472 AngleE) + 366.497	0.95	Y15.5 = (0.419 X5.7) + (0.299 X5.11) + (0.430 X6.7) + (-1.987 AngleE) + 274.890	0.92
Y1.6 = (0.201 X6.9) + (0.674 X6.11) + (0.382 X10.11) + (0.525 AngleE) + -76.875	0.94	Y15.6 = (-0.490 X5.10) + (0.520 X6.7) + (0.741 X7.10) + (-0.718 AngleFG) + 58.538	0.73
Y1.7 = (-0.479 X5.10) + (0.383 X6.11) + (0.715 X7.10) + (-1.099 AngleE) + 151.761	0.86	Y15.7 = (-0.827 X5.10) + (0.447 X6.7) + (1.106 X7.10) + (-2.131 AngleE) + 291.169	0.76
Y1.10 = (0.447 X5.10) + (0.410 AngleA) + (0.657 AngleE) + (0.245 AngleFG) + -141.296	0.75	Y15.9 = (0.173 X5.7) + (0.398 X6.9) + (-0.967 AngleE) + (0.388 AngleFG) + 95.403	0.65
Equation P₂	Rsquared	Equation P₁₆	Rsquared
Y2.5 = (0.500 X5.7) + (0.589 X6.7) + (-2.890 AngleE) + 408.586	0.96	Y16.5 = (0.282 X5.7) + (0.426 X5.10) + (0.278 X6.7) + (-1.439 AngleE) + 199.377	0.87
Y2.6 = (0.330 X5.10) + (0.290 X6.9) + (1.809 AngleE) + (-0.541 AngleFG) + -173.832	0.94	Y16.6 = (0.375 X5.10) + (0.359 X6.9) + (1.794 AngleE) + (-0.427 AngleFG) + -181.797	0.83
Y2.7 = (-0.682 X5.10) + (0.403 X6.7) + (0.918 X7.10) + (-1.901 AngleE) + 276.369	0.91	Y16.7 = (0.221 X6.7) + (-0.338 X6.9) + (0.783 X7.9) + (-0.260 AngleFG) + 53.564	0.72
Y2.10 = (0.247 X6.9) + (0.485 X9.10) + (-0.455 AngleE) + (0.238 AngleFG) + 45.285	0.73	Y16.11 = (0.181 X5.6) + (0.171 X5.10) + (-0.139 X7.9) + (0.260 X10.11) + 13.033	0.70
Equation P₃	Rsquared	Equation P₁₇	Rsquared
Y3.5 = (0.373 X5.7) + (0.382 X5.10) + (0.238 X6.9) + (-1.187 AngleE) + 160.582	0.87	Y17.5 = (0.290 X6.7) + (0.361 X7.10) + (-0.436 AngleA) + (-2.200 AngleE) + 329.887	0.87
Y3.6 = (-0.296 X5.11) + (0.640 X6.7) + (0.341 X7.9) + (-0.735 AngleFG) + 91.232	0.79	Y17.6 = (-0.369 X5.11) + (0.700 X6.7) + (0.416 X7.10) + (-0.789 AngleFG) + 89.183	0.84
Y3.7 = (-0.622 X5.10) + (0.261 X6.7) + (0.953 X7.10) + (-1.616 AngleE) + 236.267	0.82	Y17.7 = (0.306 X5.6) + (0.181 X5.11) + (-0.255 X6.7) + (0.314 X7.9) + 32.674	0.76
Y3.11 = (0.201 X5.7) + (0.271 X5.10) + (0.231 X6.9) + (-0.332 X7.9) + 18.987	0.66	Y17.10 = (-0.195 X5.6) + (-0.114 X5.11) + (0.254 X6.7) + (0.433 X7.10) + -10.42796	0.71
Equation P₄	Rsquared	Equation P₁₈	Rsquared
Y4.5 = (0.300 X5.7) + (0.509 X6.7) + (-2.110 AngleE) + (-0.384 AngleFG) + 329.723	0.91	Y18.5 = (0.247 X5.7) + (0.426 X6.7) + (-2.181 AngleE) + (-0.458 AngleFG) + 346.215	0.91
Y4.6 = (-0.395 X5.11) + (0.595 X6.7) + (0.445 X7.10) + (-0.791 AngleFG) + 88.917	0.79	Y18.6 = (0.552 X6.9) + (0.493 X9.10) + (0.430 X10.11) + (-0.474 AngleA) + 46.789	0.89
Y4.7 = (0.255 X5.10) + (0.961 X7.12) + (0.314 AngleA) + (0.742 AngleE) + -109.212	0.88	Y18.7 = (0.341 X5.6) + (0.197 X5.11) + (-0.272 X6.7) + (0.238 X7.9) + 37.793	0.77
Y4.9 = (0.356 X6.9) + (0.315 X9.10) + (-0.700 AngleE) + (0.310 AngleFG) + 64.842	0.73	Y18.10 = (0.136 X5.10) + (0.476 X7.10) + (-0.446 X7.12) + (0.228 AngleFG) + -24.988	0.71
Equation P₁₄	Rsquared	Equation P₁₉	Rsquared
Y14.5 = (0.399 X5.7) + (0.429 X6.7) + (0.240 X6.11) + (-2.592 AngleE) + 348.634	0.96	Y19.5 = (0.386 X5.11) + (0.214 X6.9) + (0.432 X9.10) + (-1.241 AngleE) + 165.414	0.84
Y14.6 = (0.540 X5.10) + (0.412 X10.11) + (2.350 AngleE) + (-0.493 AngleFG) + -243.052	0.71	Y19.6 = (-0.485 X5.11) + (0.641 X6.7) + (0.514 X7.10) + (-0.827 AngleFG) + 92.234	0.82
Y14.7 = (0.321 X5.6) + (-0.218 X5.7) + (-0.251 X6.9) + (0.580 X7.9) + 39.728	0.72	Y19.7 = (-0.524 X5.10) + (0.347 X6.11) + (0.713 X7.10) + (-1.107 AngleE) + 161.645	0.69
Y14.11 = (0.214 X5.7) + (0.276 X5.10) + (0.199 X6.9) + (-0.290 X7.9) + 20.720	0.62	Y19.10 = (0.458 X5.10) + (0.353 AngleA) + (1.149 AngleE) + -183.2155	0.57

fig 5: Exemples d'équations de régression de distances, les 4 meilleures, expliquant les points de la glène partiellement détruite. Les points de l'écaille de la scapula permettant de prédire au mieux les coordonnées des points de la glène étaient les points P₅, P₆, et P₇.

Equation P ₂	Rsquared
$Y_{2.5} = (0.578 X_{5.6}) + (0.0738 X_{17.7}) + (-2.254 \text{ AngleE}) + 318.767$	0.996
$Y_{2.6} = (0.549 X_{17.6}) + (0.377 X_{19.6}) + (0.407 \text{ AngleA}) + -27.184$	0.95
$Y_{2.7} = (0.219 X_{6.7}) + (0.800 X_{1.7}) + (0.493 \text{ AngleA}) + -24.922$	0.94
$Y_{2.9} = (0.317 X_{5.6}) + (0.368 X_{6.9}) + (-0.567 X_{17.5}) + (-1.772 \text{ AngleE}) + 236.052$	0.72
Equation P ₃	Rsquared
$Y_{3.5} = (0.334 X_{5.7}) + (0.288 X_{6.7}) + (0.536 X_{1.5}) + (-1.248 \text{ AngleE}) + 171.124$	0.95
$Y_{3.6} = (-0.297 X_{5.6}) + (0.502 X_{16.5}) + (0.884 X_{17.6}) + (1.265 \text{ AngleE}) + -168.419$	0.93
$Y_{3.7} = (0.141 X_{6.7}) + (1.048 X_{17.7}) + (-0.314 X_{18.5}) + (-0.723 \text{ AngleE}) + 105.440$	0.94
$Y_{3.9} = (-0.129 X_{5.11}) + (0.619 X_{6.9}) + (-0.426 X_{16.6}) + (-0.386 \text{ AngleE}) + 57.224$	0.78
Equation P ₄	Rsquared
$Y_{4.5} = (0.449 X_{5.6}) + (-0.157 X_{5.7}) + (0.377 X_{18.7}) + (-1.875 \text{ AngleE}) + 251.036$	0.95
$Y_{4.6} = (0.771 X_{18.5}) + (0.572 X_{19.6}) + (0.592 \text{ AngleA}) + (1.834 \text{ AngleE}) + -291.933$	0.91
$Y_{4.7} = (0.143 X_{6.7}) + (0.585 X_{7.12}) + (0.526 X_{18.7}) + (0.307 \text{ AngleA}) + -23.12627$	0.95
$Y_{4.9} = (0.291 X_{6.9}) + (0.687 X_{16.19}) + (-0.653 \text{ AngleE}) + (0.273 \text{ AngleFG}) + 67.427$	0.73
Equation P ₁₄	Rsquared
$Y_{14.5} = (0.442 X_{5.6}) + (0.317 X_{17.5}) + (-1.544 \text{ AngleE}) + 218.613$	0.97
$Y_{14.6} = (-0.334 X_{5.6}) + (0.410 X_{16.5}) + (0.936 X_{17.6}) + (1.095 \text{ AngleE}) + -147.427$	0.96
$Y_{14.7} = (0.269 X_{6.7}) + (1.004 X_{17.7}) + (-0.429 X_{18.5}) + (-1.150 \text{ AngleE}) + 165.262$	0.86
$Y_{14.11} = (0.207 X_{5.7}) + (0.320 X_{5.10}) + (0.896 X_{16.19}) + (-0.381 X_{17.7}) + 30.63603$	0.67
Equation P ₁₅	Rsquared
$Y_{15.5} = (0.287 X_{5.6}) + (0.813 X_{1.5}) + (0.470 \text{ AngleA}) + -36.191$	0.93
$Y_{15.6} = (0.357 X_{1.7}) + (0.800 X_{18.6}) + (0.585 \text{ AngleA}) + -62.163$	0.91
$Y_{15.7} = (0.252 X_{6.7}) + (0.492 X_{7.12}) + (0.678 X_{18.7}) + (0.612 \text{ AngleA}) + -58.446$	0.86
$Y_{15.9} = (0.173 X_{5.7}) + (0.398 X_{6.9}) + (-0.967 \text{ AngleE}) + (0.388 \text{ AngleFG}) + 95.403$	0.65

Figure 1



Figure 2

