

TABLE DES MATIERES

ABRÉVIATIONS	- 2 -
PRÉAMBULE	- 3 -
INTRODUCTION	- 7 -
MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	- 8 -
Population étudiée.....	- 8 -
Recueil de données	- 8 -
Stratégie chirurgicale et technique opératoire	- 9 -
Méthodologie	- 13 -
Critères de jugement	- 13 -
RÉSULTATS	- 14 -
Description de la population.....	- 14 -
Facteurs de risque	- 16 -
Fracture initiale	- 16 -
Technique de cure de la pseudarthrose	- 16 -
Résultat du traitement de la pseudarthrose	- 17 -
Choix des méthodes d'ostéosynthèse	- 19 -
Résultats des prélèvements bactériologiques	- 19 -
Exemples de cas	- 21 -
DISCUSSION.....	- 23 -
CONCLUSION	- 26 -
RÉFÉRENCES	- 27 -
RÉSUMÉ	- 35 -

ABRÉVIATIONS

AO :	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
AINS :	Anti-Inflammatoire Non Stéroïdiens
AMOS :	Ablation de Matériel d'Ostéosynthèse
ASA :	American Society of Anesthesiologists
BMP :	Bone Morphogenic Protein
CRIOAc :	Centre de Référence des Infections Ostéo-Articulaires complexes.
CRP :	C-Reactive Protein
DCP :	Dynamic Compression Plate
ESTROT :	European Society of Tissue Regeneration in Orthopaedics and Traumatology
ET :	Écart-type
IMC :	Indice de Masse Corporelle
LCP :	Locking Compression Plate
NFS :	Numération-Formule Sanguine
NUSS :	Non-Union Scoring System
PRP :	Plasma Riche en Plaquettes
RCP :	Réunion de Concertation Pluridisciplinaire
RIA TM :	Reamer Irrigator Aspirator [†]
SFAR :	Société Française d'Anesthésie-Réanimation

[†] Depuy-Synthes, West-Chester, PA, USA

PRÉAMBULE

La pseudarthrose est définie par l'*European Society of Tissue Regeneration in Orthopaedics and Traumatology* (ESTROT) comme une fracture qui ne consolidera pas en l'absence d'intervention extérieure⁵⁴. En pratique, on considère une fracture en pseudarthrose au terme du double du délai normal de consolidation. Ainsi, pour la diaphyse des os longs, la majorité des chirurgiens parlent de retard de consolidation au-delà de 3 mois, et de pseudarthrose au-delà de 6 mois^{7,60}.

La présentation clinique est marquée par des douleurs accompagnées d'une impotence fonctionnelle, occasionnant un retentissement important sur la vie quotidienne^{54,68}. Les pseudarthroses ont un impact d'un point de vue de la santé publique puisqu'elles engendrent des coûts importants liés au traitement, et compromettent l'aptitude professionnelle des patients^{44,57}. Au Royaume-Uni, le coût de traitement d'une pseudarthrose est estimé entre 7000 et 79 000 Livres Sterling⁵². Les coûts indirects, notamment liés à la perte de productivité, sont beaucoup plus importants car on les estime à 83-93% dans le cas d'une fracture du tibia par exemple³¹.

Les complications infectieuses étant pourvoyeuses de pseudarthroses, on a pour habitude de classer ces dernières en deux catégories : septiques ou aseptiques. Pour les premières, la cure de la pseudarthrose passera par un traitement de l'infection grâce à une prise en charge médico-chirurgicale³⁶. Dans le second cas, on identifie deux facteurs à l'origine de la pseudarthrose, qui peut être d'origine mécanique ou biologique. Les pseudarthroses d'origine mécanique sont issues de la persistance de micro-mouvements dans le foyer de fracture, soit en raison d'une ostéosynthèse imparfaite, soit d'une immobilisation insuffisante s'il s'agit d'un traitement orthopédique^{14,48,63}. Les pseudarthroses d'origine biologique sont en lien avec une insuffisance des processus de consolidation, telle qu'un défaut de vascularisation^{3,28}. Les causes peuvent bien entendu se cumuler.

Face à une suspicion de pseudarthrose de la diaphyse d'un os long, un bilan clinique, radiographique, et biologique est réalisé. Le diagnostic est confirmé par la mise en évidence d'une solution de continuité toujours présente au terme du délai requis. Le bilan d'imagerie peut à ce titre être complété par une imagerie en coupe. On cherchera ensuite à éliminer une étiologie septique par la réalisation d'un interrogatoire policier, la recherche de signes

d'ostéite à l'imagerie et des prélèvements biologiques sanguins ou dans le foyer de pseudarthrose⁸.

L'origine septique doit être suspectée jusqu'à preuve du contraire devant un retard de consolidation ou une pseudarthrose récidivante^{59,65}. En cas de pseudarthrose septique avérée, la prise en charge est multidisciplinaire et va associer un traitement chirurgical pour résection des sections osseuses nécrotiques et ostéosynthèse, à un traitement médical par antibiothérapie^{13,36}. La classification de Cierny-Mader, utilisée pour les ostéomyélites, fournit une aide à la décision intéressante pour les pseudarthroses septiques¹³.

Les germes retrouvés peuvent provenir d'une contamination exogène, par exemple dans le cas de traumatismes ouverts, mais il s'agit essentiellement de la flore commensale cutanée, et l'on retrouve en majorité des Staphylocoques et des *Cutibacterium acnes*^{59,65}.

En l'absence d'origine septique avérée, on considérera qu'il s'agit d'une pseudarthrose aseptique dont l'origine est alors soit un défaut d'ostéosynthèse avec une mobilité du foyer de fracture, soit une anomalie de la consolidation biologique.

Le score NUSS proposé par Calori et al. permet d'estimer la sévérité de la pseudarthrose et est une aide à la décision thérapeutique¹².

Dans le cas simple où l'étiologie est purement mécanique, une reprise du montage d'ostéosynthèse peut théoriquement suffire à faire consolider la fracture. Une cause purement mécanique reste néanmoins rare et l'origine de la pseudarthrose est souvent considérée comme mixte, une anomalie biologique étant souvent associée. Un préalable est alors le sevrage tabagique et la prise en charge d'une pathologie générale pouvant compromettre la vascularisation. Ensuite, le traitement chirurgical doit apporter des éléments en faveur de la consolidation, essentiellement sous la forme d'une matrice et de facteurs de croissance osseuse^{3,28}. Cet apport se fait généralement par le biais d'une autogreffe d'os spongieux, qui peut être complétée selon les cas par de l'os artificiel ou du greffon de banque. L'excision préalable de tous les fragments osseux nécrotiques est ici limitée par rapport au cas d'une pseudarthrose septique car elle conduit à un *defect* osseux qui peut être difficile à combler. En revanche, l'abord en décortication au ciseau à os selon la technique de Judet, et la reperméabilisation du fût diaphysaire sont des éléments primordiaux de la prise en charge chirurgicale⁸. Un apport d'os cortical peut être nécessaire, par exemple en cas de perte de substance importante. Si la perte de substance est majeure, d'autres techniques peuvent être utilisées comme une technique de membrane induite, un transport osseux ou une greffe

vascularisée de fibula^{42,69,82}. Les facteurs de croissance artificiels tels que les BMP ont été retirés du marché, et les techniques alternatives comme les ultrasons n'ont pas à ce jour fait la preuve d'une efficacité en pratique courante^{18,26}. Enfin, de récentes techniques comme l'injection de PRP dans le foyer de pseudarthrose font actuellement l'objet d'une évaluation².

Les fractures de la diaphyse de l'humérus représentent 8% de l'ensemble des fractures de l'adulte⁷¹. Qu'elles soient prises en charge de façon chirurgicale ou orthopédique, elles évoluent vers la pseudarthrose dans 8 à 23% des cas^{21,62,80}. Il existe 2 pics de fréquence, que sont l'homme jeune victime d'accident à haute énergie et la femme âgée ostéoporotique^{21,75,80}. L'incidence des pseudarthroses suit également cette distribution bimodale⁵².

Plusieurs facteurs de risque de pseudarthrose ont été mis en évidence : un traumatisme ouvert, une fracture transversale ou oblique courte, un tabagisme ou un éthylisme, la consommation d'AINS ou d'immunomodulateurs, l'obésité^{10,15,77}.

La prise en charge chirurgicale des pseudarthroses de l'humérus reste un défi pour le chirurgien orthopédique, tant sur le plan de la stratégie opératoire que de la réalisation technique. Les suites opératoires sont variables selon les séries, avec des consolidations osseuses acquises dans 66 à 100% des cas^{40,47,50,64,70}. Les complications sont nombreuses, avec une infection dans 11% des cas et un risque de paralysie radiale que l'on retrouve dans 2 à 6% des cas^{39,57,64}.

Si les pseudarthroses diaphysaires des os longs ont fait l'objet de nombreux travaux, il n'est pas possible de transposer la prise en charge décrite au membre inférieur pour traiter une pseudarthrose de la diaphyse humérale. La première différence notable est l'absence de forces de compression axiales liées à l'appui, que l'on retrouve au niveau du fémur et du tibia. Les contraintes sont en torsion-flexion plutôt qu'en compression-distraction et il faut en tenir compte lors du choix de l'ostéosynthèse et de l'immobilisation post-opératoire.

Les grands principes restent les mêmes -débridement, greffe, ostéosynthèse-, mais ces particularités font du traitement d'une pseudarthrose de la diaphyse humérale une chirurgie complexe.

Le choix du moyen d'ostéosynthèse devra prendre en compte l'éventuelle chirurgie initiale et sa voie d'abord. L'abord antéro-latéral entre triceps et brachial antérieur permet le

positionnement de la plaque qui offre la meilleure stabilité biomécanique, mais avec le risque de lésion du nerf radial dont la dissection est rendue compliquée par la fibrose en cas de zone déjà abordée pour le traitement initial⁸. En raison de la problématique biomécanique exposée précédemment, l'enclouage centromédullaire a un taux de succès moindre qu'au membre inférieur, et on privilégie l'ostéosynthèse à foyer ouvert par plaque qui donne de meilleurs résultats cliniques⁶⁴. L'utilisation de deux plaques d'ostéosynthèse semble donner de bons résultats avec une stabilité satisfaisante du foyer pour un abord qui n'est pas plus extensif^{22,66,70}. Le fixateur externe est une méthode d'ostéosynthèse largement utilisée pour les pseudarthroses du membre inférieur, associée à un taux de consolidation à l'humérus de plus de 90%, mais qui pose des problèmes de compliance et un taux de complications majeur^{4,51,64}. D'autres techniques ont été décrites, comme le manchonnage d'un greffon non vascularisé de fibula dans la diaphyse humérale. Cette technique semble donner de bons résultats mais nécessite une libération extensive du foyer de pseudarthrose, pouvant compromettre les facteurs locaux de consolidation²⁹. La gestion des zones réséquées peut être un problème supplémentaire, et s'il est possible de raccourcir l'humérus de quelques centimètres sans conséquences fonctionnelles, une perte de substance majeure doit faire appel à des techniques de greffe⁸.

L'incidence des pseudarthroses de la diaphyse de l'humérus, leur prise en charge complexe et les conséquences de cette pathologie sur le plan personnel et professionnel en font un enjeu de santé publique. Il semble donc tout à fait intéressant de rechercher la meilleure stratégie pour leur prise en charge, en choisissant le traitement le plus adapté au patient. Cette démarche passe par la création d'un arbre décisionnel, basé sur les résultats que nous avons pu observer au cours de notre pratique clinique.

INTRODUCTION

Les fractures de la diaphyse humérale représentent 8% de l'ensemble des fractures, et environ 27% d'entre elles concernent la diaphyse^{6,38,77}. Le traitement orthopédique semble plus pourvoyeur de pseudarthroses que le traitement chirurgical, mais tous traitements confondus, le taux de pseudarthrose varie entre 8 et 23% selon les séries^{21,62,80}. Cette complication est définie par l'absence de consolidation de la fracture après 6 mois^{7,60}. Il s'agit d'une pathologie particulièrement invalidante, occasionnant douleurs et impotence fonctionnelle^{31,54,68}. Les radiographies peuvent mettre en évidence l'absence de cal osseux, ou au contraire un cal hypertrophique, selon la classification établie par Cech & Weber⁷⁹.

Plusieurs facteurs de risque de pseudarthrose ont été identifiés, certains liés à la fracture comme un trait transversal ou oblique court, une fracture ouverte ou associée à des lésions vasculaires ; d'autres liés au patient comme le tabagisme, l'éthylisme chronique, l'obésité ou la prise d'AINS^{10,15,32,77}.

Le traitement chirurgical des pseudarthroses de l'humérus est grevé de 2 à 30% d'échecs et 8 à 20% de complications, notamment la paralysie radiale qui survient dans 6% des cas^{39,64}. Les traitements médicaux décrits tels que l'utilisation d'ultrasons ou l'injection de facteurs de croissance semblent peu efficaces²⁶. Le meilleur traitement à ce jour reste la reprise chirurgicale, avec le débridement du foyer de pseudarthrose, l'ostéosynthèse par un montage fiable, associée éventuellement à une greffe d'os spongieux^{10,32,41,64}.

La séquence chirurgicale, le moyen d'ostéosynthèse et l'utilisation de greffe autologue ou d'autres substituts font pourtant toujours débat^{33,67}.

Devant la diversité des options thérapeutiques proposées pour cette pathologie complexe, nous avons voulu évaluer notre prise en charge. Notre hypothèse était que la stratégie utilisée dans notre pratique abouti à une consolidation dans une majorité des cas. Les objectifs de ce travail étaient de réaliser l'analyse radiographique d'une cohorte de patients pris en charge selon notre stratégie thérapeutique, ainsi que l'élaboration à partir de ces résultats d'un protocole d'aide à la décision et de stratégie pour ces patients.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Population étudiée

Il s'agissait d'une étude de cohorte rétrospective, qui concernait les patients majeurs pris en charge au bloc opératoire pour la réalisation d'une cure de pseudarthrose de la diaphyse humérale, entre 2005 et 2019.

Le traitement initial de la fracture était orthopédique ou chirurgical. Le diagnostic de pseudarthrose était défini par l'absence de consolidation de la fracture sur une radiographie de contrôle à 6 mois du début du traitement initial⁷². La réalisation d'un scanner permettait de confirmer le diagnostic et d'évaluer le stock osseux.

Le recul minimal était d'un an après la chirurgie de cure de la pseudarthrose.

Étaient exclus les patients présentant une pathologie tumorale à l'origine de la fracture ou de la pseudarthrose, ainsi que les patients ayant déjà été opérés d'une pseudarthrose de la diaphyse humérale homolatérale.

Le design de l'étude a été validé par le comité d'éthique de l'établissement et le recueil du consentement des patients n'était pas nécessaire. Les données ont été anonymisées.

Recueil de données

Pour chaque patient, une revue du dossier a été réalisée afin de confirmer le diagnostic pré-opératoire, de rechercher les facteurs de risque de pseudarthrose connus suivants : score ASA¹⁶ élevé, tabagisme sévère ou actif, diabète, traitement anti-inflammatoire ou immunomodulateur, obésité.

Les radiographies et observations cliniques ont été relues afin de préciser le type de fracture selon l'AO^{49,55}, le type de cal selon Cech & Weber⁷⁹, la présence d'une perte de substance osseuse, la présence d'une ouverture cutanée selon la classification de Gustilo³⁰, la présence d'une atteinte vasculo-nerveuse. Le type de traitement initial choisi était analysé selon les *guidelines* de l'ostéosynthèse de l'AO⁹. Les résultats des prélèvements bactériologiques pré-opératoires ont été recueillis, dans les cas où ils avaient été réalisés. Le compte-rendu opératoire de l'intervention de cure de pseudarthrose devait être disponible et préciser le

matériel implanté, l'utilisation de greffe ou autre adjuvant, et le résultat des prélèvements bactériologiques per-opératoires.

Stratégie chirurgicale et technique opératoire

Pour les patients pour lesquels un traitement orthopédique de la fracture de la diaphyse humérale avait été indiqué, nous réalisions une ostéosynthèse par plaque accompagnée d'une autogreffe d'os spongieux. La greffe était prélevée aux dépens de la crête iliaque.

Dans le cas où le patient présentait un faible risque de pseudarthrose, défini par un score NUSS inférieur à 25^{5,11}, une prise en charge par ostéosynthèse seule pouvait être réalisée. Dans ce cas, il s'agissait d'une ostéosynthèse par plaque après débridement du foyer de pseudarthrose, ou par clou après alésage du fût diaphysaire.

En cas d'ostéosynthèse par plaque, nous utilisions une plaque en acier LCP 4.5mm[‡] avec des vis corticales. La voie d'abord était latérale et une neurolyse du radial était réalisée. Si la tenue osseuse des vis n'était pas satisfaisante, par exemple en cas d'ostéoporose, nous utilisions des vis verrouillées. En cas d'ostéosynthèse par enclouage centromédullaire, nous utilisions un clou en titane Aequalis[™] long[§], inséré par une voie d'abord supéro-externe, avec un verrouillage proximal et distal. L'alésage était réalisé taille pour taille jusqu'au diamètre du clou (7 ou 8mm).

Pour les patients dont la fracture avait été traitée de façon chirurgicale en première intention, nous recherchions une origine septique par un bilan clinique, biologique et scannographique : présence d'une cicatrice inflammatoire ou désunie, d'un écoulement purulent, syndrome inflammatoire biologique, ostéolyse.

En l'absence d'origine septique évoquée, la stabilité mécanique du montage était évaluée selon les règles d'ostéosynthèse de l'AO⁹. La stratégie chirurgicale était ensuite orientée selon l'arbre décisionnel présenté à la Figure 1. Dans le cas d'un patient présentant une ostéosynthèse imparfaite (Figure 2), considérant qu'il s'agissait d'une pseudarthrose d'origine mécanique, une reprise du montage était réalisée pour une ostéosynthèse rigide, et l'ajout d'une greffe osseuse autologue.

[‡] Depuy-Synthes, West-Chester, PA, USA

[§] Tornier-Wright, Montbonnot-Saint-Martin, France

FIGURE 1 : Stratégie thérapeutique

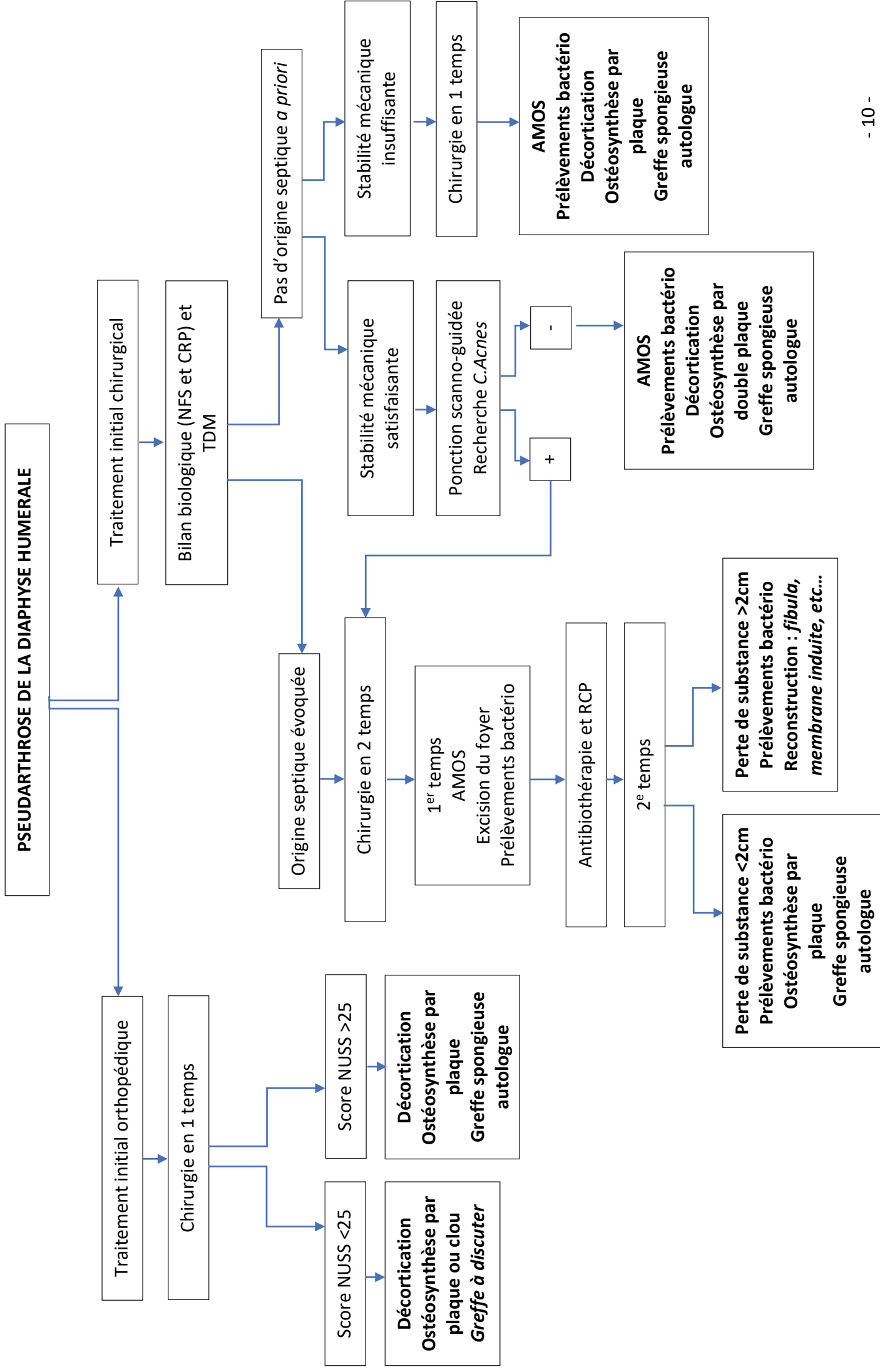
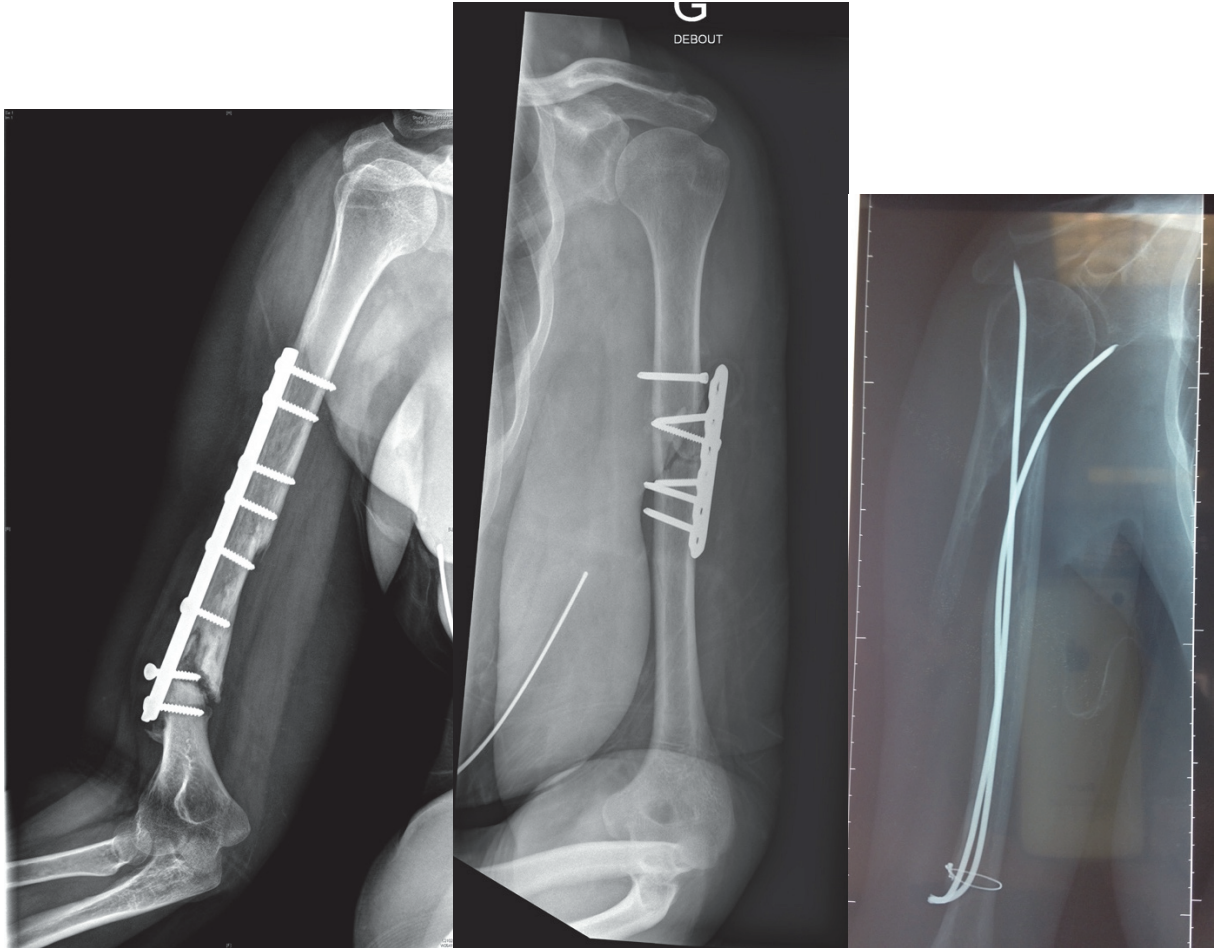


FIGURE 2 :

Radiographies de l'humérus présentant des ostéosynthèses ne respectant pas les règles de l'AO, avec pseudarthrose d'origine mécanique suspectée.



L'ostéosynthèse était réalisée par plaque LCP 4.5mm ou par clou centro-médullaire selon les modalités précédemment décrites. La greffe osseuse était prélevée aux dépens de la crête iliaque.

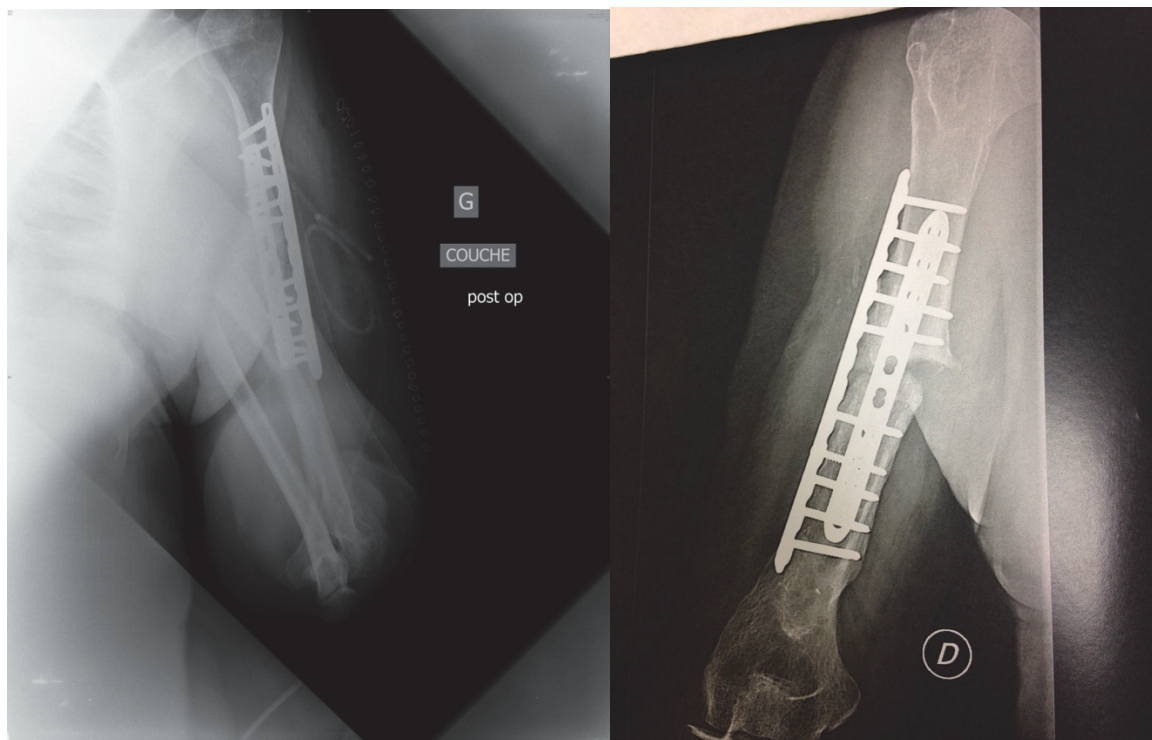
Dans le cas d'un patient sans signe d'origine septique et avec une ostéosynthèse adéquate, une ponction-biopsie guidée par l'imagerie était réalisée afin d'éliminer une infection latente. En cas de résultat négatif, l'ostéosynthèse de la cure de pseudarthrose était réalisée au moyen de deux plaques (Figure 3).

Dans ce cas, nous réalisons une voie d'abord latérale, avec neurolyse du nerf radial, puis l'ostéosynthèse était réalisée à l'aide de 2 plaques LCP 3.5mm^{††} positionnées à 90° sur la face antérieure et la face latérale de la diaphyse humérale. Nous utilisons des vis corticales, sauf en cas de tenue imparfaite où nous utilisons alors des vis verrouillées.

^{††} Depuy-Synthes, West-Chester, PA, USA

FIGURE 3

Ostéosynthèse par un montage à deux plaques perpendiculaires.



Lorsque les patients présentaient des signes de pseudarthrose septique au bilan initial ou une ponction positive, nous réalisons une prise en charge en deux temps. Le premier temps consistait en l'ablation du matériel d'ostéosynthèse, le débridement et l'excision chirurgicale des tissus nécrotiques, ainsi que la réalisation de nouveaux prélèvements bactériologiques. Une antibiothérapie probabiliste à large spectre était débutée en attente des résultats bactériologiques. Dès ceux-ci disponibles, la stratégie du deuxième temps était décidée en concertation avec les infectiologues du CRIOAc. En pratique, cela consistait en une antibiothérapie adaptée et une chirurgie associant ostéosynthèse rigide et greffe osseuse, à la suite d'un délai variant entre 6 et 12 semaines. Dans le cas d'une perte de substance osseuse supérieure à 2 centimètres, une solution de reconstruction était envisagée, par exemple par un greffon vascularisé de fibula.

Pour chaque patient, en dehors de ceux ayant initialement été traités de manière orthopédique, des prélèvements bactériologiques étaient réalisés lors du geste de cure de pseudarthrose. Une antibioprophylaxie était réalisée selon les recommandations de la SFAR⁷³ pour les cas considérés comme non-septique. En cas de pseudarthrose septique, l'antibiothérapie était réalisée conformément à la décision du CRIOAc.

Méthodologie

Nous avons réalisé une analyse statistique afin de valider notre arbre décisionnel et de comparer les sous-groupes de traitement initial.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R^{§§}. Dans les analyses de sous-groupes, nous avons utilisé un test de Mann-Whitney pour comparer les variables continues et un test exact de Fisher pour les variables discrètes. Pour comparer le taux de consolidation en fonction de la stratégie thérapeutique, nous avons utilisé un test exact de Fisher.

Critères de jugement

Le critère de jugement principal était la consolidation radiographique de la pseudarthrose, sur des clichés de l'humérus de face et profil.

Les critères de jugement secondaires étaient la nécessité d'une reprise chirurgicale et l'apparition de complications post-opératoires.

^{§§} The R Foundation, Vienne, Autriche

RÉSULTATS

Description de la population

(Figures 4 & 5)

Entre 2005 et 2019, 69 patients ont été opérés pour une pseudarthrose de la diaphyse humérale dans notre centre. Quatre ont été exclus en raison d'une pseudarthrose survenue sur une fracture pathologique. Nous avons des données manquantes pour 4 patients, et nous avons donc inclus 61 patients.

Cinquante-deux patients ont été traités en première intention de façon chirurgicale et 9 relevaient d'un traitement orthopédique.

L'âge minimum était de 26 ans, l'âge maximum de 87 ans et l'âge moyen de 52 ans (ET=17,7).

Les patients initialement traités de façon orthopédique étaient significativement plus âgés (71,4 vs 49,5 ans ; $p<0,01$) que les patients initialement opérés.

Il y avait 31 hommes et 30 femmes.

Le recul moyen était de 94 mois (ET=48).

FIGURE 4 : Flow-chart

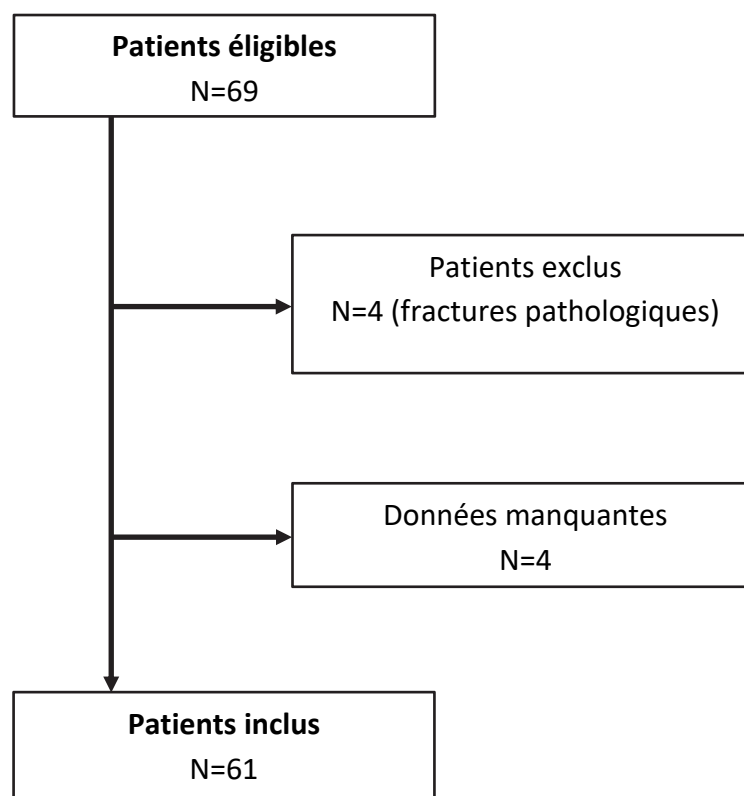


FIGURE 5 : Description de la cohorte

Description de la cohorte			
Patients inclus N=61			
	Traitement orthopédique = 9	Traitement chirurgical = 52	p
Age moyen (écart-type)	71,4 (13,9)	49,5 (16,4)	<0.01†
Sexe (%)			0,3*
Homme	3 (33)	28 (54)	
Femme	6 (67)	24 (46)	
Caractéristiques lésionnelles			
Type AO (%)			0,71*
A	3 (33)	23 (44)	
B	4 (44)	22 (42)	
C	2 (22)	7 (13)	
Fractures ouvertes (%)			
Gustilo 1	0	5 (10)	
Gustilo 2	0	3 (6)	
Gustilo 3	0	2 (4)	
Atteinte vasculo-nerveuse (%)			
Paralysie radiale	0	2 (4)	
Dévascularisation	0	1 (2)	
Autre	0	2 (4)	
Facteurs de risque			
Tabagisme (%)	3 (33)	23 (44)	0,72*
Ethylisme (%)	0	2 (4)	1*
Diabète (%)	1 (11)	3 (6)	0,42*
AINS ou immunomodulateurs (%)	0	0	
IMC moyen (Ecart-type)	26,8 (5,34)	26,4 (5,8)	0,51†
Score ASA (%)			0,08*
1	2 (22)	19 (36)	
2	5 (56)	32 (62)	
3	2 (22)	1 (2)	
Score NUSS (%)			<0,001*
<25	9 (100)	21 (40)	
25-50	0	31 (60)	
>50	0	0	

† Test de Mann-Whitney, * Test exact de Fisher

Facteurs de risque

Dans notre cohorte, 26 (43%) patients étaient fumeurs et 2 (3%) étaient éthyliques chroniques. Il y avait 4 (7%) patients diabétiques (de type 1 ou 2). L'IMC moyen était de 26,4kg/m² (ET=5,73).

Aucun patient ne prenait de traitement immunomodulateur ou d'AINS au long cours. Vingt-et-un (34%) patients avaient un score ASA égal à 1, 37 (61%) avaient un score ASA égal à 2 et 3 (5%) patients avaient un score ASA égal à 3.

Il n'y avait aucune différence sur les facteurs de risque présents dans les sous-groupes de traitement initial orthopédique ou chirurgical.

Fracture initiale

La série était composée de 61 fractures de la diaphyse humérale, avec une prédominance des types A (43%) et B (43%) de l'AO. Il n'y avait pas de différence sur le type AO entre les patients pris en charge initialement de façon orthopédique ou chirurgicale.

Parmi ces fractures, 10 étaient des fractures ouvertes dont 1 avec dévascularisation de membre (Gustilo 3C). Il y avait 4 atteintes nerveuses pré-opératoires dont 2 paralysies radiales et 2 paralysies du plexus brachial étendues. Tous ces patients ont initialement été opérés.

Technique de cure de la pseudarthrose

Parmi les patients initialement pris en charge par traitement orthopédique, 8 ont bénéficié d'une ostéosynthèse sans apport de greffe, et 1 patient a bénéficié d'un apport de matrice osseuse inerte. Tous les patients présentaient un score NUSS inférieur à 25.

En ce qui concerne les patients ayant bénéficié d'une ostéosynthèse en première intention, un changement d'ostéosynthèse en 1 temps avec autogreffe spongieuse a été réalisé pour 48 d'entre eux. Parmi ces patients, 21 avaient un score NUSS inférieur à 25 et 27 un score NUSS entre 26 et 50. Un patient a nécessité une reconstruction par fibula vascularisée en 1 temps en raison d'une large perte de substance osseuse.

Trois autres patients ont été pris en charge en 2 temps, avec reconstruction par greffe autologue cortico-spongieuse. Tous ces patients avaient un score NUSS compris entre 26 et 50.

Le score NUSS des patients initialement opérés était significativement plus élevé que celui des patients traités de façon orthopédique ($p<0,001$).

Résultat du traitement de la pseudarthrose

Dans le sous-groupe « traitement orthopédique », 7 patients ont acquis une consolidation radiographique. On note 2 échecs, chez des patients qui n'ont pas bénéficié de greffe. L'un a nécessité une reprise chirurgicale pour reprise du montage d'ostéosynthèse et apport d'autogreffe iliaque, le second n'a pas été réopéré et la pseudarthrose est tolérée.

Dans le sous-groupe « reprise chirurgicale en 1 temps », on note 45 consolidations radiographiques au dernier recul et 4 échecs. Parmi les échecs du traitement, 2 ont nécessité une nouvelle reprise chirurgicale, avec changement du montage d'ostéosynthèse et greffon iliaque pour l'un, et reconstruction par fibula vascularisée pour l'autre, et 2 n'ont pas été réopérés (*Figure 6*).

Dans le sous-groupe « reprise chirurgicale en 2 temps », tous les patients ont acquis une consolidation radiographique.

Sur l'ensemble de la cohorte, un seul patient a présenté une complication à type de paralysie radiale, qui a spontanément récupéré dans un délai de 3 mois. (*Figure 6*)

Sur l'ensemble de la cohorte, 90% des patients ont donc acquis une consolidation.

Sur les 61 patients de la cohorte, 6 ont été traités selon une stratégie qui ne correspondait pas à celle présentée dans notre arbre décisionnel. La consolidation a été obtenue pour seulement 3 d'entre eux. Le taux de consolidation était statistiquement plus élevé parmi les patients traités selon notre arbre décisionnel que ceux traités selon une autre stratégie (95% vs 50 ; $p<0,01$).

FIGURE 6 : Échecs de la prise en charge

Échecs de cure de pseudarthrose						
Patient	Traitement initial	Prélèvement pré-op	Traitement chirurgical	Prélèvement per-op	Autre	Devenir
1	Orthopédique	n/a	Clou centromédullaire	Stérile		Abstention thérapeutique
2	Orthopédique	n/a	Clou centromédullaire	Stérile		Reprise chirurgicale
3	Plaque	Ponction stérile	Plaque x2 + greffe	Stérile	Psychose chronique	Abstention thérapeutique
4	Plaque	n/a	Ajout de greffe	Stérile	Plaque laissée en place	Reprise chirurgicale
5	Fixateur externe	n/a	Clou centromédullaire	C. Acnes		Abstention thérapeutique
6	Plaque	n/a	Plaque + greffe	Stérile		Reprise chirurgicale

Choix des méthodes d'ostéosynthèse

Pour les patients du sous-groupe « traitement orthopédique », l'ostéosynthèse a consisté en un enclouage centromédullaire pour 4 patients, une ostéosynthèse par plaque pour 3 patients et par double plaque pour 2 patients. Les échecs concernaient des patients traités par clou.

Pour les patients du sous-groupe « reprise chirurgicale en 1 temps », il y avait 6 enclouages centromédullaires, 16 ostéosynthèses par plaque, 1 ostéosynthèse par plaque et clou, 20 ostéosynthèses par double plaque. Les échecs ont concerné 1 patient traité par plaque, 1 patient traité par clou et 1 patient traité par double plaque. Pour 1 patient, la plaque d'ostéosynthèse initiale a été laissée en place et la cure de pseudarthrose a uniquement consisté en un ajout de greffe, et cette dernière ayant nécessité une reprise chirurgicale. (Figure 6).

Pour les patients du sous-groupe « reprise chirurgicale en 2 temps », l'ostéosynthèse a été réalisée par 2 plaques pour tous les patients.

Résultats des prélèvements bactériologiques

Nous disposons des résultats bactériologiques de prélèvements per-opératoires pour 45 patients. Parmi eux, 11 étaient positifs. Le germe le plus représenté était le *Cutibacterium acnes*, présent dans 5 des prélèvements positifs, suivi par les *Staphylococcus spp* dans 2 cas et des bacilles gram négatif dans 3 cas, et 1 cas positif à *Staphylococcus ssp + Cutibacterium acnes*. (Figure 7).

Tous les patients chez qui un germe a été retrouvé en per-opératoire sauf un ont abouti à une consolidation radiographique. Il s'agissait à chaque fois de cure de pseudarthrose survenue dans un contexte de traitement initial chirurgical, réalisée en 1 temps.

Un patient avait bénéficié d'une ponction scannoguidée avant la cure de pseudarthrose qui s'était révélée négative.

Trois patients ont bénéficié d'une ponction scannoguidée ou biopsie chirurgicale pré-opératoire retrouvant un *Cutibacterium acnes*. Ils ont été pris en charge en 2 temps, et les prélèvements per-opératoires du second temps étaient négatifs.

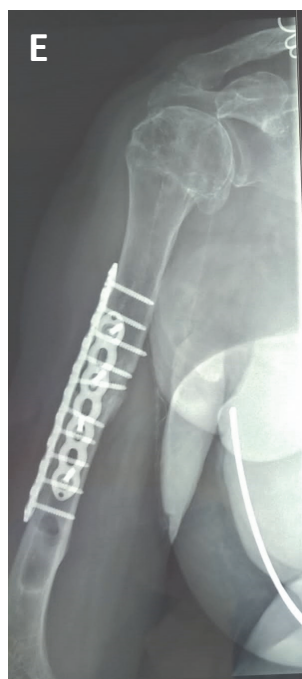
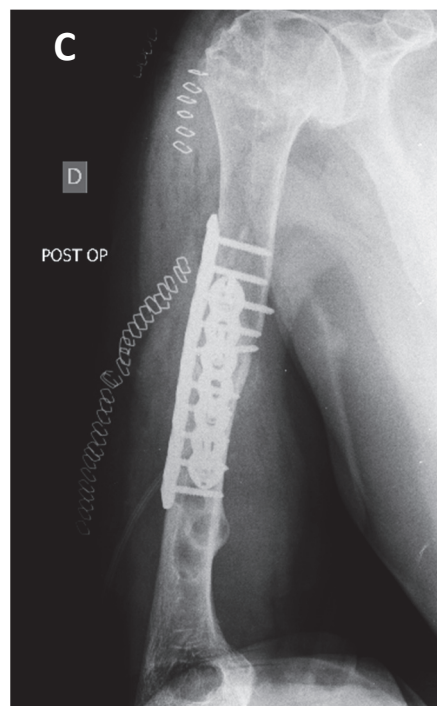
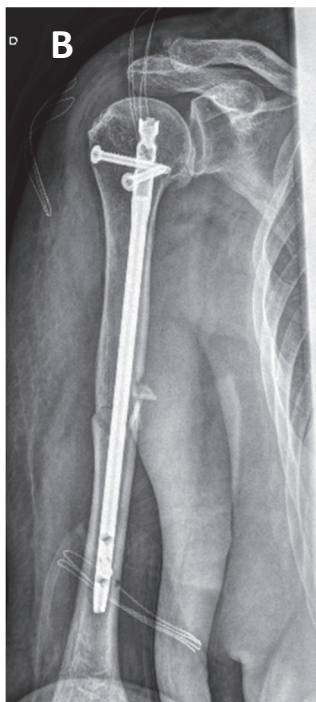
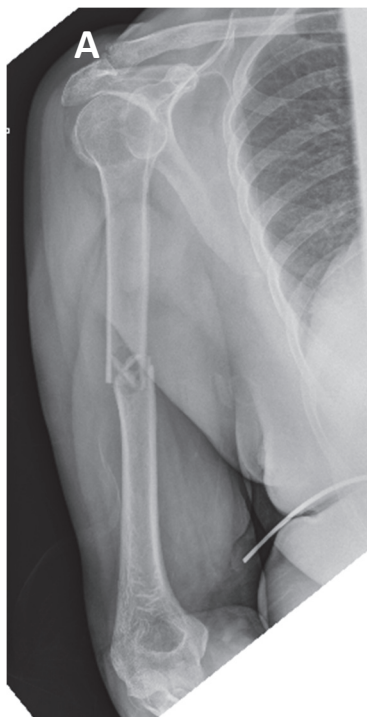
FIGURE 7 : Description des prélèvements bactériologiques pré et per-opératoires

BACTERIOLOGIE			
Prélèvements pré-opératoires	Stratégie chirurgicale	Prélèvements per-opératoires	Consolidation
Stérile	1 temps	Bacille gram négatif	Oui
N/A	1 temps	<i>Staphylococcus</i> spp	Oui
<i>C. Acnes</i>	2 temps	Stérile	Oui
N/A	1 temps	Bacille gram négatif	Oui
N/A	1 temps	Bacille gram négatif	Oui
N/A	1 temps	<i>C. Acnes</i>	Oui
N/A	1 temps	<i>Staphylococcus</i> spp	Oui
N/A	1 temps	<i>C. Acnes</i>	Oui
<i>C. Acnes</i>	2 temps	Stérile	Oui
N/A	1 temps	<i>C. Acnes</i>	Oui
<i>C. Acnes</i>	2 temps	Stérile	Oui
N/A	1 temps	<i>C. Acnes</i> + <i>Staphylococcus</i> spp	Oui
N/A	1 temps	<i>C. Acnes</i>	Oui
N/A	1 temps	<i>C. Acnes</i>	Non

Exemples de cas

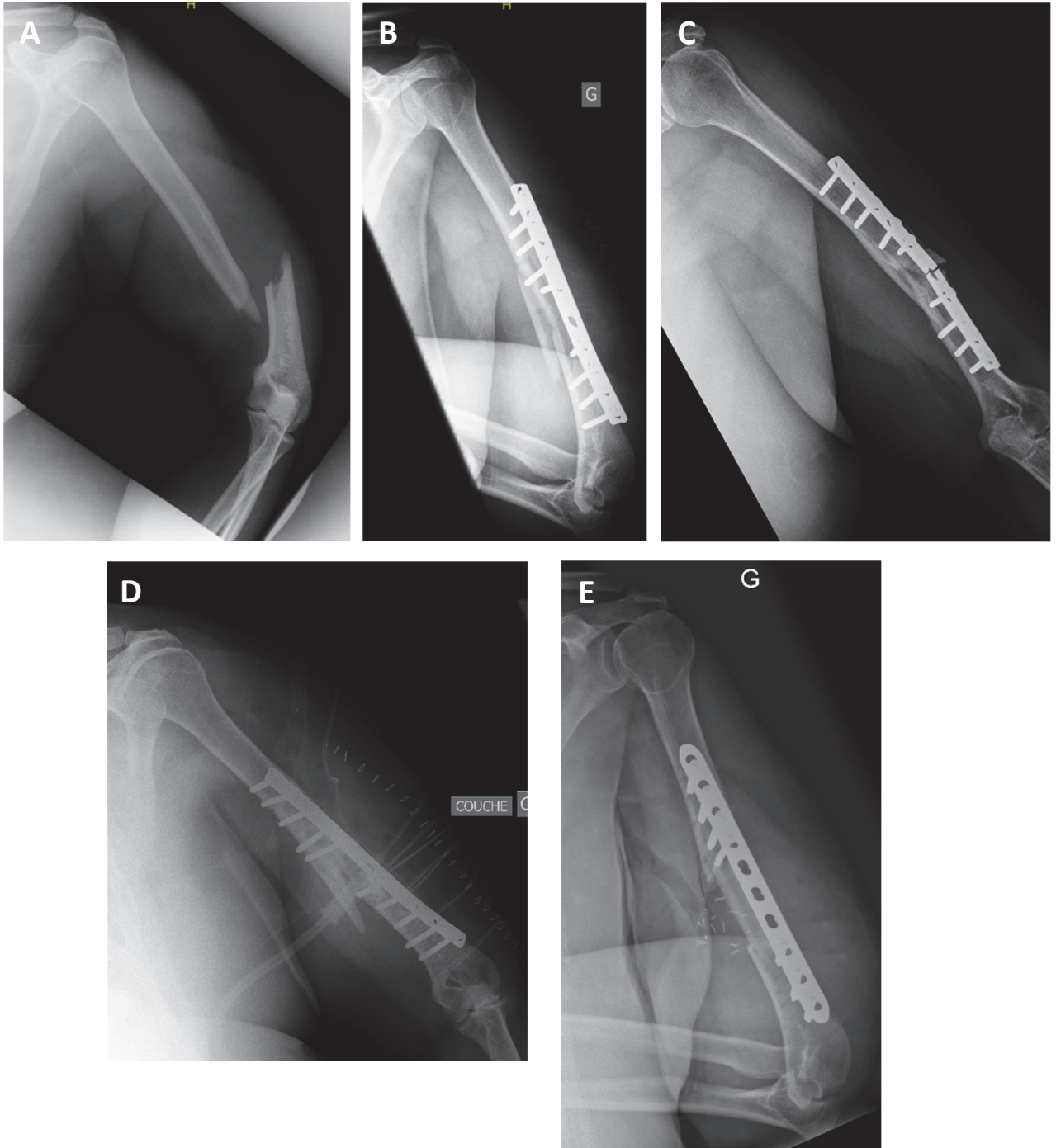
CAS N°1

Femme de 67 ans victime d'une fracture type A2 [A], prise en charge initiale chirurgicale par enclouage centromédullaire verrouillé [B], prélèvements scanno-guidés négatifs, reprise pour ostéosynthèse par double plaque et greffe autologue spongieuse [C]. Résultat clinique à 6 semaines [D] et radiographique à 4 mois [E].



CAS N°2

Homme de 47 ans victime d'une fracture type A2 [A], prise en charge initiale chirurgicale avec ostéosynthèse par plaque [B], pseudarthrose avec faillite du matériel [C], cure de pseudarthrose avec changement de plaque et greffe autologue spongieuse [D], échec et reprise avec reconstruction par lambeau libre de fibula vascularisée [E].



DISCUSSION

Les principes du traitement des pseudarthroses sont symbolisés par le *diamond concept* introduit par Giannoudis et al., qui associe la stabilité mécanique de l'ostéosynthèse, l'apport d'une matrice ostéoconductive, de cellules ostéogéniques et de médiateurs ostéoinducteurs, à travers une vascularisation efficace⁵³. Sur le plan chirurgical, ces principes se traduisent par un abord du foyer de pseudarthrose, un débridement, une ostéosynthèse et un apport de cellules ostéogéniques et de leur substrat par une greffe⁵⁴. Cependant, plusieurs auteurs ont publié des travaux sur des prises en charge sans greffe osseuse ou changement d'ostéosynthèse^{27,58}.

Notre travail présente plusieurs limites : il s'agit d'une cohorte rétrospective, non comparative. Les profils des patients et les techniques chirurgicales sont hétérogènes, ce qui a pour conséquence des sous-groupes de faible effectif, cela ne permettant pas la réalisation de statistiques fiables pour identifier des facteurs de risque d'un échec de prise en charge. Cette étude présente néanmoins des points forts : notre pratique est celle d'un *trauma center* de niveau 1⁺⁺⁺, exposé à un grand nombre de fractures de la diaphyse de l'humérus et donc de pseudarthroses. A notre connaissance, il s'agit d'une des plus grandes séries parmi la littérature publiée, avec un recul important. Le nombre de perdus de vue est faible, et nous avons peu de données manquantes.

Le taux de consolidation de notre cohorte est satisfaisant et conforme aux données de la littérature^{40,64}. L'arbre décisionnel que nous présentons à la Figure 1 semble fiable et reproductible. En effet, en prenant en compte la stratégie opératoire utilisée dans la cohorte, nous obtenons un taux de consolidation de 95%.

Parmi les échecs, 2 patients ont été traités selon une stratégie différente de notre protocole. Une patiente a été traitée malgré une pathologie psychiatrique qui aurait dû faire redouter une mauvaise compliance, 2 patients ont été traités par enclouage sans greffe, et 1 patient a été considéré comme non infecté après une ponction revenue stérile, mais les prélèvements per-opératoires se sont révélés positifs.

⁺⁺⁺ Selon les critères de l'American Trauma Society (amtrauma.org)

L'analyse des échecs et des résultats bactériologiques nous permet d'évoquer plusieurs hypothèses : le traitement des pseudarthroses sans recours à une greffe semble grevé d'un taux d'échec supérieur, d'autant plus si l'on choisit de réaliser un enclouage centromédullaire à foyer fermé qui ne permet ni l'utilisation d'un éventuel cal hypertrophique comme greffon, ni une décortication satisfaisante du foyer.

Le *gold standard* semble être la réalisation d'une décortication du foyer de pseudarthrose puis l'ostéosynthèse rigide associée à un apport de greffe osseuse autologue. Cette technique montre de bons résultats sur le plan de la consolidation^{40,47,50,64,70}. La greffe est majoritairement prélevée au niveau de la crête iliaque mais des techniques comme le RIATM ont fait la preuve de leur efficacité dans d'autres localisations³⁵. Le score NUSS peut être une aide à la décision, surtout pour les patients avec un score faible, ce qui correspond aux patients non comorbides traités de façon orthopédique. En revanche, un grand nombre de patients de notre cohorte ont un score moyen, ce qui n'apporte aucune aide à la stratégie chirurgicale.

Le choix du moyen d'ostéosynthèse reste un débat non résolu^{1,43,64} et notre travail a montré une consolidation acquise avec des méthodes d'ostéosynthèse différentes. L'utilisation de plaques semble supérieure pour certains auteurs^{45,61}, mais Foster et al. ont publié une série avec un taux de consolidation supérieur (100% versus 80%) avec l'utilisation de 2 plaques plutôt qu'une²⁵.

Murray et al. ont depuis longtemps démontré la stabilité mécanique d'un montage avec deux plaques en compression placées à 90°⁵⁶, et Karakasli a publié un travail biomécanique démontrant la supériorité d'un montage à 2 plaques sur un montage à une seule plaque dans les contraintes en flexion et en torsion, qui sont prédominantes à l'humérus^{37,76}. Dans ce travail, une plaque LCP 8 trous était associée à des plaques LCP 4, 6 et 8 trous. Ce dernier montage présentait une rigidité axiale supérieure aux autres³⁷, mais ceci peut compromettre la consolidation et aboutir à un *stress-shielding* et une faillite du matériel⁸¹. L'utilisation de vis verrouillées peut être un atout pour l'ostéosynthèse chez les patients ostéoporotiques²⁰, mais O'Toole et al. n'ont pas montré de différence biomécanique entre les plaques LCP et DCP sur des fractures humérales. Par ailleurs, d'autres auteurs ont mis en évidence qu'un montage verrouillé offre une rigidité supérieure en compression axiale mais pas en torsion²⁴.

Le nombre de vis est un paramètre important de la stabilité de la plaque sur l'os et du montage en général. Walker et al. recommandent 4 vis bicorticales de part et d'autres du foyer de

fracture⁷⁸. Les travaux de Stoffel et al. montrent qu'au-delà, ajouter des vis n'augmente guère la stabilité⁷⁴. En revanche, écarter d'un trou la première vis la plus proche du foyer double la flexibilité en torsion du montage⁷⁴.

Dans le cas d'un enclouage centromédullaire, Hoffman et al. ont montré que la stabilité et la rigidité du montage augmentent avec le nombre de vis de verrouillage et l'écart entre celles-ci³⁴. L'utilisation de vis dans des plans différents n'a pas d'effet sur la rigidité mais neutralise les mouvements de rotation³⁴. L'écart inter-fragmentaire doit être réduit au maximum, Drosos et al. ayant montré que dans le cas d'un enclouage tibial, un écart de plus de 3mm augmente significativement le délai de consolidation¹⁷.

En cas de pseudarthrose septique avérée, une stratégie en 2 temps semble préférable, pouvant faire appel à des techniques de reconstruction de la perte de substance osseuse²³.

Par ailleurs, la mise en évidence fréquente du *Cutibacterium acnes*, germe à croissance lente et à la présentation clinique fruste⁴⁶, doit faire redouter une origine infectieuse et faire pratiquer et répéter les examens au moindre doute. Les prélèvements bactériologiques per-opératoires sont dès lors indispensables.

Notre critère de jugement principal est un critère radiographique, puisque la guérison de la pseudarthrose est définie par sa consolidation osseuse⁵⁴. Egol et al. ont montré que le résultat clinique des pseudarthroses est corrélé à la consolidation¹⁹, mais la qualité de vie des patients n'a pas été évaluée au cours de ce travail. Cette évaluation peut faire l'objet d'un second travail afin d'affiner les indications de reprise chirurgicale en fonction des symptômes des patients et de leurs attentes.

CONCLUSION

Les pseudarthroses de la diaphyse humérale sont fréquentes, quel que soit le traitement initial de la fracture. La stratégie de prise en charge n'est pas clairement définie par la littérature existante en raison d'un grand nombre de possibilités chirurgicales. Ce travail a pour but d'établir un algorithme de prise en charge, basé sur les 2 causes principales de pseudarthroses que sont la faillite de l'ostéosynthèse et l'infection. Afin de valider notre stratégie, nous avons analysé une large cohorte de patients traités selon ce processus décisionnel. Le taux de consolidation radiographique au dernier recul est de 90%, et les complications sont rares, ce qui nous permet de considérer cette stratégie comme efficace. La prise en charge des pseudarthroses de la diaphyse humérale est une chirurgie complexe qui doit être réalisée au sein d'une équipe spécialisée, et qui doit débiter par la recherche d'une cause infectieuse ou mécanique. Par la suite, une reprise d'ostéosynthèse avec greffe permettra de traiter les pseudarthroses d'origine mécanique. Les pseudarthroses d'origine septique devront être traitées en deux temps, en collaboration avec une équipe d'inféctiologie. Enfin, la stratégie de prise en charge doit s'appuyer sur la demande fonctionnelle du patient puisque la balance bénéfice-risque d'une reprise chirurgicale doit être évaluée, bien que la consolidation d'une pseudarthrose soit associée à une diminution des douleurs et de meilleurs scores fonctionnels. Cette composante n'a pas été analysée dans notre étude et pourra faire l'objet d'un second travail.

RÉFÉRENCES

1. Allende C, Vanoli F, Gentile L, Gutierrez N. Minimally invasive plate osteosynthesis in humerus nonunion after intramedullary nailing. *Int Orthop*. 2018;42(11):2685–2689. doi:10.1007/s00264-018-3911-1
2. Andersen C, Wragg NM, Shariatzadeh M, Wilson SL. The Use of Platelet-Rich Plasma (PRP) for the Management of Non-union Fractures. *Curr Osteoporos Rep* [Internet]. 2021 Jan 4 [cited 2021 Feb 16]; Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11914-020-00643-x> xdoi:10.1007/s11914-020-00643-x
3. Andrzejowski P, Giannoudis PV. The ‘diamond concept’ for long bone non-union management. *J Orthop Traumatol*. 2019 Dec;20(1):21. doi:10.1186/s10195-019-0528-0
4. Atalar AC, Kocaoglu M, Demirhan M, Bilsel K, Eralp L. Comparison of three different treatment modalities in the management of humeral shaft nonunions (plates, unilateral, and circular external fixators). *J Orthop Trauma*. 2008 Apr;22(4):248–257. doi:10.1097/BOT.0b013e31816c7b89
5. van Basten Batenburg M, Houben IB, Blokhuis TJ. The Non-Union Scoring System: an interobserver reliability study. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2019 Feb;45(1):13–19. doi:10.1007/s00068-017-0796-4
6. Bercik MJ, Tjoumakaris FP, Pepe M, Tucker B, Axelrad A, Ong A, et al. Humerus Fractures at a Regional Trauma Center: An Epidemiologic Study. *Orthopedics*. 2013 Jul 1;36(7):e891–e897. doi:10.3928/01477447-20130624-19
7. Bhandari M, Guyatt GH, Swiontkowski MF, Tornetta P, Sprague S, Schemitsch EH. A lack of consensus in the assessment of fracture healing among orthopaedic surgeons. *J Orthop Trauma*. 2002 Sep;16(8):562–566. doi:10.1097/00005131-200209000-00004
8. Brilhault J, Favard L. Traitement chirurgical des pseudarthroses diaphysaires aseptiques. *EMC - Techniques chirurgicales - Orthopédie - Traumatologie*. 2006 Jan;1(1):1–23. doi:10.1016/S0246-0467(05)38834-9
9. Buckley RE, Moran CG, Apivatthakakul T, AO Foundation. AO principles of fracture management [Internet]. 2017 [cited 2021 Feb 14]. Available from: <https://doi.org/10.1055/b-006-149767>
10. Cadet ER, Yin B, Schulz B, Ahmad CS, Rosenwasser MP. Proximal humerus and humeral shaft nonunions. *J Am Acad Orthop Surg*. 2013 Sep;21(9):538–547. doi:10.5435/JAAOS-21-09-538

11. Calori GM, Colombo M, Mazza EL, Mazzola S, Malagoli E, Marelli N, et al. Validation of the Non-Union Scoring System in 300 long bone non-unions. *Injury*. 2014 Dec;45:S93–S97. doi:10.1016/j.injury.2014.10.030
12. Calori GM, Phillips M, Jeetle S, Tagliabue L, Giannoudis PV. Classification of non-union: need for a new scoring system? *Injury*. 2008 Sep;39 Suppl 2:S59-63. doi:10.1016/S0020-1383(08)70016-0
13. Cierny G, Mader JT, Penninck JJ. The Classic: A Clinical Staging System for Adult Osteomyelitis: *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2003 Sep;414:7–24. doi:10.1097/01.blo.0000088564.81746.62
14. Claes LE, Heigele CA. Magnitudes of local stress and strain along bony surfaces predict the course and type of fracture healing. *Journal of Biomechanics*. 1999 Mar;32(3):255–266. doi:10.1016/S0021-9290(98)00153-5
15. Ding L, He Z, Xiao H, Chai L, Xue F. Factors affecting the incidence of aseptic nonunion after surgical fixation of humeral diaphyseal fracture. *J Orthop Sci*. 2014 Nov;19(6):973–977. doi:10.1007/s00776-014-0640-1
16. Doyle DJ, Goyal A, Bansal P, Garmon EH. American Society of Anesthesiologists Classification [Internet]. In: StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2020 [cited 2021 Feb 14]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK441940/>
17. Drosos GI, Bishay M, Karnezis IA, Alegakis AK. Factors affecting fracture healing after intramedullary nailing of the tibial diaphysis for closed and grade I open fractures. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 2006 Feb;88-B(2):227–231. doi:10.1302/0301-620X.88B2.16456
18. Ebrahim S, Mollon B, Bance S, Busse J, Bhandari M. Low-intensity pulsed ultrasonography versus electrical stimulation for fracture healing: a systematic review and network meta-analysis. *Can J Surg*. 2014 Jun 1;57(3):E105–E118. doi:10.1503/cjs.010113
19. Egol KA, Gruson K, Spitzer AB, Walsh M, Tejwani NC. Do Successful Surgical Results after Operative Treatment of Long-bone Nonunions Correlate with Outcomes? *Clinical Orthopaedics & Related Research*. 2009 Nov;467(11):2979–2985. doi:10.1007/s11999-009-0883-x
20. Egol KA, Kubiak EN, Fulkerson E, Kummer FJ, Koval KJ. Biomechanics of locked plates and screws. *J Orthop Trauma*. 2004 Sep;18(8):488–493. doi:10.1097/00005131-200409000-00003

21. Ekholm R, Adami J, Tidermark J, Hansson K, Törnkvist H, Ponzer S. Fractures of the shaft of the humerus. An epidemiological study of 401 fractures. *J Bone Joint Surg Br.* 2006 Nov;88(11):1469–1473. doi:10.1302/0301-620X.88B11.17634
22. Feng D, Wang X, Sun L, Cai X, Zhang K, Wang Z, et al. Double plating with autogenous bone grafting as a salvage procedure for recalcitrant humeral shaft nonunion. *BMC Musculoskelet Disord.* 2020 Dec;21(1):769. doi:10.1186/s12891-020-03743-y
23. Ferreira N, Marais LC, Serfontein C. Two stage reconstruction of septic non-union of the humerus with the use of circular external fixation. *Injury.* 2016 Aug;47(8):1713–1718. doi:10.1016/j.injury.2016.06.014
24. Fitzpatrick DC, Doornink J, Madey SM, Bottlang M. Relative stability of conventional and locked plating fixation in a model of the osteoporotic femoral diaphysis. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2009 Feb;24(2):203–209. doi:10.1016/j.clinbiomech.2008.11.002
25. Foster RJ, Dixon GL, Bach AW, Appleyard RW, Green TM. Internal fixation of fractures and non-unions of the humeral shaft. Indications and results in a multi-center study. *J Bone Joint Surg Am.* 1985 Jul;67(6):857–864.
26. Garnavos C. Treatment of aseptic non-union after intramedullary nailing without removal of the nail. *Injury.* 2017 Jun;48:S76–S81. doi:10.1016/j.injury.2017.04.022
27. Garnavos C, Mouzopoulos G, Morakis E. Fixed intramedullary nailing and percutaneous autologous concentrated bone-marrow grafting can promote bone healing in humeral-shaft fractures with delayed union. *Injury.* 2010 Jun;41(6):563–567. doi:10.1016/j.injury.2009.08.003
28. Giannoudis PV, Einhorn TA, Marsh D. Fracture healing: The diamond concept. *Injury.* 2007 Sep;38:S3–S6. doi:10.1016/S0020-1383(08)70003-2
29. Gopisankar G, Justin ASV, Nithyananth M, Cherian VM, Lee VN. Non-vascularised fibular graft as an intramedullary strut for infected non-union of the humerus. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2011 Dec;19(3):341–345. doi:10.1177/230949901101900316
30. Gustilo RB, Merkow RL, Templeman D. The management of open fractures. *J Bone Joint Surg Am.* 1990 Feb;72(2):299–304.
31. Hak DJ, Fitzpatrick D, Bishop JA, Marsh JL, Tilp S, Schnettler R, et al. Delayed union and nonunions: Epidemiology, clinical issues, and financial aspects. *Injury.* 2014 Jun;45:S3–S7. doi:10.1016/j.injury.2014.04.002
32. Healy WL, White GM, Mick CA, Brooker AF, Weiland AJ. Nonunion of the humeral shaft. *Clin Orthop Relat Res.* 1987 Jun;(219):206–213.

33. Hierholzer C, Sama D, Toro JB, Peterson M, Helfet DL. Plate fixation of ununited humeral shaft fractures: effect of type of bone graft on healing. *J Bone Joint Surg Am*. 2006 Jul;88(7):1442–1447. doi:10.2106/JBJS.E.00332
34. Hoffmann S, Gerber C, von Oldenburg G, Kessler M, Stephan D, Augat P. Effect of angular stability and other locking parameters on the mechanical performance of intramedullary nails. *Biomed Tech (Berl)*. 2015 Apr;60(2):157–164. doi:10.1515/bmt-2014-0100
35. Kanakaris NK, Morell D, Gudipati S, Britten S, Giannoudis PV. Reaming Irrigator Aspirator system: early experience of its multipurpose use. *Injury*. 2011 Sep;42 Suppl 4:S28-34. doi:10.1016/S0020-1383(11)70009-2
36. Kanakaris NK, Tosounidis TH, Giannoudis PV. Surgical management of infected non-unions: An update. *Injury*. 2015 Nov;46:S25–S32. doi:10.1016/j.injury.2015.08.009
37. Karakasli A, Basci O, Ertem F, Sekik E, Havitcioglu H. Dual plating for fixation of humeral shaft fractures: A mechanical comparison of various combinations of plate lengths. *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica*. 2016 Aug;50(4):432–436. doi:10.1016/j.aott.2016.07.002
38. King AR, Moran SL, Steinmann SP. Humeral nonunion. *Hand Clin*. 2007 Nov;23(4):449–456, vi. doi:10.1016/j.hcl.2007.09.003
39. Koh J, Tornetta P, Walker B, Jones C, Sharmaa T, Sems S, et al. What is the Real Rate of Radial Nerve Injury After Humeral Nonunion Surgery? *Journal of Orthopaedic Trauma* [Internet]. 2020 Jun 17 [cited 2021 Feb 15];Publish Ahead of Print. Available from: <https://journals.lww.com/10.1097/BOT.0000000000001755>doi:10.1097/BOT.0000000000001755
40. Kontakis GM, Tosounidis T, Pagkalos J. Humeral diaphyseal aseptic non-unions: an Algorithm of management. *Injury*. 2007 May;38 Suppl 2:S39-49. doi:10.1016/s0020-1383(07)80008-8
41. Kumar A, Sadiq S. Non-union of the humeral shaft treated by internal fixation. *International Orthopaedics (SICOT)*. 2002 Aug 1;26(4):214–216. doi:10.1007/s00264-002-0354-4
42. Lasanianos NG, Kanakaris NK, Giannoudis PV. Current management of long bone large segmental defects. *Orthopaedics and Trauma*. 2010 Apr;24(2):149–163. doi:10.1016/j.mporth.2009.10.003
43. Leiblein M, Verboket R, Marzi I, Wagner N, Nau C. Nonunions of the humerus - Treatment concepts and results of the last five years. *Chin. J. Traumatol*. 2019 Aug;22(4):187–195. doi:10.1016/j.cjtee.2019.04.002

44. Lerner RK, Esterhai JL, Polomano RC, Cheatile MD, Heppenstall RB. Quality of life assessment of patients with posttraumatic fracture nonunion, chronic refractory osteomyelitis, and lower-extremity amputation. *Clin Orthop Relat Res*. 1993 Oct;(295):28–36.
45. Lin C-L, Fang C-K, Chiu F-Y, Chen C-M, Chen T-H. Revision With Dynamic Compression Plate and Cancellous Bone Graft for Aseptic Nonunion After Surgical Treatment of Humeral Shaft Fracture: The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care. 2009 Dec;67(6):1393–1396. doi:10.1097/TA.0b013e31818c1595
46. Lin ZX, Steed LL, Marculescu CE, Slone HS, Woolf SK. Cutibacterium acnes Infection in Orthopedics: Microbiology, Clinical Findings, Diagnostic Strategies, and Management. *Orthopedics*. 2020 Jan 1;43(1):52–61. doi:10.3928/01477447-20191213-02
47. Livani B, Belangero W, Medina G, Pimenta C, Zogaib R, Mongon M. Anterior plating as a surgical alternative in the treatment of humeral shaft non-union. *International Orthopaedics (SICOT)*. 2010 Oct;34(7):1025–1031. doi:10.1007/s00264-009-0863-5
48. Marongiu G, Dolci A, Verona M, Capone A. The biology and treatment of acute long-bones diaphyseal fractures: Overview of the current options for bone healing enhancement. *Bone Reports*. 2020 Jun;12:100249. doi:10.1016/j.bonr.2020.100249
49. Marsh JL, Slongo TF, Agel J, Broderick JS, Creevey W, DeCoster TA, et al. Fracture and Dislocation Classification Compendium - 2007: Orthopaedic Trauma Association Classification, Database and Outcomes Committee. *Journal of Orthopaedic Trauma*. 2007 Nov;21(Supplement):S1–S6. doi:10.1097/00005131-200711101-00001
50. Marti RK, Verheyen CCPM, Besselaar PP. Humeral shaft nonunion: evaluation of uniform surgical repair in fifty-one patients. *J Orthop Trauma*. 2002 Feb;16(2):108–115. doi:10.1097/00005131-200202000-00007
51. Micic ID, Dragoljub MI, Mitkovic MB, Borivoje MM, Mladenovic DS, Svetomir MD, et al. Treatment of the humeral shaft aseptic nonunion using plate or unilateral external fixator. *J Trauma*. 2008 May;64(5):1290–1296. doi:10.1097/TA.0b013e3180582471
52. Mills LA, Simpson AHRW. The relative incidence of fracture non-union in the Scottish population (5.17 million): a 5-year epidemiological study. *BMJ Open*. 2013;3(2):e002276. doi:10.1136/bmjopen-2012-002276
53. Miska M, Findeisen S, Tanner M, Biglari B, Studier-Fischer S, Grützner PA, et al. Treatment of nonunions in fractures of the humeral shaft according to the Diamond Concept. *Bone Joint J*. 2016 Jan;98-B(1):81–87. doi:10.1302/0301-620X.98B1.35682

54. Moghaddam A, Ermisch C, Schmidmaier G. Non-Union Current Treatment Concept. *Shafa Ortho J* [Internet]. 2016 Feb 20 [cited 2021 Mar 20];In Press(InPress). Available from: <http://shafaorthoj.com/en/articles/4546.html>doi:10.17795/soj-4546
55. Müller ME, Koch P, Nazarian S, Schatzker J. The Comprehensive Classification of Fractures of Long Bones [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1990 [cited 2021 Feb 14]. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61261-9>
56. Murray WR, Lucas DB, Inman VT. TREATMENT OF NON-UNION OF FRACTURES OF THE LONG BONES BY THE TWO-PLATE METHOD. *J Bone Joint Surg Am*. 1964 Jul;46:1027–1048.
57. Nicholson J, Makaram N, Simpson A, Keating J. Fracture nonunion in long bones: A literature review of risk factors and surgical management. *Injury*. 2020 Nov;S0020138320309554. doi:10.1016/j.injury.2020.11.029
58. Ollivier M, Gay AM, Cerlier A, Lunebourg A, Argenson JN, Parratte S. Can we achieve bone healing using the diamond concept without bone grafting for recalcitrant tibial nonunions? *Injury*. 2015 Jul;46(7):1383–1388. doi:10.1016/j.injury.2015.03.036
59. Otchwemah R, Moczek T, Marche B, Mattner F, Probst C, Tjardes T. High prevalence of bacteria in clinically aseptic non-unions of the tibia and the femur in tissue biopsies. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2020 Oct;46(5):1093–1097. doi:10.1007/s00068-018-1010-z
60. Özkan S, Nolte PA, van den Bekerom MPJ, Bloemers FW. Diagnosis and management of long-bone nonunions: a nationwide survey. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2019 Feb;45(1):3–11. doi:10.1007/s00068-018-0905-z
61. Padhye KP, Kulkarni VS, Kulkarni GS, Kulkarni MG, Kulkarni S, Kulkarni R, et al. Plating, nailing, external fixation, and fibular strut grafting for non-union of humeral shaft fractures. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2013 Dec;21(3):327–331. doi:10.1177/230949901302100313
62. Papasoulis E, Drosos GI, Ververidis AN, Verettas D-A. Functional bracing of humeral shaft fractures. A review of clinical studies. *Injury*. 2010 Jul;41(7):e21–e27. doi:10.1016/j.injury.2009.05.004
63. Perren SM. Evolution of the internal fixation of long bone fractures. The scientific basis of biological internal fixation: choosing a new balance between stability and biology. *J Bone Joint Surg Br*. 2002 Nov;84(8):1093–1110. doi:10.1302/0301-620x.84b8.13752
64. Peters RM, Claessen FMAP, Doornberg JN, Kolovich GP, Diercks RL, van den Bekerom MPJ. Union rate after operative treatment of humeral shaft nonunion--A systematic review. *Injury*. 2015 Dec;46(12):2314–2324. doi:10.1016/j.injury.2015.09.041

65. Pollon T, Reina N, Delclaux S, Bonneville P, Mansat P, Bonneville N. Persistent non-union of the humeral shaft treated by plating and autologous bone grafting. *International Orthopaedics (SICOT)*. 2017 Feb;41(2):367–373. doi:10.1007/s00264-016-3267-3
66. Prasarn ML, Achor T, Paul O, Lorch DG, Helfet DL. Management of nonunions of the proximal humeral diaphysis. *Injury*. 2010 Dec;41(12):1244–1248. doi:10.1016/j.injury.2010.04.002
67. Ramoutar DN, Rodrigues J, Quah C, Boulton C, Moran CG. Judet decortication and compression plate fixation of long bone non-union: Is bone graft necessary? *Injury*. 2011 Dec;42(12):1430–1434. doi:10.1016/j.injury.2011.03.045
68. Ring D, Perry BH, Jupiter JB. The Functional Outcome of Operative Treatment of Ununited Fractures of the Humeral Diaphysis in Older Patients*: *The Journal of Bone & Joint Surgery*. 1999 Feb;81(2):177–190. doi:10.2106/00004623-199902000-00005
69. Rondot T, Menu G, Loisel F, Sergent A-P, Leclerc G, Obert L. La technique de la membrane induite pour traiter les pertes de substance osseuses des os longs : évaluation rétrospective de la consolidation osseuse et des complications. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique*. 2017 Nov 1;103(7, Supplement):S56–S57. doi:10.1016/j.rcot.2017.09.081
70. Rubel IF, Kloen P, Campbell D, Schwartz M, Liew A, Myers E, et al. Open reduction and internal fixation of humeral nonunions : a biomechanical and clinical study. *J Bone Joint Surg Am*. 2002 Aug;84(8):1315–1322. doi:10.2106/00004623-200208000-00004
71. Sallemi S, Sahnoun N, Maatoug M, Trigui M, Zouch I, Keskes M, et al. Continuous external compression for the treatment of humeral pseudarthrosis: a single center experience. *Pan Afr Med J* [Internet]. 2020 Apr 8 [cited 2021 Feb 15];35. Available from: <http://www.panafrican-med-journal.com/content/article/35/105/full/doi:10.11604/pamj.2020.35.105.21533>
72. Schneble CA, Li DT, Kahan J, Brand J, Socci A, Haims A, et al. Reliability of Radiographic Union Scoring in Humeral Shaft Fractures. *J Orthop Trauma*. 2020 Dec 1;34(12):e437–e441. doi:10.1097/BOT.0000000000001811
73. Société Française d'Anesthésie-Réanimation. Antibioprophylaxie en chirurgie et médecine interventionnelle. (patients adultes) [Internet]. [cited 2021 Mar 29]. Available from: <https://sfar.org/mise-a-jour-de-la-rfe-antibioprophylaxie-2017/>
74. Stoffel K, Dieter U, Stachowiak G, Gächter A, Kuster MS. Biomechanical testing of the LCP-how can stability in locked internal fixators be controlled? *Injury*. 2003 Nov;34 Suppl 2:B11-19. doi:10.1016/j.injury.2003.09.021

75. Tytherleigh-Strong G, Walls N, McQueen MM. The epidemiology of humeral shaft fractures. *J Bone Joint Surg Br.* 1998 Mar;80(2):249–253. doi:10.1302/0301-620x.80b2.8113
76. Verbruggen JPAM, Sternstein W, Blum J, Rommens PM, Stapert JWJL. Compression-locked nailing of the humerus: a mechanical analysis. *Acta Orthop.* 2007 Feb;78(1):143–150. doi:10.1080/17453670610013556
77. Volgas DA, Stannard JP, Alonso JE. Nonunions of the humerus. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2004 Feb;(419):46–50. doi:10.1097/00003086-200402000-00008
78. Walker M, Palumbo B, Badman B, Brooks J, Van Gelderen J, Mighell M. Humeral shaft fractures: a review. *J Shoulder Elbow Surg.* 2011 Jul;20(5):833–844. doi:10.1016/j.jse.2010.11.030
79. Weber BG, Čech O. Pseudarthrosis: pathophysiology, biomechanics, therapy, results. Bern: H. Huber; 1976.
80. Westrick E, Hamilton B, Toogood P, Henley B, Firoozabadi R. Humeral shaft fractures: results of operative and non-operative treatment. *International Orthopaedics (SICOT).* 2017 Feb;41(2):385–395. doi:10.1007/s00264-016-3210-7
81. Woo SL, Akeson WH, Coutts RD, Rutherford L, Doty D, Jemmott GF, et al. A comparison of cortical bone atrophy secondary to fixation with plates with large differences in bending stiffness. *J Bone Joint Surg Am.* 1976 Mar;58(2):190–195.
82. Zappaterra T, Ghislandi X, Adam A, Huard S, Gindraux F, Gallinet D, et al. [Induced membrane technique for the reconstruction of bone defects in upper limb. A prospective single center study of nine cases]. *Chir Main.* 2011 Sep;30(4):255–263. doi:10.1016/j.main.2011.06.005

SERMENT D'HIPPOCRATE

Au moment d'être admis à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences.

Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré et méprisé si j'y manque.