

UNIVERSITE DE NANTES

FACULTE DE MEDECINE

Année 2011

N°

THESE

pour le

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE

Qualification en Neurochirurgie

par

Jean-Marie LOUPPE

né le 23 décembre 1980 à Quimper

Présentée et soutenue publiquement le

**Les neurotisations dans la réanimation du plexus brachial
traumatique: résultats au CHU de Nantes (2000-2010).**

Président: Monsieur le Professeur R. Robert

Directeur de Thèse: Monsieur le Professeur R. Robert

Jury: Monsieur le Professeur Nguyen

Monsieur le Professeur Péréon

Madame le Docteur Touchais

Monsieur le Docteur Le Noan

1-introduction	15
2-matériel et méthode	16
A- Population étudiée, critères d'inclusion et d'exclusion	16
B- Critères étudiés	19
C- Description des neurotisations étudiées	24
3-résultats	27
A- neurotisation spino-suprascapulaire (XI-SS) :	27
B- Neurotisation intercosto-musculocutanée (IC-MC) :	29
C- Autres techniques de neurotisation :	30
1° Neurotisation ulno-bicipitale (technique d'Oberlin):	30
2° Neurotisation spino-musculocutanée (XI-MC):	30
D- résultats fonctionnels, sociaux, facteurs influençant les résultats :	31
1° Résultats fonctionnels	31
2° Situation professionnelle	31
3° Douleurs	32
4° satisfaction générale	34
5° facteurs corrélés au résultat moteur.	35
4-Discussion	38
A-éléments anatomiques, évaluation des lésions et indication opératoire.	38
1° éléments d'anatomie du plexus brachial.	38
2° lésions anatomopathologiques rencontrées.	42
3° diagnostique pré-opératoire, per-opératoire et indication chirurgicale.	44
1-valeur prédictive des indices cliniques.	47
2-avulsions radiculaires en pré-opératoire: diagnostique et valeur prédictive.	50
3-électrophysiologie préopératoire.	54
4-diagnostic per-opératoire des lésions (valeur de l'aspect visuel, examen extemporané, électrophysiologie per-opératoire).	57
B-Analyse par secteur	63
B1- L'épaule	63
1° neurotisation spino-suprascapulaire (XI-SS)	70
2° greffe C5-suprascapulaire (C5-SS), neurotisation phrénique-suprascapulaire (phr-SS).	77
3° neurotisation isolée du nerf Axillaire.	77
4° utilisation du nerf hypoglosse dans la réanimation de l'épaule.	81
5° Arthrodèse d'épaule	82
6° réanimation combinée des nerfs Axillaire et accessoire.	85
B2- Le coude	89
1° greffe de C5 ou C6 sur le nerf musculo-cutané.	94
2° neurotisation ulno-bicipitale selon Oberlin.	97
3° neurotisation intercosto-musculocutanée.	100
4° utilisation du nerf phrénique	105
5° neurotisation spino-musculocutanée.	108

6° double transfert ulno-bicipital et pectoral ou médian-brachial.	110
C- les techniques complémentaires	113
1° neurotisation pour la main	113
2° transferts tendineux, musculaires et arthrodèses.	121
3° rééducation, réinsertion	130
D- douleurs plexiques	135
5-conclusion	146
Annexes	147
Bibliographie	148

1-introduction

La chirurgie du nerf périphérique est à la veille d'un tournant historique du fait du développement de l'ingénierie des bio-matériaux, de l'électronique et des progrès de la biologie neuronale.

La chirurgie du plexus brachial comme celle du nerf périphérique est longtemps restée mystérieuse et a fait l'objet de nombreuses recherches depuis les constatations de Galien sur les douleurs induites par les manipulations des nerfs jusqu'aux premières sutures radiculaire de Tornburn en 1898 [1, 2].

A partir de 1947 la création d'une école de chirurgie du nerf périphérique, avec Seddon [3, 4], va conduire à des développements importants, mais ce n'est qu'en 1972 que naît véritablement la chirurgie moderne du plexus brachial avec l'apparition du microscope opératoire et le développement de nombreux pôles d'excellences en Europe (Lausanne, Vienne, Londres, Paris, Montpellier), au Japon et aux USA (Université de Lousiane, Mayo-clinic).

L'école nantaise a été créée dans les années 70 à l'initiative des Pr Collet, Resche et Fève. Les travaux de recherche ont été repris par le Pr Robert et le Dr Lignon puis par les Dr Touchais et Le Noan au sein du laboratoire des Pr Guiheneuc puis Péréon.

En dépit d'un certain désenchantement général après les progrès initiaux, l'école nantaise, contrairement à d'autres centres, a constamment poursuivi ses travaux de recherche et est à même aujourd'hui, avec l'exigence de la preuve scientifique, d'établir un protocole de prise en charge thérapeutique tenant compte des nombreuses possibilités de traitement. Dans ce travail nous essayerons à la lumière des résultats nantais d'exposer les modalités de cette stratégie.

Les traumatismes du plexus brachial résultent d'accidents de haute cinétique et notamment en deux roues, représentent un coût humain et social important chez des gens souvent jeunes et actifs,. En dépit d'une meilleure survie, l'incidence des traumatismes du plexus brachial reste inchangé et la demande de prise en charge importante.

Contrairement aux données exprimées par un sondage mondial auprès de chirurgiens expérimentés du nerf périphérique montrant la diversité des prises en charge [5], l'école nantaise a développé de façon originale une stratégie de traitement multi-disciplinaire personnalisé (neurochirurgie, chirurgie de la main, neurophysiologie). Les possibilités de réinnervation musculaire et de correction bio-mécanique articulaire sont d'emblée discutées devant le patient. En cas d'intervention celle ci est réalisée à deux chirurgiens. Nous voulons évaluer ici l'efficacité d'une telle organisation .

Nous voulons également montrer en quoi l'analyse clinique et para clinique initiale permettent d'éviter un abord direct du plexus à visée exploratoire car la prédiction pré-opératoire des étages avulsés et la probabilité de récupération spontanée sont faibles.

Sur le plan chirurgical nous développerons peu le problème des greffes intraplexuelles adaptées aux lésions plexiques distales car nous leur préférons les neurotisations dont les résultats nous semblent plus constants. Ce travail est l'étude des enjeux, modalités et résultats des ces neurotisations.

2-matériel et méthode

A- Population étudiée, critères d'inclusion et d'exclusion

Nous centrerons donc notre étude sur les enjeux, modalités et résultats de la neurotisations. Celle-ci peut être définie comme la ré-innervation d'un organe terminal dénervé, qu'il soit moteur ou sensitif. On peut théoriquement distinguer cinq types de neurotisation mais seules les neurotisations neuroneuronales et neuromusculaires ont été utilisées dans le traitement des lésions du plexus brachial [6]. Nous étudierons uniquement les résultats des neurotisations neuroneuronales, qui sont pratiquées au CHU de Nantes. Elles consistent en pratique à dériver un nerf fonctionnel pour l'anastomoser sur la partie saine d'un nerf lésé proximale. Il convient donc de sélectionner un tronc donneur dont le sacrifice soit tolérable sur le plan fonctionnel, et de sélectionner un tronc receveur dont la réinnervation soit la plus efficace sur le plan biomécanique du membre supérieur.

Nous avons réalisé une étude rétrospective portant sur les neurotisations effectuées au CHU de Nantes entre 2000 et 2010. Une intervention sur le plexus brachial a été pratiquée chez 67 patients, dont 47 patients opérés pour lésion traumatique du plexus brachial. Les neurotisations ont été utilisées pour 33 d'entre eux, les 14 autres patients ont été traités par neurolyse ou greffe. 17 autres interventions sur le plexus brachial ont été réalisées incluant l'exérèse de lésions tumorales ou de chirurgie fonctionnelle.

Les patients ayant un recul postopératoire inférieur à 1 an ont été exclus de l'analyse (5 patients). Celle-ci a été faite par la revue des dossiers cliniques de consultation et les comptes-rendus opératoires. Pour tous les patients ayant un recul post-opératoire suffisant, une recherche de coordonnées a été effectuée (logiciel clinique du CHU, pages jaunes, mairies, préfectures, sécurité sociale, commissariat de police, état civil, Internet, facebook). Cette recherche a permis un entretien téléphonique dans 25 cas. 3 personnes n'ont pas pu être contactées en raison de multiples changements d'adresse, 1 personne ne s'est pas rendue à plusieurs rendez-vous fixés avec sa famille. 9 patients ont été examinés spécialement pour cette étude en raison d'un recul insuffisant ou d'une imprécision dans les dossiers du service. 26 patients ont été retenus pour analyse des résultats de neurotisation.

Il s'agissait de 26 hommes. La répartition des déficits initiaux est donnée en figure 1. On doit noter que parmi les patients considérés comme C5C6 et C5C6C7, 66% avaient un déficit initial partiel touchant les racines C8-T1, spontanément amélioré secondairement.

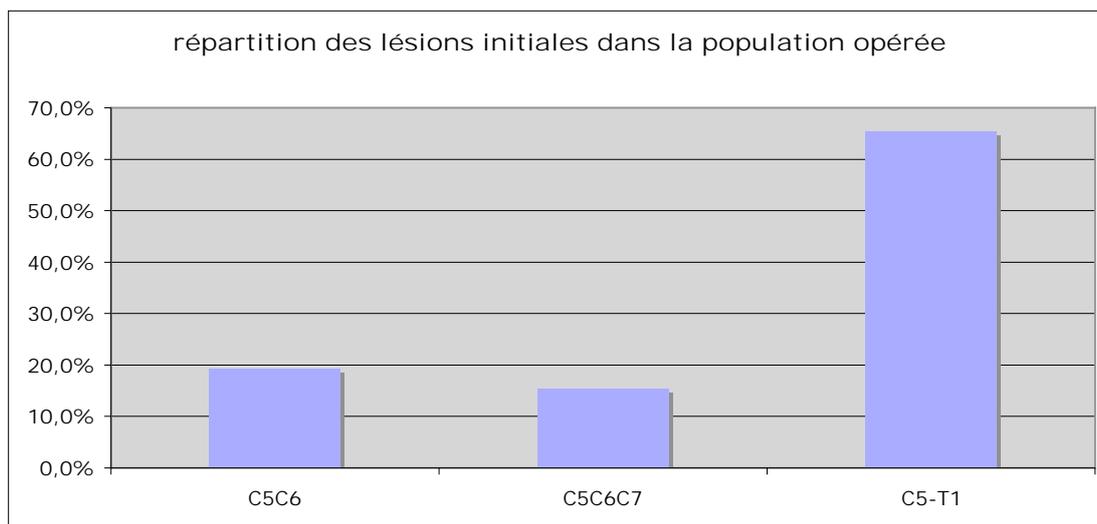


Figure 1 : répartition des lésions initiales

Les comptes-rendus opératoires n'ont pas permis de classer les lésions selon les classifications anatomopathologiques en vigueur, telles que les classifications de Sedel [7] ou de Terzis [8] (figure 2).

classification de Sedel modifiée

type I	avulsion 5 racines
type IIA	avulsion 4 racines + 1 rupture postganglionnaire
type IIB	avulsion 3 racines + 2 rupture postganglionnaires
type IIC	avulsion 2 racines + 3 rupture postganglionnaires
type IID	avulsion 1 racine + 4 ruptures postganglionnaires
type VA	rupture des 3 faisceaux (lat, med et post)
type VI	rupture des branches distales

classification de Terzis: score par racine (score total sur 25)

0 pts	avulsion
1 pts	rupture partielle avec avulsion partielle
2 pts	rupture
3 pts	rupture partielle avec neurapraxie partielle
4 pts	neurapraxie
5 pts	normal

Fig 2 : Classifications lésionnelles peropératoires du plexus brachial. (tiré de [91] et [8]).

Le traumatisme initial était un accident de 2 roues dans 76,9% des cas, piéton (3,8%), voiture (3,8%) ou accident de la voie publique non précisé (15,4%). On retrouvait des lésions associées significatives dans 38,4% des cas. Il existait un traumatisme crânien grave dans 15,4% des cas, et/ou une pseudarthrose significative du membre supérieur (3,8%), une lésion vasculaire axillaire ou sus-clavière (15,4%), une lésion rachidienne instable (11,5%). Le tableau 1 montre la probabilité de lésion plexique en fonction des lésions associées dans la littérature des années 90.

fréquence et gravité des lésions du plexus brachial (branches terminales comprises) en fonction des lésions associées ou des circonstances.

(d'après Narakas. LES PARALYSIES DU PLEXUS BRACHIAL, 2° ed, p54).

lésion ou circonstance	lésion nerveuse associée	lésion nerveuse grave (Sunderland IV-V)
fracture rachis cervical:	2,5%	1,5%
fracture articulaire/transverse/arc post côte C5/T2:	24,3%	18,9%
fracture de la scapula:	8,4%	5,0%
luxation acromioclaviculaire	0,9%	
luxation scapulo-humérale (sans fracture tubérosité)	16,0%	
luxation scapulo-humérale (avec fracture tubérosité)	14,8%	
fracture de clavicule	2,3%	
fracture humérale supérieure	6,6%	
contusion isolée de l'épaule	6,3%	4,1%
rupture de l'artère subclavière	100,0%	95,0%
fracas du membre supérieur	25,0%	15,6%
polytraumatisme avec atteinte de la ceinture scap	34,0%	21,0%
AVP cyclo avec trauma ceinture scap/mb sup	5,2%	3,3%
AVP non cyclo	1,3%	0,8%

Tableau 1 : lésions associées aux traumatismes du plexus brachial.

L'âge moyen au traumatisme est de 24,9 ans (9 à 43 ans). 6 patients (23,1%) avaient un âge inférieur à 18 ans lors du traumatisme. Le traumatisme touchait le membre dominant dans 41,7% des cas. Le délai moyen de consultation était de 3,8 mois (1 à 13,7). Le délai moyen de l'intervention était de 10,7 mois (4 à 27). Le recul moyen post-opératoire est de 88 mois (16-136). Des techniques de transfert tendineux ou d'arthrodèse ont été proposés dans 4 cas (15,3%) et réalisés dans 1 cas (3,8%), toujours secondairement.

Concernant les soins post-opératoires, le membre opéré était immobilisé durant 10 jours, puis la kinésithérapie était débutée à partir de la date d'ablation des fils. Les patients ont été rééduqués en centre de Médecine-physique-réadaptation pour 52,1%, uniquement par un kinésithérapeute libéral dans 47,8%. Un défaut dans la rééducation a été signalé dans les courriers de suivi (raideurs en particulier) dans 34,7% des cas. La technique du biofeedback a été appliquée dans 21,7% des cas. Le nombre hebdomadaire moyen déclaré de séances de kinésithérapie par les patients pendant les premières années post-opératoires est de 2,9.

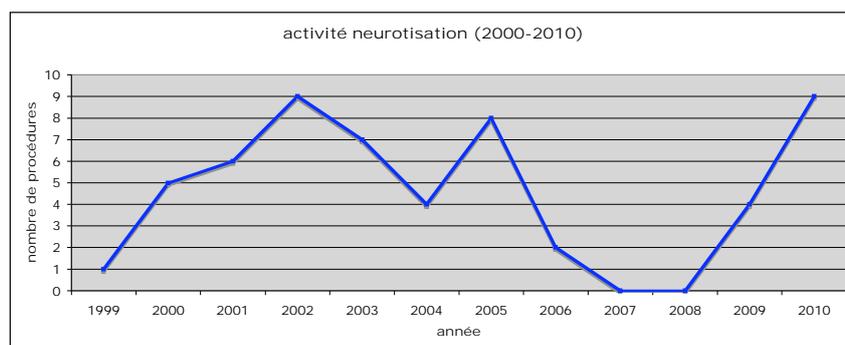


Figure 3 : répartition des neurotisations au CHU de Nantes dans le temps.

L'activité du CHU de Nantes, en terme de neurotisation (d'autres patients plexiques ont bénéficié de neurolyses ou de greffes du plexus brachial) est donnée en figure 3. Pour mémoire, un rapport de l'HAS de 2006 estime à 200-300 le nombre annuel d'interventions de réanimation nerveuse du plexus brachial en France.

B- Critères étudiés

Les critères étudiés étaient :

- motricité post-opératoire (selon la classification Médical Research Coucil).
- critères fonctionnels d'utilisation du membre supérieur (main-bouche, main-nuque, main-poitrine, utilisation de la pince thoraco-brachiale, utilisation de la pince brachio-antébrachiale, utilisation de la main, post d'une orthèse ou d'une écharpe).
- critères de douleur (intensité de la douleur préopératoire et actuelle, localisation)
- critères sociaux (quantification du handicap, revenus financiers)
- critères de satisfaction (jugez-vous votre intervention comme « bénéfique » ?) et de ressenti de la prise en charge (avez-vous jugé votre intervention comme « pénible » ?).

Dans un second temps, la corrélation entre le résultat post-opératoire et les variables suivantes ont été étudiés :

- délai de l'intervention (en mois)
- âge au traumatisme (années)
- nombre de séances hebdomadaires déclarées de kinésithérapie en post-opératoire
- dominance du côté de l'atteinte
- importance du déficit pré-opératoire (C5C6, C5C6C7, C5-T1)
- délai d'apparition des premiers signes de récupération (en mois post-traumatique)
- motricité post-opératoire du coude
- réinsertion professionnelle
- degré d'invalidité sécurité sociale
- douleur.

-bénéfice perçu de l'intervention.

L'analyse utilisait le logiciel PRISM® (Editeur : GraphPad). Chaque neurotisation a été considérée par approximation comme une intervention isolée et indépendante. Dans ce modèle de calcul, les données démographiques, de kinésithérapie, d'emploi et de douleur ont donc été reportées plusieurs fois (à chaque neurotisation du même sujet). L'analyse commençait par l'estimation de la normalité des distributions de ces variables (test de Kolmogorov-Smirnov).

Les paramètres suivants ont été considérés comme gaussien : âge ($p > 0,1$), délai de consultation ($p > 0,1$), délai de chirurgie ($p > 0,1$), délai de récupération post-traumatique ($p > 0,1$), taux d'invalidité ($p > 0,052$), EVA actuelle ($p > 0,1$).

Pour les distributions normales, la corrélation était estimée par le calcul de l'indice r de Pearson. Pour les distributions quelconques ou de faible effectif (neurotisations XI-SS et IC-MC), la corrélation était estimée par le calcul de l'indice r (non-paramétrique) de Spearman. Les tests étaient bilatéraux au seuil de 5%.

L'étude des résultats est basée sur la fonction motrice de l'épaule et du coude, sans étude de la fonction de la main qui n'est pas une cible thérapeutique de réanimation primaire au CHU de Nantes. La présence d'une sensibilité de protection de la main n'a donc pas été étudiée. Concernant la fonction de l'épaule, les données collectées n'ont pas permis d'établir de statistique exhaustive concernant la rotation externe, ni l'amplitude d'abduction. Il en est de même pour le coude et la fonction de supination du muscle biceps brachial. Ces paramètres sont donc exclus de l'analyse.

Enfin, Il est parfois difficile de juger de la fonction motrice liée à la neurotisation elle-même. En effet, nous avons des exemples d'abduction liée à la récupération spontanée du muscle deltoïde, probablement par effet de neurolyse pendant l'intervention. Il existe également des cas de compensation par d'autres groupes musculaires : antéflexion par la longue portion du muscle biceps brachial, flexion du coude par le muscle brachio-radial ou par les muscles épitrochléens (« effet Steindler »). Pour pouvoir nous comparer à la littérature mondiale qui ne s'embarrasse pas de ces considérations, nous considérons la fonction globale car les compensations relèvent de l'effet de neurolyse qui est lui aussi post-opératoire. Enfin, l'objectif pour le patient est une fonction globale sans préjuger de son origine. Une motricité du coude à M3 est définie comme un mouvement vertical contre l'action de la pesanteur, complet jusque 90° de flexion. Lorsque les patients sont capables de soulever un objet, même léger, la motricité est cotée M4. La motricité de l'épaule est elle particulièrement difficile à coter. Certains auteurs rapportent leurs résultats selon l'angle d'abduction et rotation externe, ce qui fiabilise les résultats présentés. Nous avons choisi de coter la force à M3 si le patient était capable d'effectuer une abduction à 45° contre la pesanteur. Ce choix correspond à la notion d'anatomie classique (dont nous verrons plus loin qu'elle est fautive) que le muscle supra-épineux est le «starter de l'abduction» dont l'action d'abduction s'exerce surtout jusqu'à 30° .

La classification établie par Kline au LSU (Louisiana State University) n'a pas pu être mise en œuvre. Celle-ci est donnée en figure 4 à titre informatif.

Grading system by element of brachial plexus

Grade	Description
overall grading	
0	no muscle contraction
1 (poor)	proximal muscles contract but not against gravity
2 (fair)	proximal muscles contract against gravity & distal muscles do not contract; sensory grade, if applicable, is usually ≤ 2
3 (moderate)	proximal muscles contract against gravity & some resistance; some distal muscles contract against gravity; sensory grade, if applicable, is usually 3
4 (good)	all muscles contract against gravity & some resistance; sensory grade, if applicable, is 3 or 4
5 (excellent)	all muscles contract against moderate resistance; sensory grade, if applicable, is 4
sensory grading*	
0 (absent)	no response to touch, pin, or pressure
1 (bad)	testing produces hyperesthesia or paresthesias; deep pain recovery in autonomous zones
2 (poor)	sensory response sufficient for grip and slow protection, sensory stimuli mislocalized w/ some overresponse
3 (moderate)	response to touch & pin in autonomous zones, sensation mislocalized and not normal, with overresponse
4 (good)	response to touch & pin in autonomous zones; response localized but not normal; however, there is no overresponse
5 (excellent)	normal response to touch & pin in entire field of plexus element including autonomous zones

* Where applicable such as at C-8, T-1, lower trunk, lateral cord, and medial cord.

Figure 4 : échelle du LSU (Louisiana State University Health Center) pour la cotation neurologique d'une lésion du plexus brachial. (tiré de [241]).

La classification de Mallet est également la référence pour évaluer les résultats de la réhabilitation dans les paralysies obstétricales. Elle n'a pas été utilisée ici, compte tenu de la population d'adultes, mais les items ont inspiré la rédaction des questions concernant les possibilités fonctionnelles des patients. Elle est donnée dans la figure 5, car elle montre les objectifs raisonnables dans le contexte de la pédiatrie. On doit préciser que les traumatismes des adultes sont autrement plus difficiles à traiter, correspondent à des lésions de haute cinétique dont les résultats sont très inférieurs.

Modified Mallet classification (Grade I = no function, Grade V = normal function)

	Not Testable	Grade I	Grade II	Grade III	Grade IV	Grade V
Global Abduction	Not Testable	No function	 <math>< 30^\circ</math>	 30° to 90°	 >90°	Normal
Global External Rotation	Not Testable	No function	 <math>< 0^\circ</math>	 0° to 20°	 >20°	Normal
Hand to neck	Not Testable	No function	 Not possible	 Difficult	 Easy	Normal
Hand to spine	Not Testable	No function	 Not possible	 S1	 T12	Normal
Hand to mouth	Not Testable	No function	 Marked trumpet sign	 Partial trumpet sign	 <math>< 40^\circ</math> of abduction	Normal
Internal rotation	Not Testable	No function	 Cannot Touch	 Can touch with wrist flexion	 Palm on belly No wrist flexion	Normal

1

Figure 5: Echelle d'évaluation des fonctions essentielles du membre supérieur (échelle de Mallet).

Enfin, les fonctions essentielles du membres supérieur peuvent être évaluées par un score global [9] adapté au plexus brachial, montrant les objectifs raisonnables de la reconstruction.

	0	1	2	3	4	5
max: 51						
max: 13						
max: 5	0° ou ballante ou subluxation scapulo-humérale > 1cm	0-30° ou stable	30-60°	60-90°	90-120°	>120°
max: 4	0° coude fléchi passivement, l'avant- bras ne peut quitter le thorax	5-10° (ref. au thorax)	10-30° (ref. au thorax)	30-60° (ref. au thorax) plan sagittal	>60° (ref. au thorax)	*
max: 2	ne peut rien tenir	tient un dossier de patient	tient un sac de 1 Kg	*	*	*
max: 2	projection postérieure	nulle	"main-poche" possible	*	*	*
max: 9	coude					
max: 5	flexion	impossible	main-poche ou main-ceinture complète contre la gravité dans l'amplitude complète à disposition	à 90° avec 1Kg dans la main	à 90° avec 3-5 Kg	à 90° avec plus de 5 Kg
max: 4	extension	impossible		avec 1 Kg dans la main	avec 3 kg dans la main	avec 5 Kg
max: 4	avant-bras					
max: 8	pronosupination	aucune	incomplète	les deux sont possibles et l'amplitude totale est de 100°	*	*
max: 4	poignet					
max: 4	flexion	aucune	contre la gravité en supination	avec 1 Kg dans la paume	avec 3 Kg dans la paume	4 Kg et plus
max: 4	extension	aucune	incomplète contre la gravité	complète contre la gravité	avec 1 Kg dha la main	avec 2 Kg ou avec un fort serrage des doigts
max: 9	main moteur					
max: 5	moteur doigts longs	paralysie totale	crochet passif efficace	crochet actif efficace (préhension primitive)	ouverture et fermeture partielle des doigts longs	force de serrage >8 Kg/cm ²
max: 3	moteur pouce	paralysie totale	pince latérale présente	ouverture et fermeture de la pince latérale < 1Kg/cm2 ("key pinch")	pince pollici-pulpaire force > 1Kg/cm2 ("key pinch")	force de serrage >8 Kg/cm ²
max: 1	moteur auriculaire	pas de flexion forte	flexion forte permettant le verrouillage d'un outil dans la paume (manche)	*	*	*
max: 8	main sensibilité					
max: 5	territoire médian	aucune	thermo-algique présent	toucher perçu (paresthésies)	toucher léger perçu (sans paresthésies)	certaine discrimination. Weber >15 mm discrimination satisfaisante. Weber <15 mm
max: 3	territoire ulnaire	aucune	thermo-algique présent	toucher perçu (paresthésies)	toucher léger perçu (sans paresthésies)	certaine discrimination. Weber >15 mm discrimination satisfaisante. Weber <15 mm

Figure 5bis: Echelle d'évaluation des fonctions essentielles du membre supérieur (score de Narakas)
(tiré de [9]).

C- Description des neurotisations étudiées

24 neurotisations spino-suprascapulaires (XI-SS) destinées à la réanimation de l'abduction/rotation externe de l'épaule ont été réalisées. Deux patients ont été perdus de vue (1 patient n'a pas répondu aux nombreuses relances téléphoniques, l'autre ne s'est pas rendu aux rendez-vous fixés par téléphone). 4 patients ont un délai de suivi insuffisant. 18 neurotisations sont donc incluses dans l'analyse. Pour l'étude des neurotisations spino-suprascapulaires, 9 patients ont été examinés spécialement, 8 patients ont été contactés par téléphone, et 1 patient n'a pu être joint.

La technique opératoire utilisée consistait généralement en une voie d'abord supraclaviculaire antérieure du plexus brachial suivant le bord postérieur du muscle sterno-cléido-masoïdien puis la clavicule. L'insertion claviculaire du muscle trapèze est respectée, puis la branche externe du nerf accessoire est repérée avec l'aide du stimulateur, ainsi que le nerf phrénique, et les racines du plexus brachial supérieur. Le nerf suprascapulaire est repéré par son origine ou par palpation à son entrée dans l'incisure supra-scapulaire, puis disséqué a retro. Le nerf accessoire est sectionné le plus bas possible après avoir préservé une branche pour le faisceau supérieur du muscle trapèze. Cette voie d'abord ne permet pas la vérification autre que palpatoire de l'intégrité du nerf suprascapulaire dans l'incisure suprascapulaire (il n'y avait pas dans la série de fracture de la scapula). La suture est assurée par 4 points de 10/0 non résorbables, complétés par de la colle biologique. En cas de tension, une greffe surale est interposée (1 cas de greffe de 3 cm).

Le délai moyen de consultation était de 3,2 mois post-traumatique (1,4 à 7,5 mois). Le délai moyen de la neurotisation était de 8,6 mois (de 3 à 21 mois). 6 patients ont été opérés avec un délai supérieur à 8 mois. Le recul post-opératoire est de 91,4 mois en moyenne (16 à 133 mois).

L'âge moyen était de 24,5 ans, avec 4 patients (22,2%) âgés de moins de 18 ans. 100% des patients étaient des hommes. 3 patients (16%) présentaient une paralysie de type Erb-Duchenne (C5C6), 3 autres (16%) une paralysie C5C6C7, et 12 patients (66,6%) une paralysie plexique complète. 8 patients (44,5%) avaient des lésions associées graves (traumatisme crânien grave 16,6%, lésion vasculaire axillaire 16,6%, pseudarthrose du membre supérieur 5,5%, lésion rachidienne instable 16,6%).

18 neurotisations intercostaux-musculocutanées (IC-MC) destinées à la restauration de la flexion et supination du coude ont été réalisées. 3 patients ont été perdus de vue. 15 neurotisations sont donc incluses dans l'analyse. 5 patients ont été examinés pour l'occasion de cette revue, les dix autres ont été contactés par téléphone pour vérifier l'absence de modification clinique par rapport aux dossiers, ainsi que pour répondre aux questionnaires fonctionnels et de qualité de vie.

La technique opératoire utilisée débutait par une incision en regard du canal brachial, prolongée le long du bord latéral puis inférieur du muscle grand pectoral. La branche motrice du nerf musculocutané est repéré, puis les 3°, 4° et 5° nerfs intercostaux sont disséqués dans l'espace intercostal. La technique de dissection sous-périosté [10] n'a pas été utilisée. Les trois nerfs intercostaux prélevés

sont solidarisés par de la colle biologique, puis recoupés (aux ciseaux de Millesi). Il sont anastomosés directement à la branche motrice du nerf musculo-cutané sans règle particulière, par 4 points de 10/0 complétés par de la colle biologique.

L'âge moyen était de 24,3 ans (de 13 à 43 ans), avec 4 patients (26,6%) âgés de moins de 18 ans. Tous les patients étaient des hommes. 1 patient présentait un déficit C5C6 initial, un autre un déficit C5C6C7. Les 13 autres présentaient un déficit panplexique. Parmi les patients, 7 (46,6%) avaient des lésions associées significatives, dont 3 (20%) un traumatisme crânien grave, 3 (20%) une lésion vasculaire grave, 1 (6,6%) une pseudarthrose significative de l'avant-bras et 1 (6,6%) une lésion instable rachidienne.

Le délai moyen de consultation était de 2,5 mois (1 à 4,4 mois). Le délai moyen de dénervation (défini comme le délai opératoire) était de 11,9 mois (6 à 25 mois). Le recul post-opératoire moyen est de 102 mois (53 à 136 mois).

6 neurotisations ulno-bicipitales (ou intervention d'Oberlin I [11]) destinées à la restauration de la flexion et supination du coude ont été effectuées depuis 2005. Cette technique utilisable uniquement pour les paralysies supérieures (C5C6 ou C5C6C7) consiste à prélever un faisceau moteur du nerf ulnaire au bras dans le canal brachial pour l'anastomoser sur la branche motrice du biceps voisin. Le muscle donneur est généralement le muscle fléchisseur ulnaire du carpe. 3 patients ont un délai de suivi insuffisant, malgré des résultats très encourageants, et ne sont donc pas inclus dans l'analyse. Les 3 patients restant sont des hommes de 30 ans en moyenne au traumatisme (21-37). Deux patients ont été examinés spécialement pour cette étude. 2 patients présentaient une paralysie C5C6, le troisième une paralysie C5C6C7. Il existait un déficit initial partiel à 4/5 et 2/5 des racines C8T1 chez 2 patients lors de la consultation initiale de 7 et 5 mois post-traumatique. Ces déficits se sont progressivement améliorés avant l'intervention. 1 patient présentait une lésion instable rachidienne associée. Il s'agissait du membre non dominant pour 2 patients.

Le délai moyen de consultation était de 8,7 mois (5 à 13 mois), le délai opératoire de 11,3 mois (5 à 16 mois). Le recul moyen est de 30 mois post-opératoire. Les trois patients ont été rééduqués en centre de médecine physique réadaptation.

1 patient de 9 ans a été opéré en 2006 d'une neurotisation entre le nerf accessoire et le nerf musculo-cutané destinée à la réanimation de la flexion du coude et de la supination, 4 mois après le traumatisme. Il s'agissait d'un accident de voiture, vu en consultation à 1,5 mois, présentant alors une fonction de l'épaule partielle (20° d'abduction avec rotation externe conservée par conservation du muscle supra-épineux). La neurotisation a utilisé un greffon de nerf saphène non-vascularisé.

5 neurotisations tricipito-axillaires ont été réalisées récemment. Cette intervention consiste à utiliser la branche motrice de la longue portion du muscle triceps pour réinnervier le nerf axillaire voisin. Elle a été utilisée en association avec une neurotisation spino-accessoire dans 3 cas, isolément dans 2 cas (dont 1 cas de déficit isolé du nerf axillaire). Malgré des résultats préliminaires très encourageants, le recul post-opératoire (5 mois en moyenne, de 2 à 7 mois) est insuffisant pour

être analysé dans cette étude. L'abduction est de l'ordre de 30° d'abduction à 6 mois, cotée M3 voir M4. Les bons résultats semblent constants.

3-résultats

A- neurotisation spino-suprascapulaire (XI-SS) :

Sur les 28 neurotisations retenues pour l'analyse, le résultat moteur définitif était en moyenne de 2,7 /5 selon l'échelle MRC. 5 patients (27,8%) avaient une force cotée à 3/5, 8 patients (44,4%) avaient une force cotée à 4/5. Au total, 13 patients (72,2%) avaient une fonction utile d'abduction (figure 6). Concernant les complications, on note uniquement 1 hématome post-opératoire réopéré en urgence.

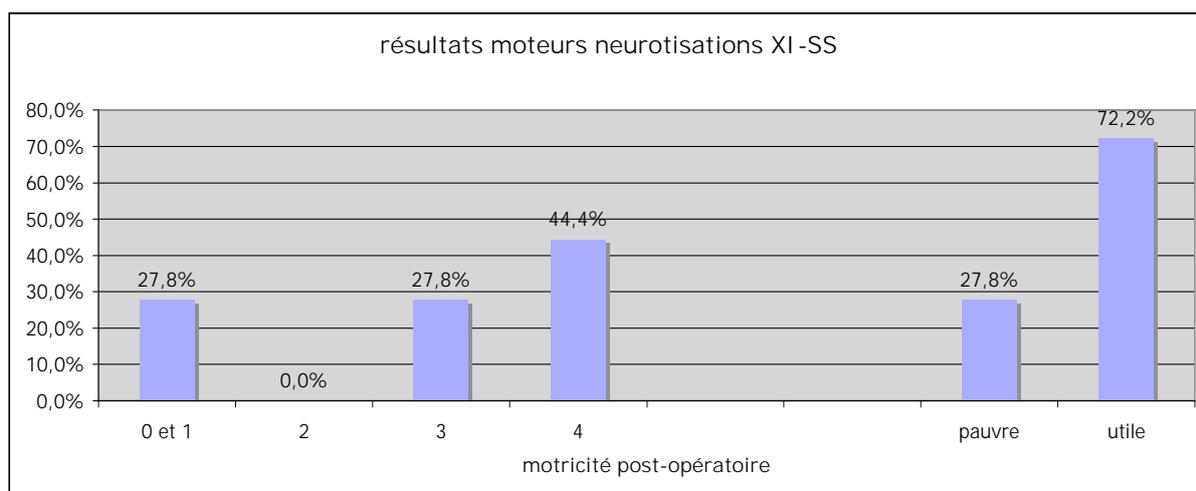


Figure 6 : résultats post-opératoires des neurotisations XI-SS.

L'étude des coefficients de corrélation montre une association statistique défavorable du délai d'intervention et de l'âge au traumatisme ($p < 0,05$) (figure 7).

Plus le délai de récupération s'allonge, plus la qualité du résultat diminue. Enfin, il semble que les lésions étendues récupèrent moins bien que les lésions plus partielles. La douleur est plus fréquente chez les patients récupérant peu. Il existe une association statistique faible entre la perception de l'utilité de l'intervention par le patient et le résultat clinique de la réanimation de l'épaule. Ce résultat analytique de la réanimation de l'épaule n'est pas non plus fortement lié à l'invalidité accordée par la sécurité sociale.

La latéralisation du déficit ou les séances de kinésithérapie n'influencent pas le résultat de l'épaule. La récupération de l'épaule ne conditionne pas vraiment la récupération du coude ou le retour au travail (Tableau 2).

paramètre	délai intervention	âge	délai récupération	bénéfice perçu
r (Spearman)	-0,5415	-0,5555	-0,5249	0,4076
I.C. 95%	-0.8101 to -0.08495	-0.8169 to -0.1047	-0.8311 to 0.02553	-0.1063 to 0.7497
p value	0,0203	0,0167	0,054	0,1043
significativité à 5%	oui	oui	NS	NS
paramètre	type de lésion	invalidité	douleur	motricité coude
r (Spearman)	-0,3504	-0,4047	-0,2952	0,2244
I.C. 95%	-0.7100 to 0.1540	-0.7885 to 0.2060	-0.6878 to 0.2310	-0.3015 to 0.6456
p value	0,1539	0,1702	0,25	0,3865
significativité à 5%	NS	NS	NS	NS
paramètre	kinésithérapie	travail	coté dominant	
r (Spearman)	0,1773	0,08251	-0,02566	
I.C. 95%	-0.3632 to 0.6285	-0.4621 to 0.5819	-0.5118 to 0.4729	
p value	0,5112	0,77	0,9221	
significativité à 5%	NS	NS	NS	

Tableau 2 : corrélation entre le résultat moteur post-opératoire des neurotisations XI-SS et certains facteurs pré- ou post-opératoires.

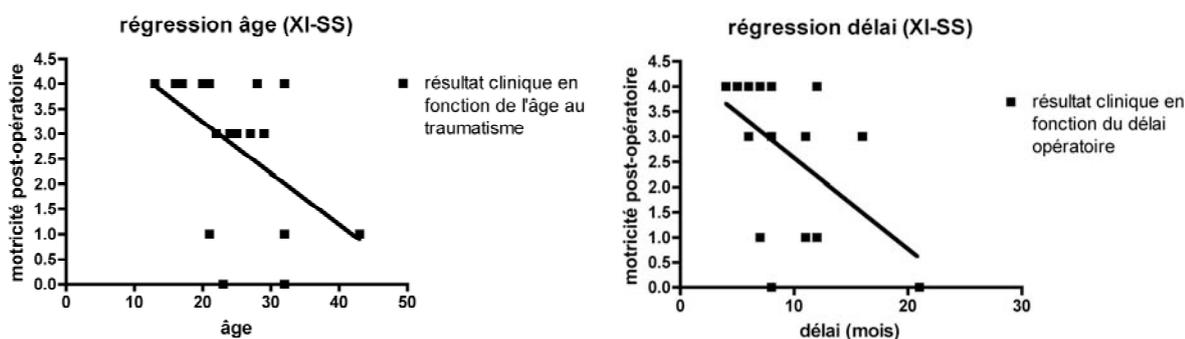


Figure 7: droites de régression concernant les neurotisations XI-SS:

- résultat moteur final en fonction de l'âge au traumatisme.
- résultat moteur final en fonction du délai opératoire.

Pour étudier l'influence de la greffe surale d'interposition, on ne peut que se reporter qu'au seul cas de la série: d'une longueur de 3 cm(35 ans, délai opératoire de 11 mois), le patient a récupéré une fonction M3.

B- Neurotisation intercosto-musculocutanée (IC-MC) :

Sur les 15 neurotisations retenues pour l'analyse, le résultat moteur définitif était en moyenne de 1,8 /5 selon l'échelle MRC. 1 patient (6,7%) avait une force cotée à 2/5, un autre à 3/5, et 4 patients (26,7%) avaient une force cotée à 4/5. Au total, 5 patients (33,3%) avaient une fonction utile de flexion (figure 8).

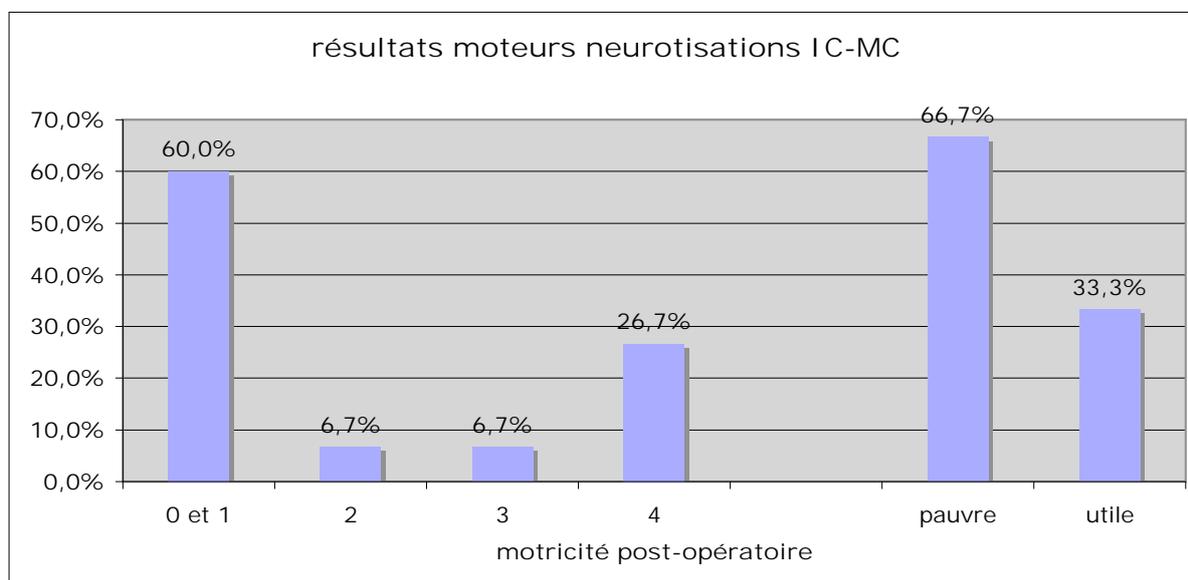


Figure 8 : résultats post-opératoires des neurotisations IC-MC.

Les complications du prélèvement intercostal ont été : 1 pneumothorax, 3 hématomes thoraciques post-opératoires, 1 section accidentelle d'un nerf intercostal.

Pour expliquer ces résultats, nous avons étudié la corrélation du résultat avec divers facteurs modifiables ou non-modifiables. Aucune corrélation n'est retrouvée (Tableau 3). Il semblerait que le nombre de séances de kinésithérapie pourrait influencer sur le résultat définitif. Il semblerait également que les patients ayant mal récupéré soient plus douloureux.

Paramètre	travail	bénéfice subjectif	kinésithérapie
r (Spearman)	0,511	0,478	-0,468
IC 95%	-0.0185 to 0.817	-0.0621 to 0.802	-0.816 to 0.130
P value	0,0515	0,0714	0,107
significativité à 5%	ns	ns	ns
Paramètre	douleur	délai opératoire	biofeedback
r (Spearman)	-0,384	-0,224	0,133
IC 95%	-0.756 to 0.176	-0.670 to 0.341	-0.466 to 0.648
P value	0,1581	0,4225	0,666
significativité à 5%	ns	ns	ns
Paramètre	âge	utilisation main	invalidité
r (Spearman)	0,0946	0,0486	0,0069
IC 95%	-0.452 to 0.590	-0.488 to 0.559	-0.520 to 0.530
P value	0,7374	0,8635	0,9805
significativité à 5%	ns	ns	ns

Tableau 3: corrélation entre le résultat moteur postopératoire du coude et divers facteurs.

C- Autres techniques de neurotisation :

1° Neurotisation ulno-bicipitale (technique d'Oberlin):

Les résultats sont présentés dans la figure 9. 2 patients ont une motricité à 3/5, un autre à 4/5. Tous les patients ont donc un résultat utile. 1 des patients a été réopéré le lendemain de la neurotisation pour l'évacuation d'hématome post-opératoire. Ces patients peuvent porter la main à la poitrine, mais 1 seul peut porter la main à la bouche (ceci étant conditionné également par la fonction de l'épaule).

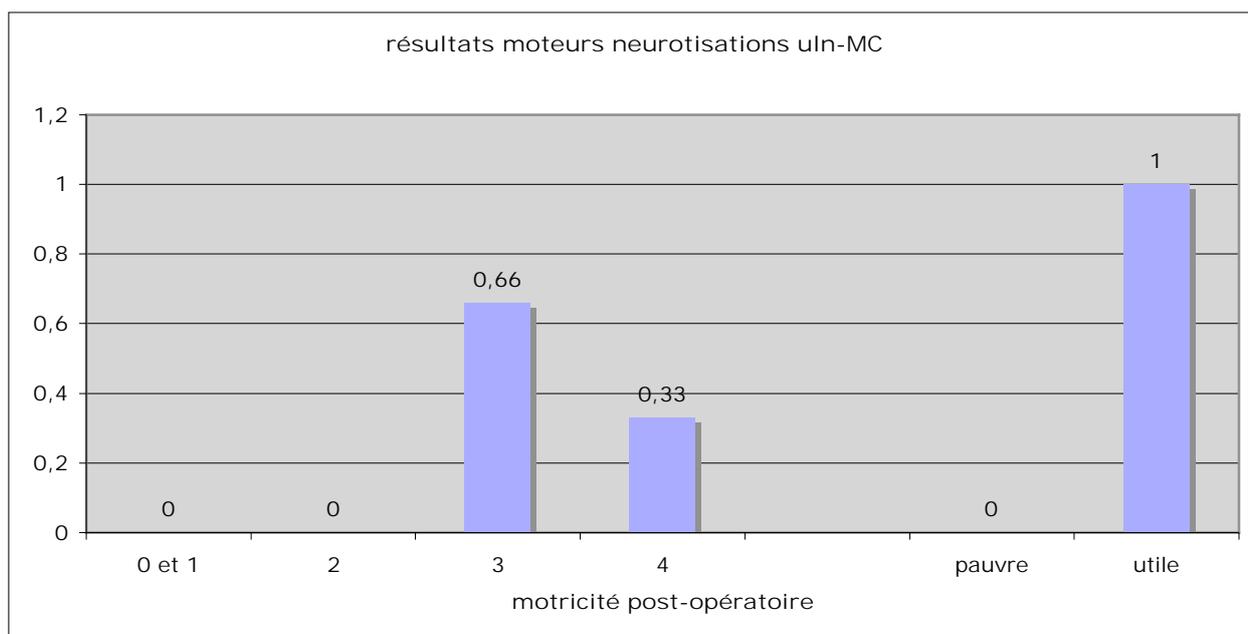


Figure 9 : résultats post-opératoires des neurotisations ulno-musculocutanées.

2° Neurotisation spino-musculocutanée (XI-MC):

Ce patient est suivi depuis l'intervention dans un autre centre. La fonction du coude (par téléphone) est cotée à M2 (45° de flexion du coude verticalement).

D- résultats fonctionnels, sociaux, facteurs influençant les résultats :

1° Résultats fonctionnels

Les résultats fonctionnels de l'ensemble de la stratégie de réanimation sont donnés dans le tableau 3.

fonction du membre	patients aptes	conditions d'utilisation du membre	
main bouche	13,0%	utilisation de la main	59,1%
main nuque	4,3%	port régulier d'une orthèse	8,7%
main tête	8,7%	port régulier d'une écharpe	26,1%
main poitrine	43,5%		
pince thorax avantbras	78,3%		
pince bras avantbras	45,5%		

Tableau 3 : résultats fonctionnels de la réanimation du membre

2° Situation professionnelle

La situation professionnelle des patients est donnée dans le tableau 4. La moitié des patients a retrouvé une activité professionnelle, et le salaire constitue leur ressource financière exclusive pour un tiers d'entre eux. Le taux d'invalidité accordé par la sécurité sociale est assez variable, 57% en moyenne.

activité professionnelle	55%
en recherche active d'emploi	42,10%
Non applicable*	13,60%
salaire exclusif	31,50%
allocations diverses**	42,10%
assurance	10,50%
taux d'invalidité SS	57,6% (0-80)

*Non applicable: études, reclassement en cours, non consolidé.

**principalement AAH

Tableau 4 : taux d'activité professionnelle et principales sources de revenu des patients (SS: sécurité sociale).

3° Douleurs

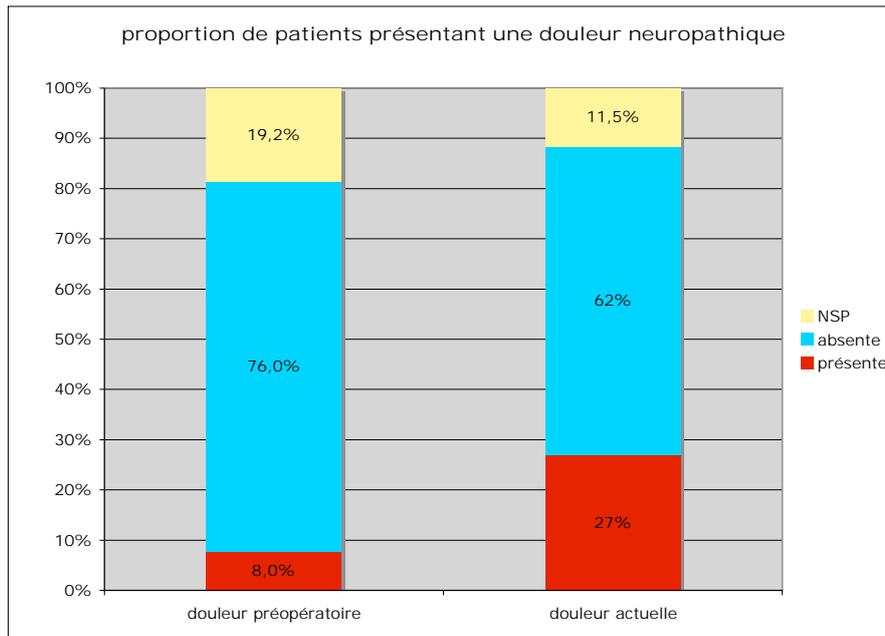


Figure 10 : proportion de patients présentant une douleur neuropathique en fonction du temps.

La prévalence et l'intensité des douleurs neuropathiques ressenties par les patients sont données dans les figures 10, 11, 12 et 13. On constate que 27% des patients ont une douleur neuropathique au moment du recueil de données. Cette proportion est plus importante qu'au début de la prise en charge. Ceci tend à montrer que l'intervention n'exerce pas l'effet favorable qu'on a pu lui prêter sur l'incidence des douleurs. Sur le plan de l'intensité des douleurs, elles ne semblent pas modifiées non plus par l'intervention (Figure 11).

La présence d'une douleur neuropathique est en revanche assez fortement associée à l'étendue de la paralysie initiale, puisque l'implication de la racine C7 augmente considérablement l'incidence des douleurs par rapport aux patients présentant un syndrome C5C6. Les paralysies panplexiques ont des douleurs plus fréquentes (figure 12). En plus de l'incidence, on voit également que la paralysie de C7 joue un rôle important sur le plan de l'intensité de la douleur ressentie (figure 13).

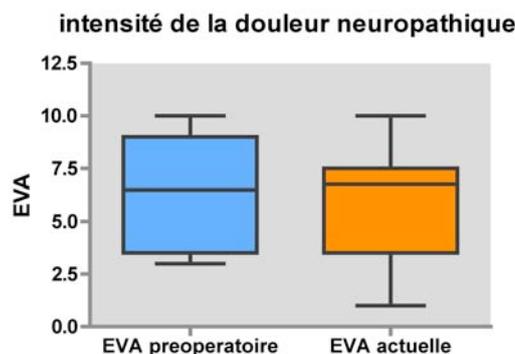


Figure 11 : intensité des douleurs neuropathiques en fonction du temps.

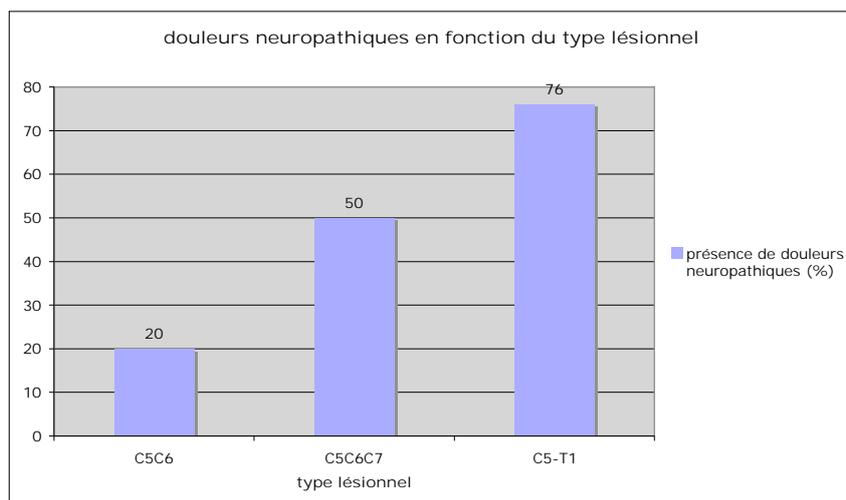


Figure 12 : prévalence des douleurs neuropathiques en fonction du type lésionnel.

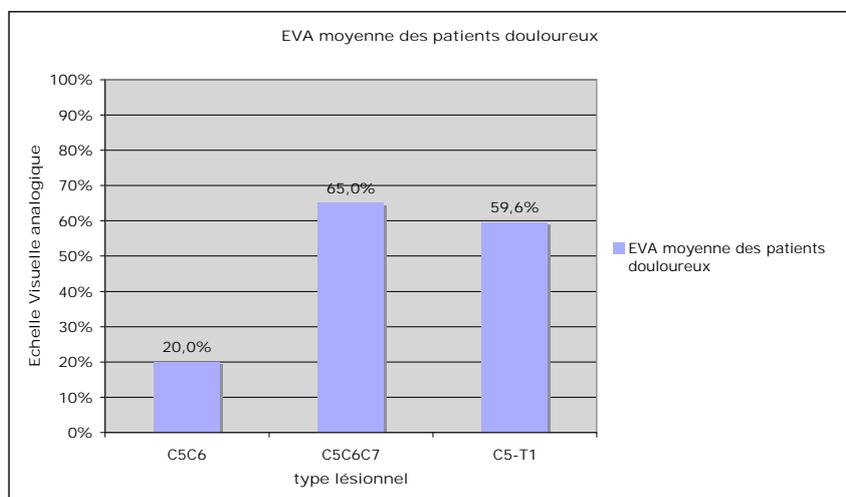


Figure 13 : EVA moyenne des patients douloureux, en fonction du type lésionnel.

localisation de la douleur	
distale	100,0%
proximale	17,6%
rachialgie	11,7%

Tableau 5 : topographie des douleurs

La localisation de la douleur, quand elle est présente, est toujours distale. Les douleurs proximales et les rachialgies sont au second plan, et n'ont pas de caractère neuropathique (Tableau 5).

Le tableau 6 étudie l'incidence de la douleur, et montre sa corrélation avec plusieurs facteurs (modifiables ou non). Nous avons vu qu'elle est surtout influencée par l'intensité des lésions initiales ($p < 0,05$), ce qui est concordant avec les figures 12 et 13. On voit que la douleur est un facteur important de désinsertion sociale (emploi) et de handicap (taux d'invalidité sécurité sociale). On remarque également que le délai opératoire ne semble pas influencer la survenue de la douleur ($r(\text{spearman})=0,0917$, $p=0,589$). Curieusement, les patients utilisant leur main ne sont pas forcément indolores. Enfin, la prise en charge rééducative (fréquentation des centres de MPR, nombre de séances de kinésithérapie, utilisation du biofeedback) ne semble pas influencer sur la survenue des douleurs. Les patients devant porter une écharpe sont les plus douloureux.

paramètre	type	emploi	invalidité	écharpe
r (Spearman)	0,4218	-0,424	0,5741	0,393
I.C. 95%	-0.001510 to 0.7169	-0.7238 to 0.01044	0.1760 to 0.8108	-0.03603 to 0.6997
p value	0,045	0,0492	0,0065	0,0636
significativité à 5%	oui	oui	oui	non
paramètre	pénibilité intervention	douleur initiale	orthèse	coté dominant
r (Spearman)	0,2321	0,2266	0,2041	0,1989
I.C. 95%	-0.2116 to 0.5966	-0.2172 to 0.5928	-0.2396 to 0.5773	-0.2447 to 0.5736
p value	0,2865	0,2985	0,3502	0,3629
significativité à 5%	non	non	non	non
paramètre	seances kiné	âge	biofeedback	utilisation main
r (Spearman)	-0,1918	-0,1856	-0,2046	-0,1714
I.C. 95%	-0.5765 to 0.2626	-0.5643 to 0.2576	-0.6120 to 0.2886	-0.5623 to 0.2821
p value	0,3926	0,3964	0,4007	0,4456
significativité à 5%	non	non	non	non
paramètre	centre MPR			
r (Spearman)	0,08257			
I.C. 95%	-0.3985 to 0.5280			
p value	0,7368			
significativité à 5%	non			

Tableau 6 : corrélation entre la présence d'une douleur neuropathique et certains autres facteurs.

4° satisfaction générale

L'ensemble de la prise en charge chirurgicale (rééducation non comprise) est ressentie comme « pénible » par 30% des patients. Cette même prise en charge a été jugée comme « valant la peine » par 65% des patients.

5° facteurs corrélés au résultat moteur.

Nous avons regroupé les différentes neurotisations dans le but d'augmenter la puissance des analyses de régression. Les coefficients de corrélation entre le résultat moteur post-opératoire (toutes interventions confondues) et différents facteurs pré ou postopératoires sont indiqués (dans l'ordre) dans le tableau 7.

paramètre	delai chirurgie	EVA	age
r (Pearson)	-0,5147	-0,4727	-0,1573
I.C. 95%	-0.7121 to -0.2419	-0.7229 to -0.1129	-0.4470 to 0.1622
p value	0,0007	0,0128	0,3324
significativité à 5%	oui	oui	non

paramètre	delai consultation	delai recuperation P'	invalidite
r (Pearson)	0,1399	-0,1351	0,04925
I.C. 95%	-0.1796 to 0.4326	-0.4839 to 0.2507	-0.2939 to 0.3811
p value	0,3894	0,493	0,7821
significativité à 5%	non	non	non

paramètre	benefice subjectif	douleur (O/N)	type clinique	emploi
r (Spearman)	0,4443	-0,2453	-0,2321	0,1539
I.C. 95%	0.1307 to 0.6771	-0.5346 to 0.09551	-0.5141 to 0.09509	-0.1937 to 0.4672
p value	0,0059	0,1435	0,1495	0,3702
significativité à 5%	oui	non	non	non

paramètre	dominance	kinesitherapie	biofeedback	MPR
r (Spearman)	0,07277	-0,1014	0,07871	-0,0214
I.C. 95%	-0.2620 to 0.3919	-0.4289 to 0.2497	-0.2876 to 0.4249	-0.3767 to 0.3394
p value	0,6642	0,5623	0,6685	0,9074
significativité à 5%	non	non	non	non

Tableau 7 : corrélation entre le résultat moteur final (de toutes les neurotisations) et certains facteurs pré- et post-opératoires.

Le tableau 7 et la figure 16 confirment la notion intuitive que le résultat moteur post-opératoire influence la survenue de douleurs (non significatif, $p=14\%$) et surtout l'intensité des douleurs ($p<0,05$). Nous avons essayé d'évaluer l'importance relative de la réhabilitation de l'épaule (nerf moteur pur) ou du coude (nerf mixte) dans ce phénomène. Les droites de régression présentées en figure 14 montrent que ces deux interventions sont d'importance égales concernant la survenue de douleurs à terme.

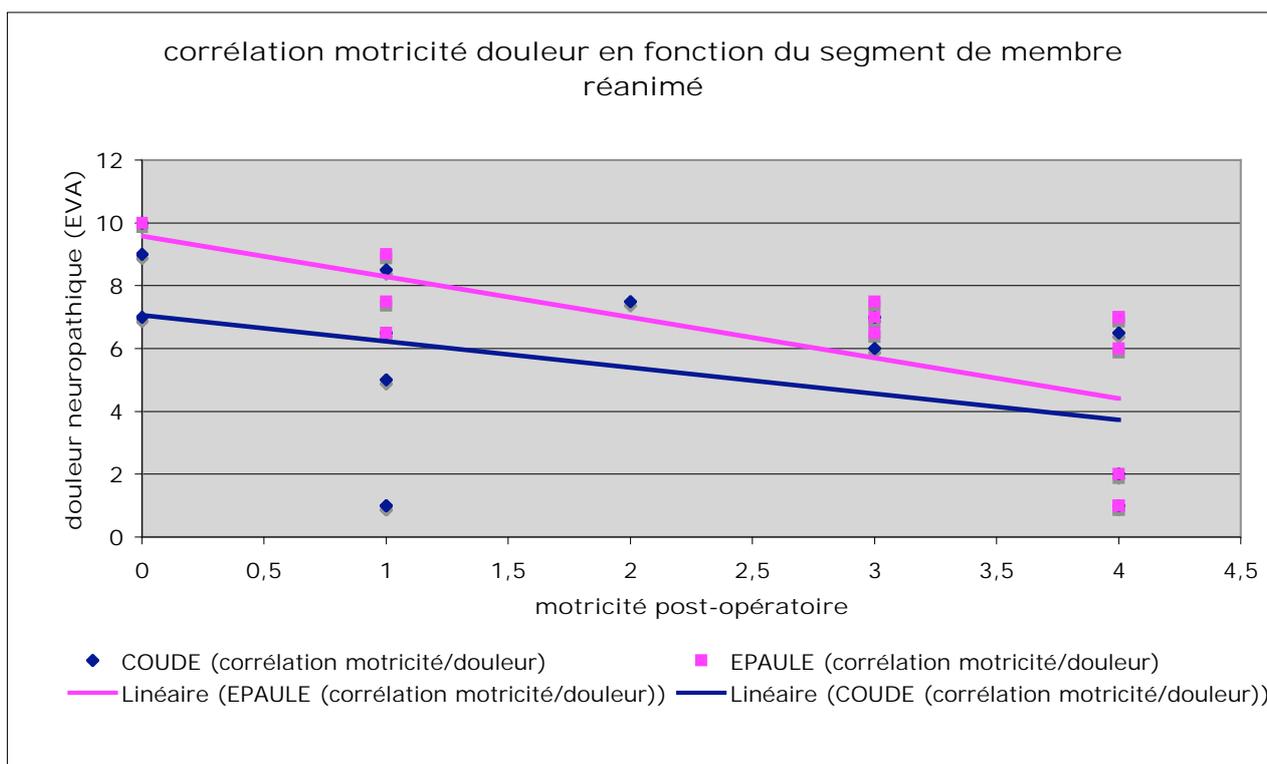


Figure 14 : droite de régression de l'intensité douloureuse en fonction de la récupération motrice, comparaison de l'influence de la réanimation du coude et de l'épaule.

Le tableau 7 et la figure 16 confirment également l'importance du délai opératoire ($p < 0,0007$), facteur modifiable par l'attitude chirurgicale, dans le résultat moteur final.

Logiquement, la satisfaction du patient est corrélée au résultat moteur.

Tous les marqueurs de suivi rééducatif, que l'on pourrait penser comme favorables au résultat (suivi en centre de rééducation, fréquence des séances de rééducation, utilisation du biofeedback) sont en réalité sans influence sur la motricité post-opératoire (tableau 7, figure 15). Enfin, l'âge n'est pas un facteur influençant significativement le résultat moteur définitif (tableau 7, Figure 16).

La latéralisation du déficit en fonction de la dominance n'est pas corrélée au résultat moteur définitif, ni à la présence d'une douleur neuropathique (figure 15).

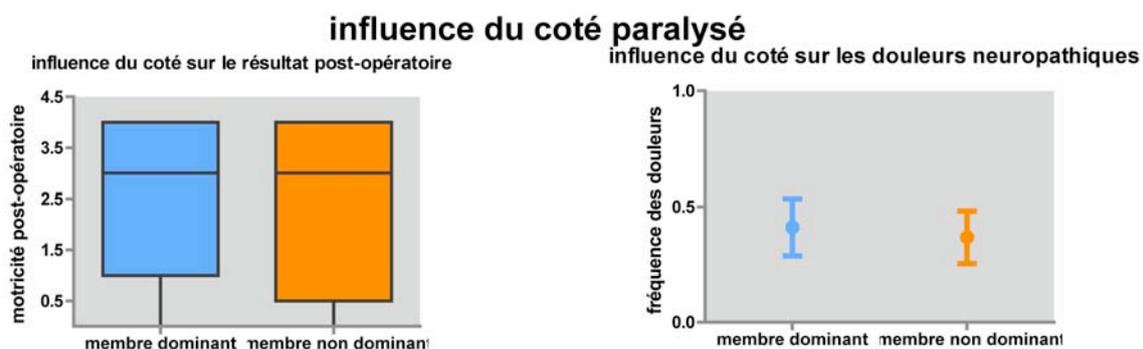


Figure 15 : influence de la latéralisation du déficit.

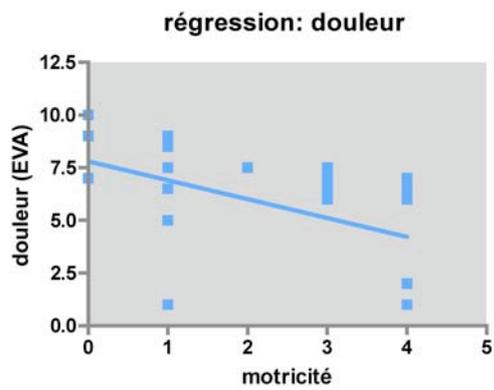
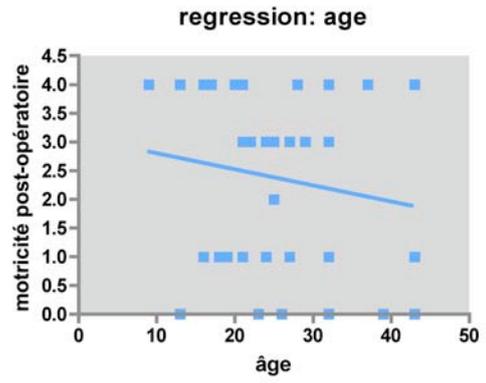
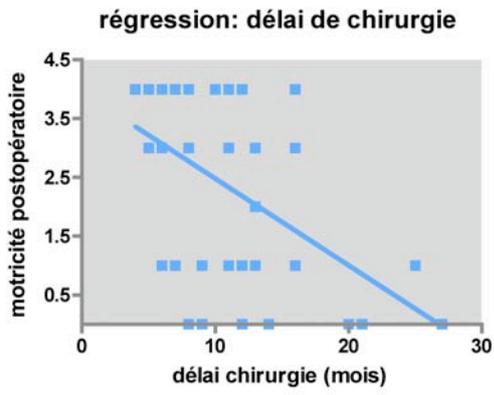


Figure 16 : droites de régression

- résultat moteur final en fonction du délai opératoire
- résultat moteur final en fonction de l'âge
- intensité de la douleur neuropathique distale en fonction du résultat moteur proximal.

4-Discussion

La chirurgie du plexus brachial est techniquement difficile. L'analyse des résultats de sa reconstruction l'est encore plus. On est en effet confronté à une multiplicité des lésions anatomopathologiques, à une multiplicité des techniques de reconstruction, à des critères d'évaluation variables d'un auteur à l'autre. Sur le plan statistique enfin, les séries sont bien entendu non-contrôlées et les effectifs sont petits.

A-éléments anatomiques, évaluation des lésions et indication opératoire.

1° éléments d'anatomie du plexus brachial.

Nous ne revenons pas sur la description classique de l'anatomie du plexus brachial, mais nous insistons sur quelques points utiles à la compréhension clinique, à la physiopathologie et à la chirurgie [12].

Narakas, puis Bonnel ont étudié la structure fasciculaire du plexus brachial [13], et réussi à retrouver «une certaine» organisation des fascicules au sein des racines, troncs et faisceaux (figure 17). Cette «carte» fasciculaire doit être gardée en mémoire lors de la chirurgie, afin d'orienter les greffes intraplexuelles le plus conformément possible à cette disposition, en suturant le greffon dans le cadran nerveux adapté à l'objectif principal.

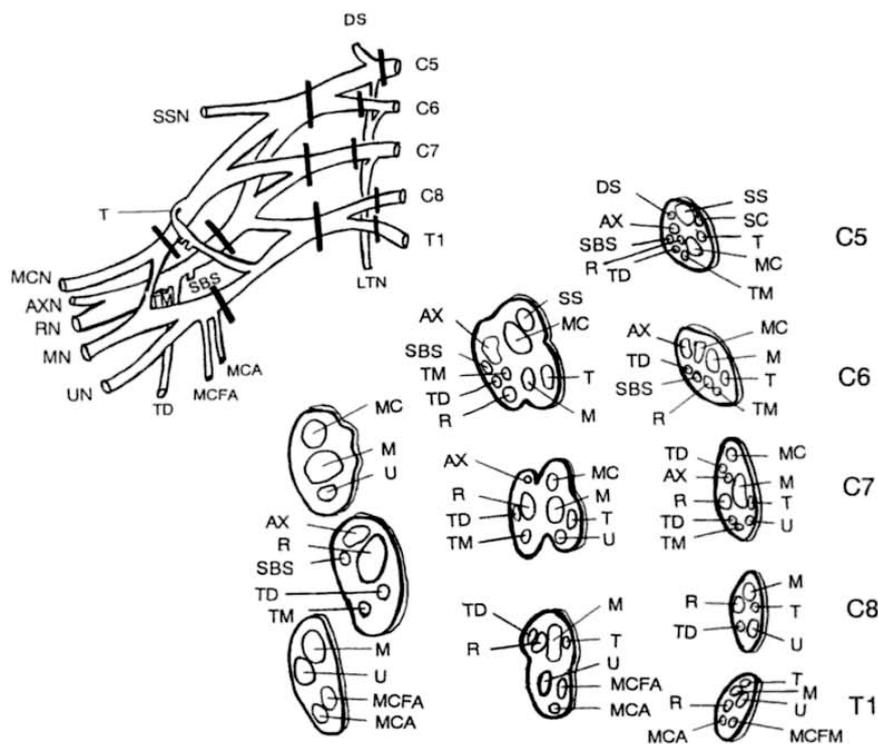


Figure 17: cartographie fasciculaire du plexus brachial, selon Narakas [13].

Le nombre de fascicules augmente le long du plexus brachial (de 2 à 7 selon les racines, approximativement 10 pour les troncs, approximativement 15 pour les faisceaux) et leur calibre diminue (50% des fascicules mesurent plus de 1 mm dans les racines, alors que l'on ne retrouve que 20% de gros fascicules dans les faisceaux).

Les racines supérieures ont un trajet en «Z» lors de leur passage des espaces sous-arachnoïdiens vers le défilé interscalénique. Ils ont un trajet descendant (de 10° pour C8 à 48° pour C5, alors que T1 est ascendant de 5°) dans les citernes sous-arachnoïdiennes, puis s'horizontalisent sur le processus transverse, puis replongent verticalement entre les scalènes. Leur point d'ancrage le plus solide est au foramen intervertébral où la dure-mère adhère au périoste et contribue à la formation de l'épinèvre. Les racines supérieures sont assurées par un ligament supplémentaire: le ligament en semi-cône postéro-supérieur décrit par Herzberg[14] (figure 18). Il est très résistant en C5 reliant le bord inférieur de la transverse de C4 à la racine au delà de l'émergence de la branche destinée au nerf thoracique long. Ce ligament existe aussi (mais moins solide) en C6 et C7.

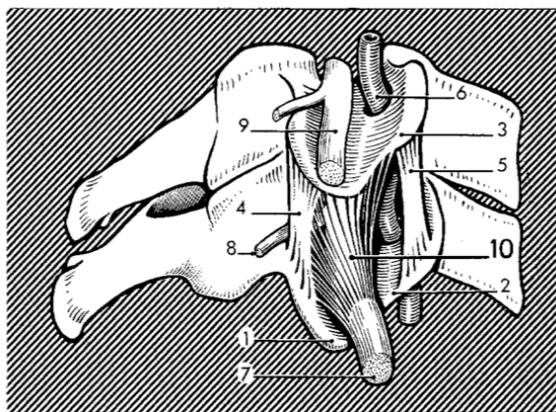


Figure 19: ligament en semi-cône postéro-supérieur (n°10) de l'espace inter-transversaire de C5 et C6 [14].

Le nombre de fibres myélinisées a été étudié par Bonnel sur plus de 100 dissections [15]. Le tableau 8 présente les résultats de ses analyses. Celui-ci est important à connaître pour le chirurgien du plexus brachial, car les neurotisations tiennent compte du nombre de fibres des donneurs (tableau 9) pour les ajuster sur celui du receveur. On rappelle qu'il suffirait de 30% des fibres myélinisées d'un nerf atteignant leur cible pour obtenir une contraction normale ([16]).

nerf cible	Nombre de fibres myélinisées (moyenne)	nerf donneur	Nombre de fibres myélinisées
plexus brachial (n=21)	118.047 (85.566 - 166.214)	C7	23.781 (16.000-40.000)
C5	16.472	hypoglosse	5000-6000
C6	27.421	phrénique	1756
C7	23.781	Inter-costal**	500-700
C8	30.626	XI	1500-1700
T1	19.747	ulnaire partiel	1600
nerfs destinés à l'épaule	31.979	thoracique long	1600-1800
suprascapulaire*	1603*	cervical profond	893
musculo-cutané	5.023 (3.465 - 9.350)	rameau pectoral	400-600
médian	15.915 (7.457 - 27.190)		
ulnaire	14.161 (10.365 - 22.690)		
radial	15.964 (10.029 - 32.210)		
axillaire	6.547 (2.073 - 12.711)		

* d'après Pruksakorn

** d'après Narakas, Landi

tableau 8: nombre de fibres myélinisées selon la racine ou le nerf terminal (d'après Bonnel [15] et Pruksakorn [75]).

Tableau 9: nombre de fibres myélinisées selon les donneurs potentiels (d'après Chuang [226]).

Il existe de nombreuses variations dans le plexus brachial (seulement 46,5% des cas correspondent à la variété habituelle [17]). Dans la forme habituelle, sans décrire la totalité des territoires, on peut retenir quelques notions clé à garder en mémoire pour pouvoir s'adapter au moment de la chirurgie. Certains troncs ont typiquement un aspect monofasciculaire (les racines, les divisions du tronc supérieur, et l'origine des nerfs suprascapulaire et musculo-cutané. la distance moyenne d'un fascicule avant fusion ou division est de 5 mm. Le tronc supérieur fournit 50% du faisceau supérieur.

Il convient de préciser le concept de pré-ou de post-fixation du plexus, car sa reconnaissance influe beaucoup sur la stratégie de reconstruction.

La préfixation est schématiquement la participation de C4 dans le plexus brachial, et la faible participation de T1. Sa fréquence est mal connue car il existe de grandes variations selon les auteurs (28% selon Jachimowicz [18], 35% pour Sénécaïl [19], 41% selon Bonnel [15], 62% pour Kerr[20]). Slingluff, Terzis et Edgerton [21] ont retrouvé suffisamment de constance dans la préfixation pour en définir des critères précis (figure 20):

racines spinales	C5 fournit plus de 15% du plexus T1 fournit moins de 13% du plexus
troncs	le tronc supérieur est plus large que le tronc inférieur le tronc supérieur fournit plus d'1/3 des nerfs pectoraux le tronc supérieur fournit plus de la moitié du faisceau postérieur le tronc inférieur fournit moins de 15% du faisceau postérieur le tronc inférieur fournit moins de la moitié du nerf médian le tronc inférieur fournit moins de la 25% du nerf radial
faisceaux	le faisceau latéral ne reçoit pas de contingent de C8
nerfs périphériques	C7 fournit moins de 8% au nerf musculo-cutané C7 fournit une contribution au nerf ulnaire

Figure 20: critères de préfixation, selon Slingluff, Terzis et Edgerton [12].

La postfixation (participation de T2 dans le plexus brachial) correspond aux critères inverses, représenterait 4% (bonnel [15]), 16% (Ko Hirasawa) à 73% (Adolphi) des cas [12]. La notion importante à garder en mémoire dans cette situation est que C7 (qui fournit moins de 10% des fibres au nerf musculo-cutané dans un plexus normal) contribue pour une grande partie du nerf musculo-cutané et que C8 fournit alors près de 40% des fibres du faisceau latéral.

2° lésions anatomopathologiques rencontrées.

Avant de discuter les résultats de la réanimation du membre supérieur, il convient de préciser les lésions anatomopathologiques rencontrées, ce qui influence beaucoup le résultat et les possibilités chirurgicales. Sedel et Terzis ont tous deux établi une classification lésionnelle voisine (Figure 2, matériel et méthode). Celle-ci distingue pour un même déficit périphérique les lésions en fonction du nombre d'avulsions radiculaires, de ruptures radiculaires extra-foraminales, de ruptures des faisceaux ou des troncs terminaux.

Narakas a publié les lésions anatomopathologiques qu'il a retrouvées chez 269 patients opérés, toutes lésions plexiques confondues (Figure 21). Terzis a également précisé le nombre de racines avulsées dans sa cohorte de 204 patients opérés (il s'agit là de patients présentant une paralysie complète).

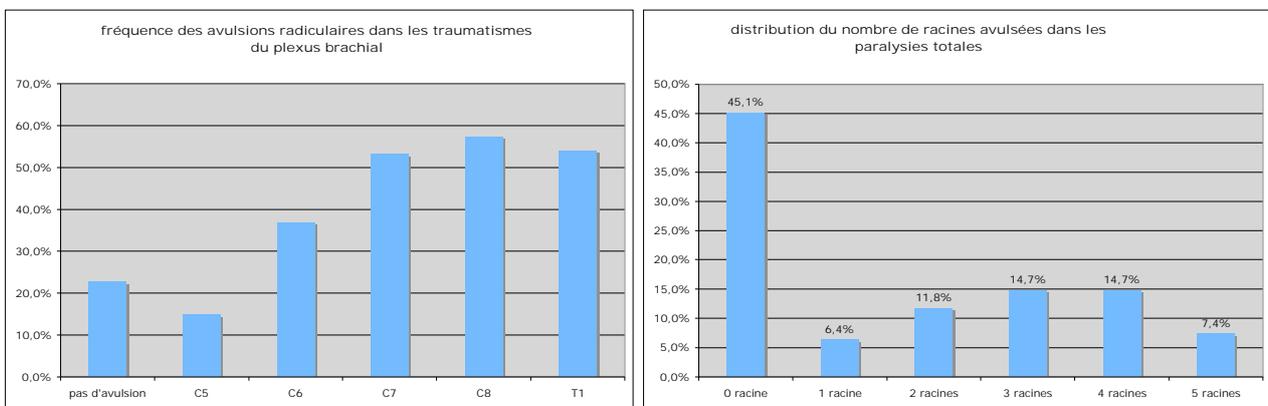


Figure 21 (tiré de [35]):

- à gauche: **fréquence des avulsions radiculaires selon l'étage** dans les traumatismes du plexus brachial.
- à droite: distribution du **nombre de racines avulsées** en cas de paralysie totale.

Narakas décrit les associations lésionnelles les plus fréquentes. La figure 22 reprend ces présentations.

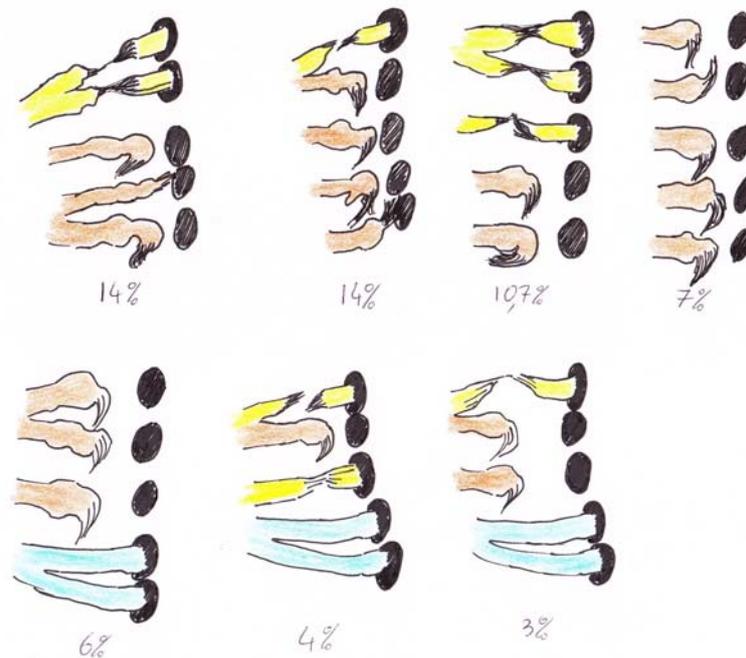


Figure 22: associations lésionnelles les plus fréquentes dans les paralysies du plexus brachial (d'après [35]).

Jaune: rupture, orange: avulsion, vert: racine non lésée

Note: il est probable que les proportions soient sous-évaluées car le total des lésions décrites ne coïncide pas avec le nombre total de patients.

On remarque que la racine C5 est presque toujours préservée, ce qui est concordant avec toutes les observations des autres auteurs. Bertelli note que les plexus complets présentent la plupart du temps une avulsion des racines inférieures (94% de ses patients [22], 96% selon Allieu [23]). Les racines supérieures seraient elles fréquemment rompues dans la portion extra-foraminale (C5 serait disponible pour une greffe intra-plexuelle dans 95% des cas) en raison de la présence du ligament en semi-cône postéro-supérieur de l'espace inter-transversaire décrit par Herzberg [14].

3° diagnostique pré-opératoire, per-opératoire et indication chirurgicale.

Etablir un bilan lésionnel préopératoire précis est probablement la clé du succès dans ce type de prise en charge, tant le délai opératoire importe pour le résultat définitif.

Les modifications tissulaires survenant après lésion du nerf périphérique ont schématiquement la chronologie suivante [24]:

-la fibrose des tubes endoneuronaux est rapide, et conduit à la réduction de leur calibre: selon Sunderland, leur diamètre ne serait plus que de 3 µm à 4 mois, évoluant vers 2µm en 12 à 18 mois.

-L'effecteur musculaire s'atrophie de 80% en 3 semaines (chez le rat). Chez l'homme, l'atrophie est rapide et sans modification structurale majeure pendant 3 mois (conservation de la capillarisation et de la striation). La fibrose de l'endomysium et du périnysium débute déjà. Entre 4 et 6 mois, le processus d'atrophie se ralentit, puis les modifications structurales apparaissent (perte de la striation, désorganisation et raréfaction des capillaires). Ces changements débutent à 6 mois, s'accroissent à 9 puis à 12 mois. A 36 mois la striation caractéristique du muscle n'est plus visible: fibrose et lobules graisseux coexistent. L'activité de fibrillation a disparu avec le tissu contractile.

L'enjeu de la période initiale est donc de déterminer avec précision la probabilité de récupération spontanée correspondant à la neurapraxie de certaines racines. Une attitude consiste à attendre la réapparition de signes de récupération dans les territoires déficitaires. Cette attitude est la plus simple et prudente, mais nécessite d'attendre longtemps.

Concernant ce problème du délai opératoire, Kline rappelle que l'on doit distinguer plusieurs situations.

-La première concerne les patients présentant une paralysie du plexus supérieur C5C6, car il note que 40% d'entre eux récupèrent spontanément et de façon évidente dans les 3 premiers mois [25]. Cette récupération peut même éventuellement survenir avec la preuve d'une racine avulsée (peut-être en raison de la participation occasionnelle de C4 au tronc supérieur).

Il indique que les paralysies initiales C5C6C7 ne récupèrent spontanément que dans 15% des cas. Il relève également quelques cas de récupération malgré la constatation d'une avulsion radiculaire. Il conseille donc d'attendre 3 mois pour ces catégories de patients.

-Pour les patients présentant une lésion panplexique, la situation est toute différente: Il ne retrouve que 4 à 5% de récupération spontanée fonctionnelle dans ce type de situation. Il plaide donc pour une chirurgie précoce pour ce type de présentation.

Ces données sont résumées dans le tableau 10.

type clinique	amélioration spontanée	neurolyse lors de la chirurgie à 3 mois (régénération en cours)
C5C6	40%	25%
C5C6C7	15%	24%
C5-T1	5%	peu

Tableau 10: fréquence des récupérations spontanées cliniques et électrophysiologiques per-opératoires en fonction de la présentation initiale (d'après Kline [25]).

Nagano a lui étudié l'évolution spontanée de 198 cas d'une autre catégorie de patients: celle des paralysies sans aucune avulsion radiculaire [26]. On retient de ses statistiques que:

- Le taux de récupération spontanée est globalement de 44%, sans différence entre les plexus supérieurs et les déficits panplexiques (en revanche, les paralysies supérieures obtiennent un meilleur résultat qualitatif).
- La récupération des racines supérieures (celle qui conditionnent l'indication opératoire précoce) survient dans 38% des cas.
- 6% des paralysies panplexiques n'ont pas du tout récupéré.

Il fournit également quelques bornes cliniques à garder en mémoire pour décider d'abréger le traitement conservateur:

- les patients récupérant une force de M1 à 9 mois dans l'épaule obtiennent M3 à la fin du suivi.
- Les patients récupérant une force de M1 à 12 mois dans les muscles de la main atteindront M3 au terme du suivi.
- Les muscles cotés à M2 à 18 mois ne s'amélioreront pas au delà de M3 à terme.
- Le résultat à 24 mois est identique au résultat ultérieur. Ce terme est donc le délai à ne pas dépasser pour envisager la deuxième phase orthopédique de reconstruction du plexus, car on a alors une bonne vision des besoins: améliorer une insuffisance de résultats (coude/épaule) ou orienter les bons résultats vers le fonctionnement de la main.

La question du délai est toujours en débat malgré l'expérience accumulée.

En faveur d'une chirurgie précoce, on trouve Narakas qui précise que plus le délai s'allonge et moins bons sont les résultats [27]. Kanaya retrouve une différence des résultats de greffes à partir d'un délai de 3 mois [28]. Terzis veille à opérer dans un intervalle de 1,5 à 3 mois post-traumatique [8]. Allieu retrouve une influence déterminante du temps de dénervation sur la fonction post-opératoire du biceps[29], avec une limite placée à 6 mois. Terzis confirme ce fait, ses chiffres confirmant que la récupération chute au-delà de 6 mois de délai opératoire, en particulier pour la récupération du coude. Elle retrouve une nouvelle chute des résultats au delà de 1 an de délai. Elle précise que l'obtention d'une main fonctionnelle n'est quasi pas possible au-delà de 6 mois de délai (ce qui est logique compte-tenu de la distance).

Certains ont même plaidé pour une chirurgie ultra-précoce avant 15 jours, pour faciliter la chirurgie, minimiser le recours aux greffes et améliorer les résultats [30]. Les résultats sont effectivement significativement meilleurs en cas de chirurgie avant 2 semaines et avant 2 mois [31].

La question est plutôt de trouver le délai optimal pour éviter d'imposer un sacrifice nerveux inapproprié. Au contraire des autres auteurs, Sedel a montré que la chirurgie pratiquée pouvait être pratiquée avant ou après 4 mois sans conséquence. Au delà de 9 mois, il signale des baisses de résultats [32]. L'attitude raisonnable semble celle de Dubuisson et Kline [33] qui recommandent d'attendre 5 mois pour avoir une bonne fiabilité de l'électrophysiologie peropératoire. La chirurgie est alors forcément bénéfique, au pire pour neurolyser le plexus après son évaluation et ainsi accélérer la récupération.

Dans aucun cas, l'attentisme n'est conseillé au delà de 5 mois, le coude étant particulièrement sensible à ce critère. Nous avons pourtant dans notre série nantaise un patient ayant récupéré une motricité à M3 du coude, bien qu'opéré à 16 mois. Nous avons également été confronté à 3 patients ayant spontanément récupéré un certain degré de motricité du coude la veille de la neurotisation du coude:

- 1 patient déficitaire C5C6C7, 16 ans, observé à 10 mois: résultat définitif M4.
- 2 patients déficients complets, 32 et 20 ans, observés à 15 et 5 mois: résultat définitif M2 et M3.

Le résultat est intéressant pour le premier patient. On aurait pu espérer mieux pour les 2 autres patients. Ces trois exemples de patients accompagnés dans leur récupération spontanée sont difficiles à interpréter: une récupération incomplète à M2 ou M3 est-elle suffisante pour justifier la surveillance? Certains auteurs préconisant l'intervention précoce répondent «non». Ils justifient la brièveté du délai opératoire par un meilleur résultat fonctionnel chirurgical précoce que spontané tardif.

Les spécialistes du plexus brachial obstétrical insistent sur cette notion, dont on peut s'inspirer pour le plexus brachial adulte: chez l'enfant, le critère opératoire est la flexion clinique du coude à 3 mois. Lorsque l'indication manque ce délai, une récupération spontanée survient toujours vers 5-6 mois. Ce début de récupération est un leurre pour les parents et les cliniciens qui hésitent dès lors à sacrifier un nerf en cours d'amélioration. Le résultat final de ces évolutions spontanées est en réalité médiocre, et l'effort pédagogique de ces auteurs [34] porte sur l'importance de convaincre les parents de «sacrifier» ce nerf qui récupérera trop incomplètement à terme.

Dans la même idée chez l'adulte, Merle insiste sur la prépondérance de la clinique sur l'électrophysiologie pour juger de la récupération en préopératoire. Selon lui, quelques fibres nerveuses suffisent pour obtenir un pseudo-tracé de réinnervation, mais pas pour récupérer cliniquement de façon satisfaisante. nous avons effectivement souvent été confronté à un tracé EMG prometteur initialement, mais conduisant à une intervention quelques mois plus tard pour mauvaise récupération spontanée.

La prédiction de la récupération spontanée peut également inclure d'autres facteurs. Nous allons voir dans les paragraphes suivants que la détermination du statut anatomique radiculaire est fiable

(par combinaison des indices cliniques et paracliniques). Une fois établi le statut anatomique de chaque racine, la difficulté consiste à déterminer la probabilité de récupération spontanée en fonction du statut radiculaire. Nous avons vu le cas des patients sans aucune avulsion (Nagano). Concernant les cas où on retrouve une ou plusieurs racines arrachées, on peut se reporter à l'analyse de Kline.

Selon son expérience, la présence d'une avulsion radiculaire n'empêche pas une récupération clinique satisfaisante à terme, mais il n'est pas décrit de cas de récupération avec 2 racines avulsées. Il est donc important de repérer et de dénombrer les avulsions radiculaires (2 avulsions certaines devraient conduire à une intervention précoce), et ce précocement pour réserver un rendez-vous opératoire immédiat aux indications évidentes, plus éloigné pour les indications litigieuses.

1-valeur prédictive des indices cliniques.

On peut utiliser différents indices cliniques:

-La présence d'un signe de Claude-Bernard-Horner (enophtalmie, myosis, réduction de la fente palpébrale, hyperhémie conjonctivale).

Elle est un argument fort d'avulsion C8 et/ou T1. Sa valeur prédictive positive est de 96% pour assurer une avulsion radiculaire [22]. La présence de ce signe isolé a conduit Bertelli à 10% d'erreur sur la prédiction peropératoire des racines C8 et T1 (racines anatomiquement préservées). Narakas retrouvait également C8 ou T1 intactes dans 10% des cas de syndrome de Claude-Bernard-Horner [35]. Si ce signe est associé à une forte douleur de déafférentation dans le territoire C8-T1, le taux d'erreur diminue à 6%. Nous parlons ici de racine anatomiquement conservées, en aucun cas de récupération spontanée.

On peut donc résumer la valeur du signe de Claude-Bernard-Horner de la manière suivante: s'il est présent il y a probablement (96%) une avulsion radiculaire C8T1. S'il n'est pas retrouvé on ne peut pas affirmer que C8T1 sont intacts.

-La paralysie diaphragmatique est définie comme une excursion inférieure à 2 espaces intercostaux entre l'inspiration et l'expiration. Elle n'est pas un bon indicateur d'une rupture associée de C5 [22]. En revanche elle est symptomatique d'une lésion des racines impliquant le plexus cervical. Elle doit donc faire hésiter à prélever le nerf spinal accessoire sous peine de voir la fonction scapulothoracique d'être sévèrement déprimée (nous rappelons plus loin que les faisceaux moyen et inférieurs du trapèze reçoivent généralement une double innervation par le plexus cervical, autorisant ainsi le prélèvement du XI sans conséquence majeure sur le muscle). Tous les cas de paralysie diaphragmatique ont montré une lésion de C4 ou du tronc phrénique lors de l'intervention. Il est néanmoins parfois possible (1/3 des cas d'utiliser le moignon rompu de C5 comme donneur de greffe).

-Le signe de Tinel dans la région supraclaviculaire. Le signe est recherché au bord postérieur du muscle sterno-cléido-mastoïdien. Le territoire des paresthésies ainsi évoquées donne le numéro C5

ou C6 de la racine correspondante, rompue dans la région extra-foraminale. Ce test serait fiable pour les examinateurs expérimentés. Sa valeur prédictive positive est de 91% en C5, 72% en C6. Les faux négatifs sont dus à l'enfouissement du moignon entre les muscles scalènes ou à la stimulation de la participation de C4 (fonctionnelle) dans un plexus préfixé. Si le myéloscanner, le Tinel et le test de protraction sont concordants, la prédiction exacte de C5 est de 97% des cas. Il y a 16% d'erreur, même avec l'association au myéloscanner pour prédire l'avulsion de C6.

-Le test de protraction de l'épaule. Il s'agit d'un test permettant d'évaluer la fonction du muscle serratus chez un patient complètement paralysé, car la recherche d'une scapula alata n'est pas possible par les manœuvres habituelles si le patient ne tient pas le membre. Il s'agit en décubitus dorsal de propulser le moignon de l'épaule vers le haut. La sélectivité de ce mouvement pour le serratus a été discuté, en particulier à propos de la participation des muscles pectoraux[36]. En réalité dans le contexte d'une paralysie plexique complète les pectoraux sont déficitaires donc le problème ne se pose pas, de plus les muscles pectoraux ont un rôle accessoire dans ce mouvement. Lorsque ce test est satisfaisant, il est très probable (96%) que les racines C5C6 ne sont pas avulsées et disponibles pour une greffe. Lorsqu'on observe une scapula alata, on a 20% de chance de se tromper en pariant sur une avulsion C5C6.

-La douleur de déafférentation dans la main est connue pour être un signe évocateur d'avulsion radiculaire. Terzis le considère comme un signe majeur de lésion pré-ganglionnaire [37] dans le territoire radiculaire correspondant. Wynn Parry [38] et Bonnard et Narakas [39] retrouvent ce signe comme associé à une avulsion de la racine correspondante dans 90% des cas. La valeur prédictive positive de 96% montre en effet que la présence de ce symptôme signe quasiment l'avulsion. En revanche elle peut assez souvent manquer en cas d'avulsion. Ce signe est influencé par l'âge du patient (les patients plus jeunes développent moins fréquemment de douleurs neuropathiques, ce point étant développé plus loin dans la partie «douleurs»).

La valeur diagnostique des signes cliniques et examens préopératoires est résumée dans les tableaux 11 et 12 tirés de Bertelli [22].

Summary of sensitivity and specificity results in the overall population

Test	Sensitivity	Specificity	Positive Predictive Value	Negative Predictive Value	Accuracy	Likelihood Ratio
Tinel C-5	84.6	66.6	91.6	50	81.2	2.5
Tinel C-6	50	81	72	61	65.6	2.6
protraction test	96.2	80	96.2	80	93.7	4.8
hand pain	85.7	75	96	42.8	87.5	3.4
Horner sign	92.8	75	96	60	90.6	3.7
CT myelography	85.1	60	92	42.8	81.2	2.1

*Summary of nerve root testing results stratified by the number of cases correctly classified**

Variable	Cases Correctly Classified (%)	p Value
C-5 root testing		
Tinel sign	84.3	0.0001
protraction test	90.6	0.0007
CT	93.7	0.0001
protraction & Tinel	93.7	0.0004
protraction, Tinel, & CTM	96.8	0.0002
C-6 root testing		
Tinel sign	59	0.26
CTM	84.3	<0.0001
Tinel & CTM	84.3	<0.0001
C-7 root testing		
CTM	96.8	<0.0001
C-8 & T-1 root testing		
pain	87.5	0.0224
Horner	90.6	0.0030
CTM	100	<0.0001
pain & Horner	93.7	0.0006
pain, Horner, & CTM	100	<0.0001

* CTM = CT myelography.

Tableaux 11 et 12: valeurs diagnostiques des signes cliniques et examens pré-opératoires pour détecter une avulsion radiculaire [22].

Le territoire du déficit sensitif est parfois différent de la systématisation radiculaire habituelle. Cette constatation a déjà été faite par bertelli qui a donc étudié prospectivement le territoire du déficit sensitif chez 150 patients (par comparaison du déficit évalué par filaments de Semmes-Weinstein et le niveau de l'avulsion radiculaire). Les résultats sont présentés dans la figure 23.

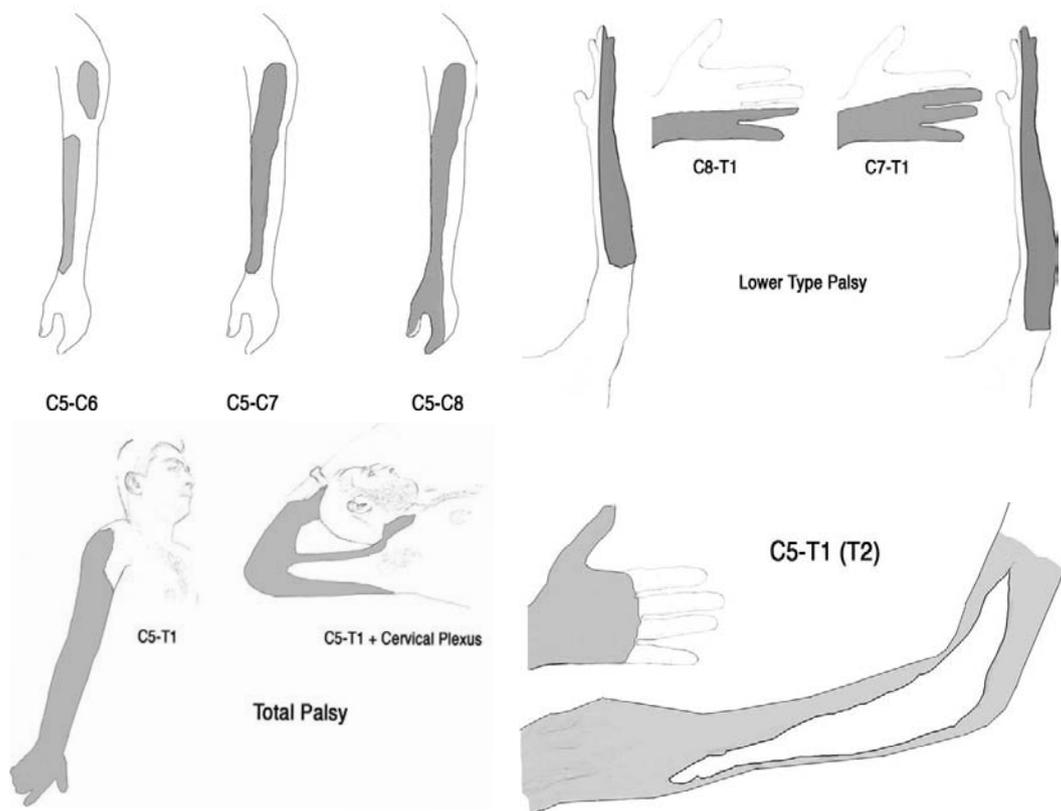


Figure 23: territoire du déficit sensitif en fonction de l'atteinte radiculaire (selon Bertelli [235]).

«C5-T1+cervical plexus»: atteinte du plexus brachial et du plexus cervical.

«C5-T1 (T2)»: atteinte des 5 étages du plexus brachial dans le contexte d'une post-fixation.

On remarque que les atteintes de C6 et C7 ne provoquent pas de déficit sensitif dans la main. Il est également frappant de constater que l'atteinte de C8 ne se traduit pas forcément par une hypoesthésie dans son territoire classique, si T1 est préservé. Ceci est probablement expliqué par le recouvrement des dermatomes. Lorsque la sensibilité des doigts est préservée, ainsi que le territoire du nerf cutané médial de l'avant-bras, on peut suspecter

2-avulsions radiculaires en pré-opératoire: diagnostique et valeur prédictive.

Avant de discuter du diagnostique d'avulsion radiculaire, il convient de préciser l'utilisation de cette information une fois obtenue.

Nous avons vu que l'expérience de Kline montrait une récupération rare dans les cas de lésion partielle comportant une racine avulsée. Ce cas de figure doit donc inciter à une «expectative armée», prête à confirmer assez rapidement l'indication opératoire très probable.

Les cas où l'on ne retrouve pas d'avulsion radiculaire doivent faire évoquer une rupture infraclaviculaire (en fonction de l'analyse clinique), où conduire à vraiment confirmer avec le temps la non-récupération. Nagano montre ainsi que 44% récupèrent spontanément [26] . En revanche, il précise que si les patients n'ont pas atteint M1 dans l'épaule à 9 mois, il récupèrent moins de M3 à terme. Nagano plaide pour un traitement conservateur initialement de ces lésions. On doit remarquer à ce propos qu'il précise plus loin que l'exploration chirurgicale avec

électrophysiologie peropératoire fait partie du traitement conservateur. Il considère ainsi qu'il n'y a qu'un geste de neurolyse sans sacrifice nerveux.

Enfin, les cas où plusieurs avulsions sont retrouvées devraient conduire à une exploration chirurgicale précoce. La récupération spontanée est extrêmement rare, et le délai opératoire influence beaucoup sur les résultats. Une fois ces données connues, l'appréciation du rapport bénéfice/risque de l'intervention précoce n'est plus perçue de la même façon. Le risque opératoire d'une neurolyse exploratoire semble inférieur au risque de mauvaise récupération fonctionnelle, dans le contexte de leur jeune âge et du nombre d'années à vivre. Une intervention précoce permet le diagnostic précis des lésions (aidé par l'électrophysiologie peropératoire) et éventuellement la neurolyse de tous les troncs nerveux. Cette neurolyse accélère la récupération et justifie en soi l'indication opératoire.

La première description pubmed de la myélographie dans le diagnostic préopératoire des avulsions plexiques date de 1954 [40]. Depuis les techniques se sont affinées, jusqu'à la technique la plus performante actuellement: le myéloscanner. Il peut paraître incongru de discuter du myéloscanner à l'heure de l'IRM 3 Tesla, mais l'IRM n'a pas la performance du premier en coupes fines pour déterminer la présence d'avulsions radiculaires. L'IRM est handicapée par 2 types de phénomènes. Non seulement il est assez connu que le flux pulsatile du LCR induit des artefacts en vide de signal, mais également l'IRM est soumise à des impératifs de rapport signal-sur-bruit. Pour obtenir des images IRM, il est nécessaire de réaliser un compromis entre le temps que l'on peut consacrer à l'examen (temps machine et temps d'immobilisation pour le patient) et la taille des voxels imagés. Il est ainsi impossible de recueillir un signal correct dans un temps raisonnable si on choisit une épaisseur de coupe inférieure à 5 mm. Cette résolution n'est pas compatible avec la détection fiable des avulsions radiculaires. Tout au plus peut-on voir quelques avulsions bien placées et les pseudo-méningocèles associés. Il faut préciser que la pseudo-méningocèle n'est pas systématique en cas d'avulsion, et qu'elle peut également survenir en dehors de tout contexte traumatique. Sur le plan factuel, Carvalho a testé la précision diagnostique de l'IRM conventionnelle sur le critère de l'avulsion radiculaire: Il ne retrouve que 52% des avulsions radiculaires peropératoires. Par comparaison, le myéloTDM détectait 75% des avulsions dans la même étude [41]. L'IRM permet de détecter les lésions intramédullaires associées dans 20% des cas aux lésions préganglionnaires (10% des plexus complets ont un syndrome de Brown-Sequard associé). Le T1 avec injection de gadolinium permet de suspecter une lésion préganglionnaire en cas de prise de contraste des muscles paraspinaux[42] (particulièrement le muscle multifidus, figure 24) ou de prise de contraste de la racine[43] (avulsée alors dans 58 à 90% des cas, même en cas d'apparence d'intégrité anatomique). La myélographie en IRM par injection de produit de contraste a été essayée, mais se heurte encore au problème de résolution par rapport signal-sur-bruit.

Le myéloTDM permet de prédire l'avulsion radiculaire dans 81% des cas selon Bertelli, 95% des cas selon Walker [44]. Il remarque que cette technique se trompe plus fréquemment sur l'étage C6 (comme d'autres auteurs). Il fait également remarquer que d'autres auteurs ont montré une sensibilité et spécificité de 100 et 99% de la combinaison du myéloTDM et de la myélographie.

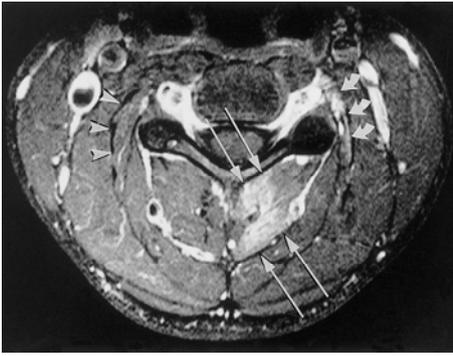


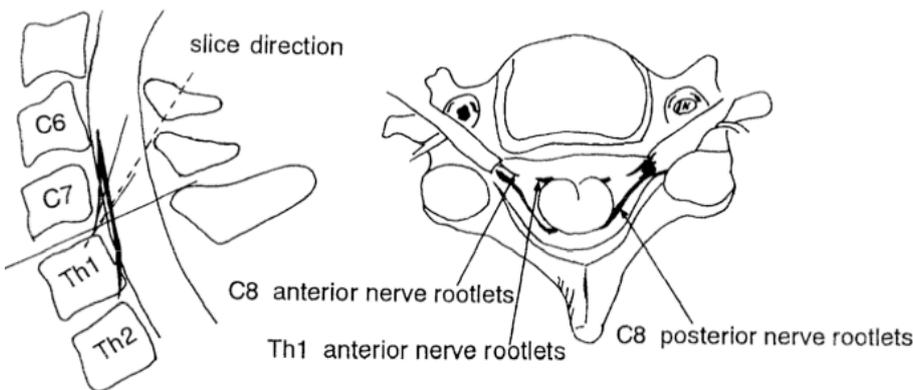
Figure 24: prise de contraste en T1 (FAT-SAT) du muscle multifidus témoignant d'une lésion pré-ganglionnaire associée (tiré de Hayashi [42]).

Quelque soit la modalité d'imagerie réalisée, elle doit tenir compte de l'orientation des racines dans l'espace sous-arachnoïdien. Ochi [45] a étudié la situation des racines et déterminé le meilleur plan d'investigation. Il conseille que le plan axial soit orienté de 40° (de bascule vers l'avant avec le plan vertébral «plateau supérieur/bord supérieur de la lame») pour être bien aligné avec les racines (Figures 25 et 26).

Table 3—Angles of anterior and posterior nerve rootlets to vertebral disc on lateral view of x-p

	<i>Anterior nerve rootlets</i>		<i>Posterior nerve rootlets</i>	
	Min.	Max.	Min.	Max.
C5	32°	78°	13°	58°
C6	44°	78°	25°	60°
C7	67°	81°	31°	64°
C8	75°	83°	40°	66°

Figure 25: orientation des racines par rapport à l'axe «plateau supérieur/bord supérieur de la lame» de la vertèbre correspondante (d'après Ochi [45]).



The relationship between the angle of inclination in the axial oblique plane and the nerve rootlets. When the angle of inclination is smaller than that of nerve rootlets, both the target nerve rootlets and those caudal to it are shown.

Figure 26: représentation de l'orientation radiculaire sous-arachnoïdienne et du plan d'imagerie optimal (d'après Ochi [45]).

stade	description
N	normal
A1	ombres radulaire et radicellaires visualisées mais d'aspect différent des segments adjacents
A2	oblitération de la pointe de la gaine radicellaire (racines et radicelles visibles)
A3	oblitération de la pointe de la gaine radicellaire (racines et radicelles non-visibles)
D	défect (absence de visibilité radulaire)
M	pseudo-méningocèle

Tableau 13: classification myélographique de Nagano [207].

Nagano a établi une classification permettant la lecture des myélographies, toujours valable pour la lecture des myéloscanners. Elle est montrée dans le tableau 13, ainsi qu'un exemple dans la figure 27. Il est possible de remodeler l'image de myéloTDM pour permettre une meilleure lecture, comme dans l'artifice de Bezier, dont un exemple est présenté en figure 28.

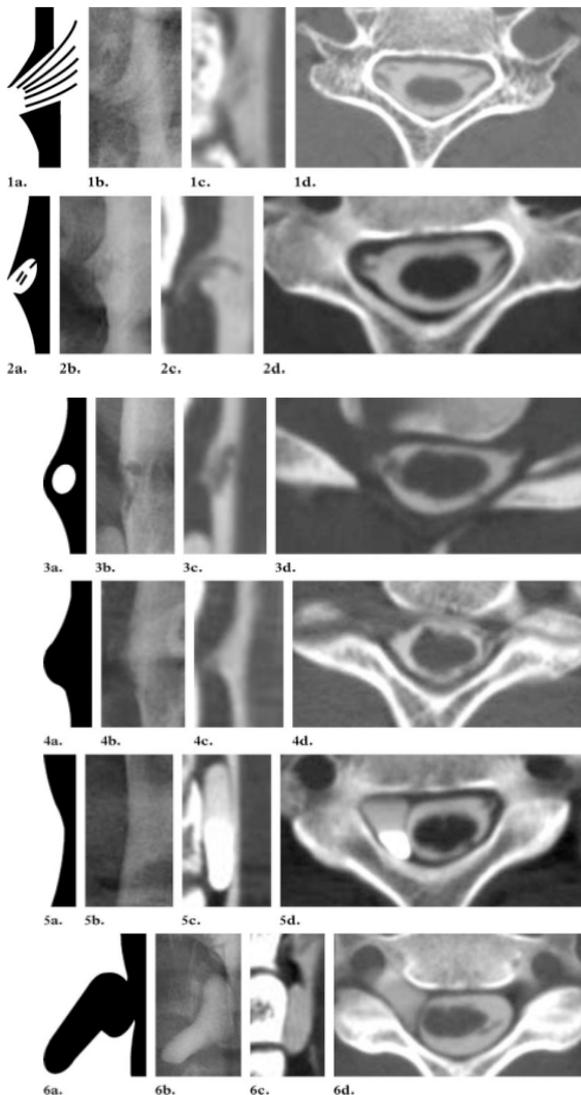


Figure 27: classification illustrée de Nagano (tiré de [208]).

de gauche à droite (a: schéma. b: myélographie. c: myéloTDM coro. d: myélo TDM axial)

- 1: Normal
- 2: stade A1
- 3: stade A2
- 4: stade A3
- 5: stade D
- 6: stade M

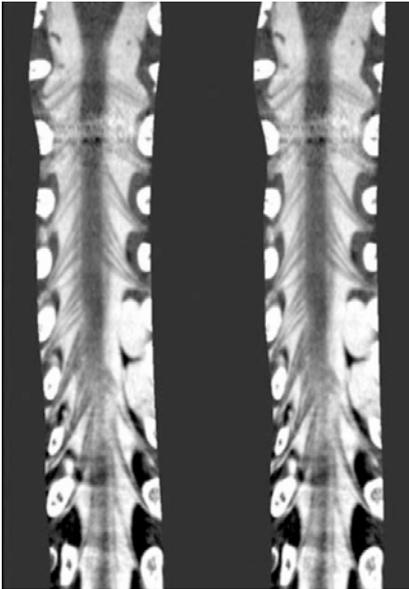


Figure 28: reconstructions par surface de Bezier d'un myélotDM, montrant en une seule image les informations pertinentes.

3-électrophysiologie préopératoire.

L'électrophysiologie pré-opératoire a la réputation d'être longue et difficile pour le neurophysiologiste. En réalité, elle doit répondre à quelques questions simples et ne nécessite pas d'être exhaustive, mais doit préciser certains points clés. Elle doit être réalisée à 3 semaines pour permettre à la dégénérescence Wallérienne de s'exercer.

les objectifs qui lui sont assignés sont:

- 1-déterminer si l'atteinte est préganglionnaire ou postganglionnaire.
- 2-rechercher l'atteinte de muscles clés topographiquement, collatéraux au plexus et qui sont difficiles à analyser cliniquement.
- 3-détecter une réinnervation précoce non visible cliniquement dans les muscles de l'épaule et du bras (critères opératoires).

1-L'électromyographie recherche des signes de dénervation dans les muscles représentant les territoires radiculaires et tronculaires clé (fibrillation de repos). Elle cherche également des signes précoces de régénération. Les muscles biceps, triceps, deltoïde et suprascapulaire sont les plus importants car leur récupération conditionne l'indication chirurgicale.

Au repos, les signes de dénervation sont l'activité de fibrillation. Elle est composée de potentiels de fibre musculaire (activité spontanée des fibres musculaires sous l'influence de leur activité «pace-maker» normalement inhibée par le nerf). On distingue selon la position de l'aiguille aux fibres enregistrées les potentiels de fibrillation (bi-phasiques brefs de 1 ms) et les pointes positives (ayant une forme en dent de scie où la déflexion positive rapide est suivie d'une déflexion négative plus lente).

Un score semi-quantitatif a été défini pour juger de son importance:

- 0: pas de fibrillation
- +: fibrillation provoquée
- ++: fibrillation spontanée
- +++: fibrillation spontanée très importante.

La persistance d'une activité de dénervation, péjorative en début de prise en charge, témoigne lors de la phase tardive de la présence de fibres musculaires fonctionnelles encore disponibles pour la ré-innervation.

Le tracé lors de la contraction volontaire est caractéristique de la dénervation.

La richesse du tracé de contraction sous l'effet du recrutement lors de l'effort est qualifiée selon l'échelle semi-quantitative suivante:

- 0: absence d'activité volontaire
- 1: tracé élémentaire accéléré (1 ou 2 trains de potentiels visibles, correspondant à 80% de perte des fibres motrices)
- 2: tracé simple accéléré (2 à 6 potentiels visibles, correspondant à 60% de perte des fibres motrices)
- 3: tracé intermédiaire accéléré (1 ou 2 potentiels se distinguent encore parmi une activité riche)
- 4: tracé interférentiel normal

On recherche également des signes de récupération motrice précoce, sous forme de grand potentiel (>5 mV) ou de potentiel géant (>10 mV) témoignant de l'augmentation de la présence d'une unité motrice de grande taille par réinnervation collatérale. On peut également observer des potentiels polyphasiques (Figure 30)(par réinnervation collatérale) ou désynchronisés (potentiels de réinnervation ou «naissants» comme dans la Figure 29 à la phase précoce de réinnervation par repousse axonale) .

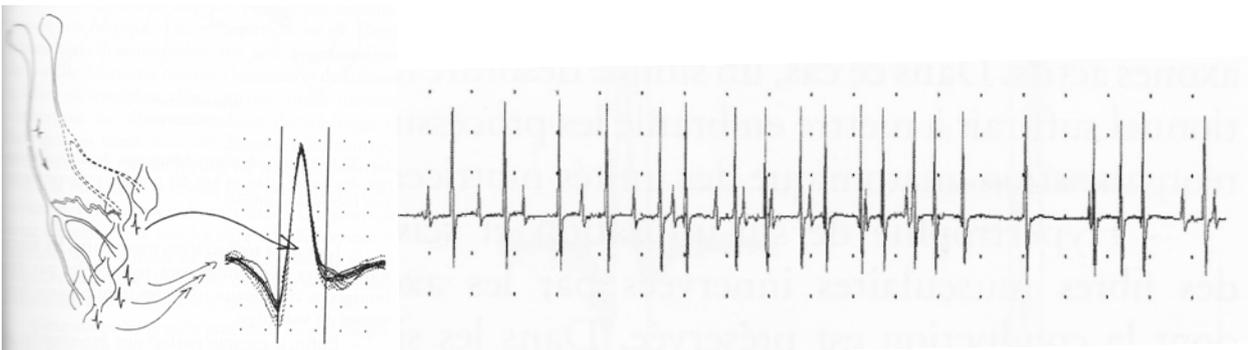


Figure 29: potentiels géants de réinnervation (tiré de Fournier [209]).

*à gauche: augmentation d'amplitude des potentiels d'unité motrice par réinnervation collatérale. deltoïde, poliomyélite. amplitude :13 mV, durée de pointe 3,8 ms, échelle 2mV-2ms/div.

*à droite: potentiels géants d'origine neuropathique. premier interosseux dorsal, atteinte radiculaire C8, amplitude 22 mV, échelle: 5mV-50ms/div.

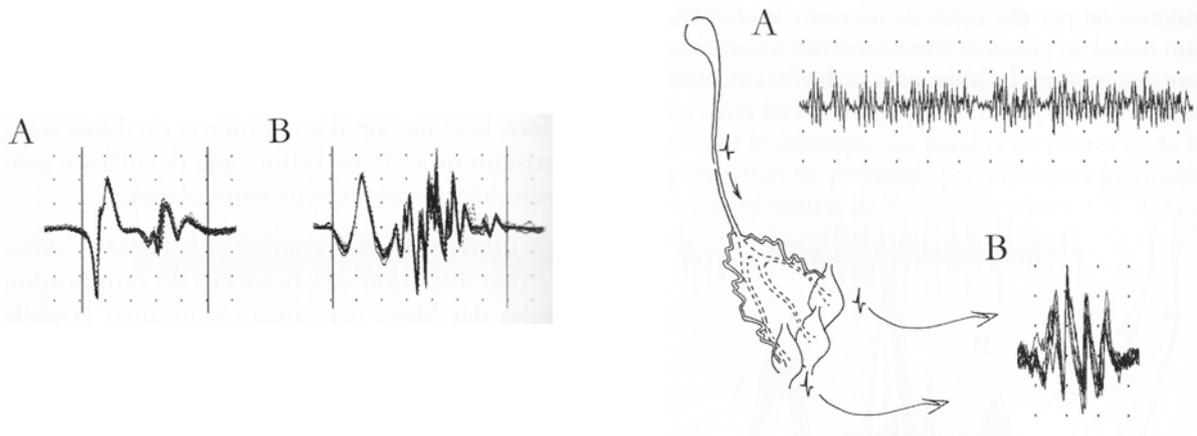


Figure 30: Potentiels polyphasiques, potentiels désynchronisés (tiré de Fournier [209]).

*à gauche: potentiels polyphasique. A: deltoïde après traumatisme du plexus brachial, phases: 6, durée totale: 10 ms, échelle 100 μ V-5ms/div. B: jambier antérieur, atteinte radiculaire L4, phases: 12, durée totale: 34,6 ms, échelle 100 μ V-5ms/div.

*à droite: potentiel désynchronisé de réinnervation. atteinte du circonflexe, deltoïde. A: tracé de contraction d'allure faussement riche, échelle: 50 μ V-50ms/div. B: potentiels polyphasique (9 phases), amplitude: 0,1mV, durée totale: 28,5ms. échelle: 20 μ V-10ms/div.

2-Certains muscles sont difficiles à tester cliniquement, mais la connaissance de leur état est très importante stratégiquement. Il s'agit des muscles:

- serratus (qui oriente vers une atteinte post-ganglionnaire de C5 et/ou C6 en cas d'épargne, qui conduit à une mauvaise fonction scapulothoracique fermant la porte à une arthrodeuse d'épaule)
- petit et grand pectoral (leur préservation signe l'épargne des faisceaux latéraux et médiaux, montre la disponibilité d'un muscle transférable ou d'un nerf transférable).
- trapèze, car la constatation de signes de dénervation minimales traduit la mauvaise qualité du XI comme donneur.
- muscles érecteurs du rachis: une dénervation montre une atteinte juxta-ganglionnaire (assimilée au pré-ganglionnaire)
- rhomboïdes (leur intégrité est importante pour envisager une arthrodeuse d'épaule)
- supra-scapulaire (un des premiers à récupérer avec le deltoïde dans les neurapraxies, en raison de sa situation proximale)

3-enfin, la mesure de la vitesse de conduction nerveuse sensitive est la partie la plus importante de l'examen initial. L'étude des VCN motrices n'a que peu d'intérêt, mais sur le versant sensitif la constatation de vitesses normales traduit une lésion pré-ganglionnaire (avec donc l'absence de dégénérescence des fibres sensitives toujours connectées au corps cellulaire). L'étude sensitive de chaque niveau radiculaire est un élément fondamental de cet examen.

4-diagnostic per-opérateur des lésions (valeur de l'aspect visuel, examen extemporané, électrophysiologie per-opérateur).

La classification peropératoire précise de tout le plexus brachial, à la recherche de ruptures post-ganglionnaires utilisables comme donneurs potentiels, est fondamentale pour plusieurs raisons. Il est d'abord établi que la neurotisation intra-plexuelle est de meilleure pronostique que la neurotisation extraplexuelle pour un muscle donné. De plus l'utilisation d'un donneur intraplexuel (C5, C6 ou C7) permet soit d'envisager la réanimation du poignet car on dispose d'un donneur supplémentaire, soit de préserver la fonction du trapèze ou des intercostaux. Nous pensons qu'en ce cas de figure il est aujourd'hui impératif d'opter vers une réanimation plus ambitieuse tournée vers le poignet et la sensibilité de la main. Enfin cette exploration de tout le plexus permet la neurolyse microchirurgicale de tous les moignons radiculaires, dont ils seraient à l'origine de la composante principale des douleurs du plexus brachial.

La classification visuelle per-opératoire d'une racine donnée repose sur les critères suivants [46]:

avulsion:

- radicelles visibles dans la région foraminale ou extraforaminale.
- ganglion de la racine dorsale visible.
- pas de névrome
- pas de contraction musculaire à la stimulation

neurotmésis:

- apparence normale à l'étage foraminal
- augmentation nette du diamètre nerveux à l'étage juxtaforaminal
- fibrose épineurale
- perte de continuité fasciculaire
- consistance augmenté
- allongement de la racine avec déplacement latéral de la formation du tronc correspondant.
- la stimulation proximale produit des contractions qui ne permettent pas le mouvement contre la pesanteur.

axonotmésis:

- fibrose épidurale
- pas de modification du calibre nerveux après excision de la fibrose périradiculaire
- continuité fasciculaire préservée
- stimulation proximale produisant des contractions permettant le mouvement contre la pesanteur.

Etudier les lésions anatomopathologiques pendant l'intervention suppose selon la littérature un examen approfondi électrophysiologique et/ou au microscope opératoire confirmé par l'examen extemporané. Cette analyse ne transparait pas à l'analyse des compte-rendu opératoires. Enfin, les différents auteurs sont unanimes pour souligner l'importance de l'exploration minutieuse de

l'ensemble du plexus brachial. Les lésions à double niveau (proximal et distal) sont en effet fréquentes, de l'ordre de 5% selon Bertelli.

En per-opératoire, la prise de décision peut être difficile. Pour aider à trancher en cas d'hésitation, plusieurs techniques sont utilisées en routine dans les centres ayant une grande expérience de ce type de chirurgie.

-le recours à la biopsie extemporanée du moignon proximal radiculaire est courant dans un certain nombre de centres.

Le choix d'utiliser une racine comme donneur intraplexuel est ainsi basé sur des éléments déterminés de façon objective:

- quantification de la fibrose intraneuronale
- quantification du nombre de fibres myélinisées dans la tranche de section (coupes congelées, conduisant à l'utilisation de la racine la myéline représente plus de 50% de la tranche de section).
- recherche de cellules ganglionnaires par immuno-histochimie (la présence de cellule ganglionnaire dans la tranche de section implique que la section contient le ganglion postérieur rachidien) pour argumenter une avulsion.
- immuno-histochimie utilisant l'anhydrase carbonique[47] permettant de distinguer les fibres sensitives et les fibres motrices, dans les cas douteux.

-L'électrophysiologie per-opératoire a été essayée à Nantes, sans apporter d'information supplémentaire au prix d'une complexification technique.

Cette technique est pourtant décrite comme fiable et simple avec un minimum d'entraînement. Nous verrons en effet plus loin que l'observation d'une contraction clinique du muscle après stimulation nerveuse est peu fiable. Nous verrons également que l'utilisation de l'usage de l'électrophysiologie pour classer les lésions selon Seddon (axonotmésis ou neurotmésis) permet des résultats fiables et constants. Elle permet de «lire dans le nerf» là où l'évaluation visuelle a montré son imprécision. L'utilisation routinière de l'électrophysiologie en neurochirurgie crânienne au CHU de Nantes devrait permettre d'appliquer les techniques décrites dans la littérature avec une courbe d'apprentissage rapide. Il est possible d'utiliser les PES, PEM à partir des racines, ce qui a été décrit mais ne sera pas développé en raison du caractère standard de la mise en oeuvre (les seules différences par rapport aux cas habituels du service sont la stimulation directe du nerf et l'absence de normes établies). Il est également possible d'enregistrer les potentiels d'action nerveux et potentiels d'action musculaires à travers ou en aval de la lésion suspecté. Nous résumons ici les points techniques importants pour sa mise en oeuvre. Un algorithme de «dépannage» est également donné en annexe pour une utilisation pratique.

Concernant les conditions techniques, le stimulateur est idéalement muni d'une électrode à trois dents avec une terre incorporée. Le recueil des potentiels musculaires (CMAP ou Compound Muscle Action Potential) se fait par électrode cutanée ou aiguille. Le point matériel le plus utile est sans doute l'électrode de recueil nerveux chirurgical, présenté en figure 31, permettant d'enregistrer

les potentiels d'action nerveux (NAP ou Nerve Action Potential). Elle a une forme de double crochet séparés de 2 à 7 mm. Un appareil d'EMG standard est suffisant (il doit juste permettre de délivrer des stimulations courtes de 0,02 à 0,05 ms et des intensités allant jusqu'à 70 V, car les potentiels de régénération ont un seuil élevé et ne répondent pas aux stimulations courtes).

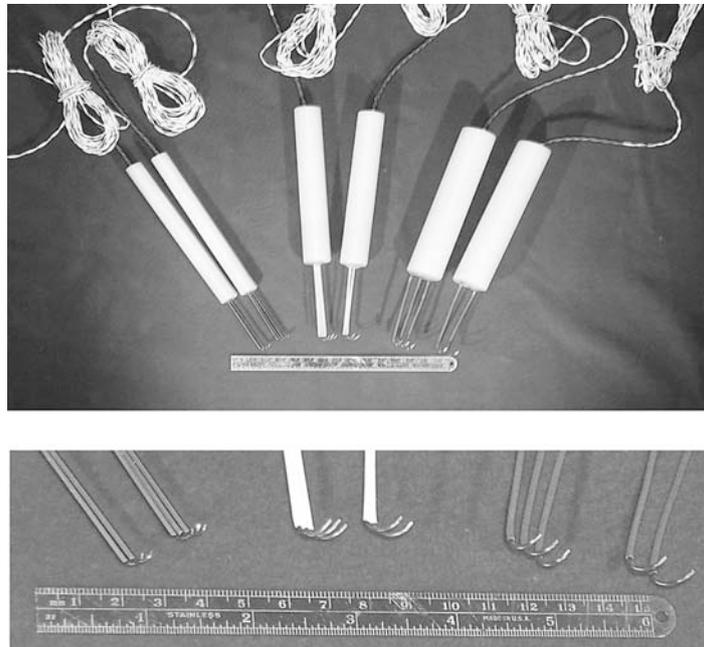


Figure 31: électrodes de stimulation (tripolaire) et de recueil (bipolaire) adaptées à la taille du nerf (tiré de Harper in Deletis [52]).

Les conditions de stimulation sont importantes pour permettre une bonne lecture peropératoire:

- garder des intensités de stimulation faible (sinon il peut exister une diffusion non spécifique de la stimulation à d'autres nerfs fonctionnels, et l'artéfact de stimulation empêche la lecture du potentiel d'action nerveux)
- soulever le nerf hors de l'humidité
- réduire la bande passante en modifiant les filtres passe-bas et passe-haut à 30 et 1000 ou 2000 Hz.
- réglage de la sensibilité à 200-500 μ V/div, base de temps à 0,1-0,5 ms/div.
- moyenner environ 50 traces pour les NAP, car leur intensité est faible
- garder une distance de 4 cm environ entre la stimulation et le recueil (pour éviter que le stimulus ne contamine trop la trace enregistrée). en cas d'impossibilité liée à la taille de l'incision, il est conseillé d'enregistrer en per-cutané par deux électrodes aiguilles sous-cutanées au voisinage du trajet nerveux.
- l'anesthésie doit éviter les curares pour l'enregistrement des CMAP. Les gaz halogénés et les opiacés n'ont pas d'influence sur l'enregistrement. Le garrot (non-utilisé à Nantes) doit être dégonflé depuis 30 minutes.

Le protocole de stimulation d'un tronc nerveux donné est schématisé dans la figure 32. On peut stimuler chacune des racines et enregistrer distalement. On peut également se servir de cette technique pour évaluer les troncs, faisceaux et nerfs terminaux.

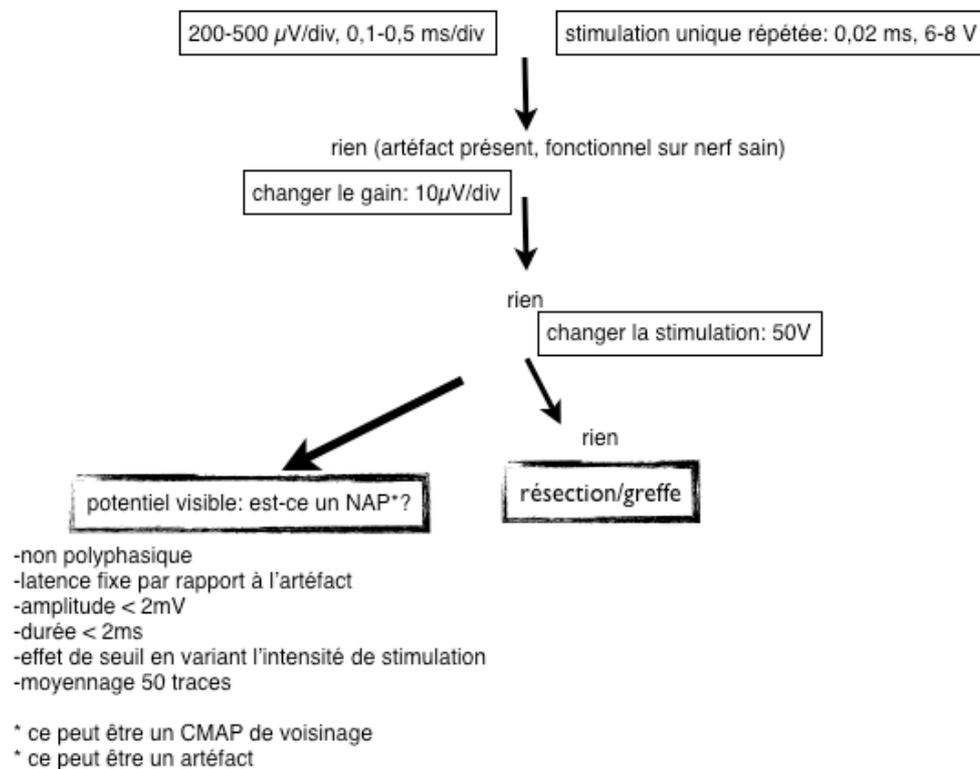


Figure 32: protocole de stimulation pour le recueil du potentiel d'action nerveux (NAP) distalement à une lésion suspectée (d'après Happel et Kline [52]).

Lors de l'analyse d'une lésion plexique, l'aspect du potentiel d'action nerveux est important pour déterminer le type de lésion. Une racine normale donne un potentiel de grande amplitude et de vitesse voisine de 60m/s. Lors des lésions préganglionnaires, on observe un potentiel d'amplitude conservé (car les dendrites sont fonctionnelles car connectées au corps cellulaire) et de latence diminuée (car il ne persiste que les fibres myélinisées de gros calibre). Les potentiels de régénérations sont importants à reconnaître, de faible amplitude et de vitesse moindre. On peut observer un potentiel polyphasique si la racine possède à la fois des lésions de neurapraxie et d'axonotmésis.

L'étude de la conduction des NAP à travers une lésion suspectée peut-être qualitative (présence/absence) ou quantitative (l'amplitude du potentiel d'action nerveux est proportionnel au nombre de fibres myélinisées présentes et fonctionnelles. On doit préciser quelques points résultant de l'expérience clinique sur les patients:

-L'analyse qualitative des NAP pour évaluer une lésion des troncs, faisceaux ou tronc distaux est utile. Elle permet de trancher, dans une lésion en continuité, entre une lésion à réséquer et greffer (neurotmésis), et une lésion à neurolyser (axonotmésis) qui récupérera avec un bon résultat. La détection post-lésionnelle d'un potentiel d'action nerveux est ainsi bien corrélée à la récupération motrice spontanée après neurolyse. Réalisé après trois mois, elle correspond à la présence de 3000 à 4000 fibres myélinisées de plus de 5µm de diamètre. Ceci peut-être appliqué au nerf entier ou à certains fascicules dans le cadre d'une réparation de type «split-repair» (figure X) [48-50]. Pondaag a calculé, dans une population pédiatrique, la sensibilité et spécificité de ce critère pour prédire en peropératoire la mauvaise évolution des lésions (sp=90 à 100%, Se<30%). L'extrapolation des résultats de pédiatrie est délicate car le mécanisme lésionnel et la plasticité est totalement différente. Les bons résultats obtenus par l'utilisation de ce critère dans la décision de neurolyse ou résection montre sa pertinence. C'est Kline qui a popularisé cette technique et qui possède la plus grande expérience dans ce domaine. Il rapporte les proportions de bons résultats (M3 ou mieux) dans la chirurgie des lésions en continuité [51]:

- 94% des patients neurolysés
- 94% des patients traités par «split-repair» ou greffe fasciculaire (figure 33)
- 56% des patients traités par résection/greffe

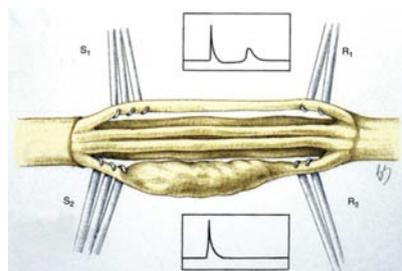
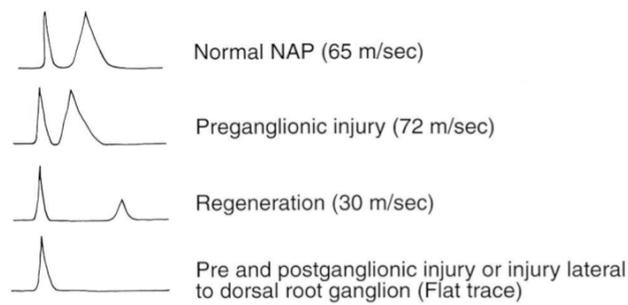


Figure 33: exemple de «split-repair» ou greffe fasciculaire en cas de névrome fasciculaire. Le fascicule névromateux ne conduit pas le NAP, est donc réséqué et greffé (tiré de [244]).

-L'analyse quantitative des NAP et CMAP n'est pas fiable, en tout cas chez les enfants [46]. L'amplitude du potentiel est cependant en rapport avec le nombre de fibres préservées ou en régénération. La latence est théoriquement liée au diamètre des fibres fonctionnelles. Il n'a pas pu être déterminé de valeur seuil pathologique. L'amplitude est en fait bien corrélée à la lésion anatomopathologique (avulsion, neurotmésis, axonotmésis) mais la sensibilité à l'échelle individuelle n'est que de 80%. Il est donc inacceptable de sacrifier à tort une racine en récupération sur cette base de 20%. Néanmoins ce critère mérite d'être vérifié comme un argument supplémentaire peropératoire. On se contente de repérer l'aspect du potentiel qui peut témoigner d'une lésion pré-ganglionnaire, d'une lésion avec régénération en cours ou d'une lésion sans potentiel de régénération (figure 34).



(Oscilloscope settings on 2 mv/0.5 msec with a variety of filters)

Figure 34: les différents aspects possibles du potentiel d'action nerveux, par stimulation directe peropératoire.

-La visualisation de la contraction d'un muscle lors de la stimulation du nerf correspondant n'est pas un reflet fiable de la récupération fonctionnelle du patient à terme [46, 52]. La stimulation synchrone de tous les axones du nerf est susceptible de provoquer la contraction peropératoire du muscle, mais la contraction volontaire clinique du patient à terme n'est pas satisfaisante. La conduction translésionnelle du NAP est un meilleur indicateur.

B-Analyse par secteur

B1- L'épaule

Nous commencerons par exposer quelques éléments de biomécanique de l'épaule importants pour le cas des paralysies.

Ce complexe articulaire de 5 articulations¹ est suspendu, en situation latérale chez l'homme (il est encore en position parasagittale chez le singe). Ceci lui permet de remplir sa fonction principale qui est l'orientation du bras. La scapula, véritable os sésamoïde enchâssé dans la chaîne musculaire thoraco-scapulo-brachiale, est extrêmement mobile, maintenue à distance du pivot sternal par l'arc boutant claviculaire (fonctionnant comme une bielle d'asservissement pour la scapula). On peut noter que les besoins d'abduction chez l'homme ont conduit le tubercule deltoïdien à se «distaliser» au cours de l'évolution pour augmenter son bras de levier.

La syssarcose scapulo-serrato-thoracique est très mobile au bout de la clavicule, sous l'action de muscles pouvant être surmenés conduisant des contractures douloureuses. On distingue artificiellement 5 types de mouvements car ils sont généralement combinés (adduction + rétroimpulsion + sonnette médiale + frontalisation, ou les mouvements contraires):

-élévation/abaissement: 8 à 13 cm.

-adduction /abduction: 15 cm

-sonnette: 60° environ (en réalité ce mouvement n'est que conventionnel mais commode cliniquement).

-bascule antérieure ou postérieure: 15-20°

-frontalisation/sagittalisation: 30°

On voit que les possibilités de mouvements sont importants, supérieurs aux mauvais résultats de neurotisation supra-scapulaire. Les résultats fonctionnels de l'arthrodèse scapulo-humérale sont logiquement élogieux: 60-70° d'abduction, 60° de flexion, 40° de rotation. Globalement la seule syssarcose peut permettre de réaliser un mouvement circulaire de 70 cm de large et 50 cm de haut entre le nombril et le menton. A elle seule, elle permet de mettre la main à la bouche, au périnée et le nettoyage de l'aisselle.

Le mouvement d'abduction est en fait complexe au niveau de l'articulation gléno-humérale. L'abduction du bras tend à faire rouler la tête humérale vers le haut sur le plateau glénoïdien: il s'en suit une ascension de la tête humérale. Pour obtenir un bon centrage de la tête humérale, le muscle supra-épineux tire le tubercule majeur vers le dedans, réalisant alors un contre-mouvement de glissement vers le bas (certains voient également dans ce mouvement de dépression de la tête humérale le rôle des muscles subscapulaire, teres minor et infraépineux). On parle ainsi de mouvement de «roulement-glissement»[53] (figure 35). En raison de ce mouvement vers le bas, le

¹ scapulo-humérale, scapulo-thoracique, sterno-claviculaire, acromio-claviculaire. De Sèze rajoute l'articulation subdeltoïdienne.

centre de rotation de l'articulation change vers 50°: le centre instantané de rotation est légèrement supérieur dans la première partie de l'abduction, et descend dans la seconde partie du mouvement (figure 35).

Le mouvement réel d'abduction de l'épaule fait intervenir la coordination des articulations scapulo-serrato-thoracique et scapulo-huméral. Ceci a été baptisé rythme scapulo-huméral, et la quantité de mouvement n'est pas identique entre les deux articulations dans tous les secteurs de l'abduction [54]:

- secteur 0-30°: scapulo-humérale: 5/6 du mouvement (donc syssarcose 1/6)
- secteur 30-90°: scapulo-humérale: 2/3 du mouvement
- secteur 90-150°: scapulo-humérale: 1/3 du mouvement
- secteur 150-180°: inclinaison du rachis.

Cliniquement, nous avons vu que la cotation motrice de l'abduction est difficile. Nous avons choisi d'attribuer M3 aux patients capables d'effectuer une abduction de 45° contre la pesanteur. D'autres auteurs expriment leurs résultats en angle d'abduction, ce qui est probablement plus fiable. Le critère angulaire de cotation est rarement fourni dans la littérature (quelle amplitude d'abduction doit-on considérer comme «normale»?). D'autre part la participation de la syssarcose scapulo-serrato-thoracique est difficile à évaluer dans le mouvement réalisé par le patient. L'usage de la vidéo se répand progressivement pour mieux analyser le mouvement. Malgré l'attention portée à surveiller le déplacement en sonnette de la scapula, il est ainsi théoriquement possible de réaliser une abduction de 60° avec une ténodèse physiologique de la scapulo-humérale. Ce facteur est susceptible de surestimer les résultats réels de la neurotisation scapulo-humérale. Nous avons choisi de considérer, comme les autres équipes, le mouvement global du complexe articulaire de l'épaule car c'est lui qui importe finalement au patient.

Le mouvement de rotation latérale est évalué cliniquement dans les positions dites R1 et R3 (figure 35). Il consiste également en un mouvement composite de roulement-glissement. Il joue un rôle dans l'abduction en dégageant la tubérosité majeure de l'arche sous-acromiale, et en orientant au mieux la surface articulaire humérale rétroversée contre la glène [55].

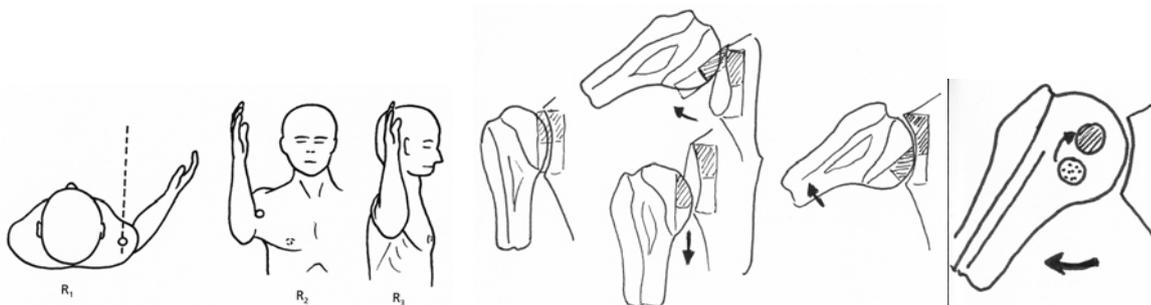


Figure 35 (tirées de [206]):

-gauche: positions dites R1, R2 et R3

-milieu: mouvement de «roulement-glissement»

-droite: modification du centre instantané de rotation au cours de l'abduction.

Les muscles de l'épaule ont été classés selon des critères variables. On distingue notamment les muscles thoraco-scapulaires qui jouent le rôle d'orientation et de placement stable de la scapula. Parmi les muscles scapulo-huméraux, il faut séparer les muscles intrinsèques de la coiffe anatomique des autres (deltoïde et les «trois grands»). La fonction des muscles de la coiffe est essentielle, stabilisatrice statique et dynamique. Les muscles de la coiffe (petit rond, infra-épineux et supra-épineux) ont été comparés à un filet de rétention. Les muscles infra-épineux et petits ronds seraient jumeaux s'ils n'avaient une innervation différente, et ont une fonction de rotation latérale, plus importante pour le muscle infra-épineux que pour le teres minor [56]. La neurotisation combinée du nerf axillaire et du nerf supra-scapulaire est donc susceptible d'obtenir de meilleurs résultats que la neurotisation isolée de l'un ou de l'autre nerf isolément sur le plan de la rotation externe.

Goldner a classé les muscles de l'épaule en 4 groupes fonctionnels [57]:

- groupe 1 «initiateur du mouvement»: deltoïde et chef claviculaire du grand pectoral.
- groupe 2 «stabilisateur»: supra-épineux, infra-épineux, subscapulaire.
- groupe 3 «dépresseur»: grand dorsal, grand rond, grand pectoral, et biceps/triceps indirectement.
- groupe 4 «stabilisateur accessoire de la scapula»: petit pectoral, serratus antérieur, trapèze, rhomboïdes et élévateur de la scapula.

Pour simplifier, on peut considérer qu'un mouvement harmonieux d'abduction, de flexion et de rotation nécessite surtout une coiffe des rotateurs (supra et infra-épineux, teres minor et subscapulaire), et un deltoïde [58].

Le muscle supra-épineux est lui plus important. L'histoire lui a attribué plusieurs rôles. Il fut d'abord le «starter de l'abduction»: cela est faux, comme l'a montré Revel [59]. Il est en effet actif en coopération avec le deltoïde pendant toute l'abduction. Le rôle le plus important du supra-épineux est d'abaisser la tête humérale pour permettre au deltoïde d'exercer son action favorablement. La réinnervation isolée du nerf axillaire risque donc de se heurter à ce problème de centrage de la tête humérale (avec la perte d'efficacité allant de pair, comme dans les ruptures de coiffe). Le coeur lui a attribué le rôle de ménisque envers l'acromion [60] par son tendon aux fibres denses, épaisses et entrecroisées de façon pennée. Il est important de noter pour le sujet des paralysies plexiques qu'il joue le rôle de suspenseur de la tête humérale et qu'il est suspenseur de la capsule à laquelle il est accolé [61]. Son activité est maximale en EMG entre 90 et 100° d'abduction[62].

Le mouvement d'abduction est freiné par la capsule inférieure et les muscles adducteurs initialement. Le ligament gléno-huméral inférieur est lui aussi un frein, et explique la rotation latérale automatique qui s'applique lors de l'abduction.

Le corollaire de la modification du centre instantané de rotation est la modification de l'action des muscles adducteurs. Ils prennent ainsi un rôle non négligeable dans l'abduction, notamment au delà de l'horizontale. Narakas cite le cas de plusieurs patients ainsi capables d'une abduction complète par le grand pectoral sans l'aide du deltoïde paralysé [35]. Il peuvent être des appoints utiles en cas de récupération ou d'épargne partielle, et leur renforcement doit être alors demandé en rééducation.

Dans le détail, on voit apparaître une action abductrice accessoire des muscles suivants lors du mouvement d'abduction [59] :

-le subscapulaire à partir de 35° d'abduction

-les muscles grand pectoral, dorsal et rond à partir de 50° (leur activité augmentant jusqu'à 90°).

-la longue portion du biceps participe également à l'abduction si il est orienté dans l'axe du mouvement (en rotation latérale) [63].

La stabilité de l'épaule est reconnue comme le préalable à la mobilisation des articulations plus distales du membre. Il est ainsi admis que la flexion du coude est améliorée par la stabilité de l'épaule. L'importance de la fonction de l'épaule comme plate-forme de fixation pour les autres articulations justifie qu'elle soit la priorité de la reconstruction du membre. Nous n'avons pas retrouvé de corrélation entre le résultat moteur de l'épaule et celui du coude ($p=0,3865$). Il s'agit bien entendu d'une très faible puissance. Beaucoup d'auteurs rapportent leurs résultats sur la fonction de l'épaule en précisant les proportions de patients atteignant une force de M2, car ils la jugent très utile: la fonction de stabilisation de l'épaule est acquise. Evidemment la fonction de d'abduction est importante pour ouvrir la pince thoraco-brachial, permettre l'hygiène de l'aisselle. L'abduction permet également de porter la main à la bouche dans une position favorable, en l'absence de prono-supination. Dans les meilleurs résultats, elle permet de mettre la main à la nuque ou à la tête pour tenir un peigne par exemple. La rotation latérale est la dernière fonction que l'on obtient. Même si elle est rarement obtenue, elle est indispensable à un mouvement utile car elle permet de dégager la main du frottement contre la paroi thoracique lors de la flexion du coude. Dans le même ordre d'idée, elle est capitale comme appoint de la flexion car elle permet d'orienter le membre fléchi, en présentant la main à l'environnement. Il est donc totalement inutile de parler de réanimation de la main si la rotation externe n'est pas acquise. Pour l'obtenir, la neurotisation ciblant les muscles infra-épineux (nerf suprascapulaire) ou teres minor (nerf axillaire) est la solution prioritaire. Il ne faut également pas négliger les transferts musculaires secondaires de renforcement ou l'arthrodèse d'épaule en cas d'échec complet.

Le nerf supra-scapulaire est volumineux, naît du tronc supérieur ou du faisceau postérieur près de son origine, longe le ventre inférieur de l'omo-hyoïdien et rejoint ainsi l'artère supra-scapulaire. Il pénètre l'incisure supra-scapulaire sous le ligament transverse supérieur de la scapula pour gagner la face post de la scapula, innerver le supra-épineux, puis contourner l'épine scapulaire pour se terminer dans l'infra-épineux. Il contient généralement 3500 fibres myélinisées [64]. Chirurgicalement, il est habituellement repéré proximale au départ de son origine en s'aidant du rapport au muscle omo-hyoïdien. Il est ensuite suivi distalement, en général aidé par la palpation au doigt dans l'incisure supra-scapulaire. Bertelli [65] suggère de l'aborder directement en prolongeant l'incision supraclaviculaire vers l'acromion. La section d'une partie des insertions du muscle trapèze permettant de contrôler le nerf directement, libérant ainsi le ligament et vérifiant l'absence de double lésion. MacKinnon [66], Guan [67] et Bhandari [64] proposent une seconde incision en regard du bord supérieur de la scapula. Le nerf supra-scapulaire peut être lésé à deux étages dans 30% des cas selon Mikami [68] Terzis précise les sites habituels où l'on retrouve une

lésion [69]: à son départ du tronc supérieur, dans l'incisure supra-scapulaire ou lors du contournement de l'épine scapulaire sous le ligament inférieur de la scapula. Evidemment, une double lésion est particulièrement suspectée en cas de fracture de la scapula. Enfin, il est important lors de l'approche dorsale de vérifier s'il n'existe pas (comme dans 60% des observations de Bhandari [64]) de branche destinée au supra-épineux naissant 2 à 2,5 cm proximale à l'incisure supra-scapulaire.

Le résultat des différentes études retrouvées dans la littérature est donné dans les pages suivantes (tableau 14). Les principaux résultats des grandes équipes mondiales y sont présentés. Quelques résultats n'ont pas été inclus dans ce tableau. Ils présentaient un effectif trop faible, ou les résultats de techniques différentes étaient mélangés.

auteur	période	revue	année publication	localité	nombre (total > retenus)	modalité	M3	M4	âge	délai	proportion plexus complets	proportion plexus sup				
Narakas	*	clin orthop	1988	Lausanne	269 > 22	XI-SS	36%		*	*	*	*				
Alnot	1983-1987	rev chir orthop traum	1992	Paris	50 > 28	XI-SS ou C5/SS	60%		24,5	5	100%	0%				
Chuang	1987-1991	plast recon surg	1995	Taipei	99 > 5	phr-SS	100%									
					99 > 6	phr-ax	0%									
					99 > 24	XI-SS	*								*	
					99 > 23	XI-ax	100%									
					99 > 4	IC-ax	100%									
Alnot	*	microsurg	1995	Paris	*	XI-SS	50%		*	*	*					
Nagano	*	ann acad med Singapore	1995	Tokyo	112 > 7	IC-ax & phr-SS	57%		*	*	*					
Alnot	1984-1994	rev chir orthop traum	1998	Paris	70 > 22	XI-SS	22%	40%	30	8	0%	100%				
					70 > 11	C5-SS	27%	18%								
Millesi	*	in: management of peripheral nerve problems	1998	Vienne	12	XI	66%		*	*	*	*				
Nagano	*	J orthop science	1998	Tokyo	7	phr-SS + IC/ax	88%		*	*	*	*				
Sedel	1980-1991	JBJS	1999	Paris	78 > 3	C5-ax	66%		33	5,4	100%	0%				
					10	phr-SS	41°		*	*	*	*				
Sungpet	*	aust NZ J surg	2000	Bangkok	62 > 19	IC-ax	21%	0%								
					62 > 8	XI-ax	12,50%	0%								
					62 > 7	TD-ax	28%	0%								
					62 > 7	pect med-ax	28%	0%								
					6	XI-SS	16%	33%	28	5	54%	46%				
Merrell & wolfe	1991-1999	JHS	2001	New haven	7	XI-SS + C5/C6-ax	85%									
Luedemann	1980-1999	JNS	2002	Hannovre	19	phr-SS	15%	58%	25	*	100%	0%				
					7	triceps (longue port°)	0%	100%	25	7	0%	100%				
leechavengvongs	2000-2001	JHS	2003	Bangkok	10	triceps-ax + XI-SS	70%	30%	*	*	0%	100%				
					53 > 11	C5-SS	9%	0%	26	4,2	73%	27%				
Bertelli	*	JHS	2004	Florianoapolis	53 > 13	C5- (SS & ax)	7%	7%	25	5	54%	46%				
					53 > 21	XI-SS	14%	10%	24	4,3	43%	57%				
					542 > 266	phr-SS ± C5-DPTS	60°		*	*	*	*				
Matlessi	*	JNS (focus)	2004	Leiden	577 > ?	XI-SS	80%									
					577 > ?	XI-ax	74%									
Chuang	1990-2000	Hand clinics	2005	Taipei	151 > ?	phr-SS	75%		*	*	*	*				
					151 > ?	phr-ax	66%									
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	92 > 59	XI-SS	79%									
					92 > 24	XI-SS + C5/C6-ax	65° abd, 52° RE									
					92 > 18	XI-SS + IC-ax	43° abd, 28° RE									
					92 > 16	C5- (SS & ax)	61° abd, 47° RE									
					92 > 9	XI-SS + C3/C4-ax	40° abd, 25° RE									
Terzis	*	microsurg	2006	Norfolk	92 > 5	XI-SS + C7c-ax	50° abd, 34° RE									
					118 > ±80	XI-SS	72%									
Terzis	1978-2002	plast recon surg	2006	Norfolk	118 > ±72	XI-SS + —/ax	86%		25,5	12,5	>17,8%	*				
					11	XI-SS (abord post)	62°									
Guan	2003 2002	chinese med J	2006	Shangai	26	XI-SS	51°		27,8	5,5	20%	80%				
					26	XI-SS	51°									

auteur	période	revue	année publication	localité	nombre (total > retenus)	modalité	M3	M4	âge	délat	proportion plexus complets	proportion plexus sup	remarque
leechavengvongs Malungpaishrope	2000-2002 *	JHS	2006	Bangkok	15	triceps-ax + XI-SS	13%	77%	27	6	0%	100%	7
Bertelli	*	JHS	2007	Bangkok	2	IC-ax (abord post) + XI-SS	0%	100%	17	7	100%	0%	8
Cardenas-mejia & Chuang	2000-2004	plast recon surg	2008	Taipei	30 > 14 30 > 16	(tric-ax ou bell-SS) + XI-SS XI-SS	8% 18%	92% 0%	26 24	6 5	0% 100%	100% 0%	9 10
Sulaiman & Kline	1995-2005	neurosurg	2009	New Orleans	90 > 16 90 > 13 90 > 5	phr-SS XI-SS phr-C5	80° abd 77° abd 50° abd						
Bertelli	2006-2007	JHS	2010	Florianoopolis	90 > 13 90 > 8 90 > 3	phr-SS + C5-DPTS phr-DPTS + XI-SS (phr & XI) -C5 (phr & XI & PCP) -C5	120° abd 80° abd 142° abd 160° abd		29	< 5	45%	55%	11
Vekris	1998-2007	injury	2010	Ioannina	81 > 57 81 > 8	XI-SS TD-ax	35% 36%	42% 25%	32	*	21%	79%	12
Bhandari	2007-2008 2005-2006	JHS	2011	Pune (Inde)	50 > 22 57 > 30	XI-SS XI-SS	95% 90%		23	5 (3-11)	100%	0%	13
Robert & Touchais	2000-2010	*	*	Nantes	57 > 7 57 > 3 57 > 15 57 > 3 57 > 5	C5C6-SS PCP > SS (C5 ou triceps)-ax phr-ax (C5 + phr/cerv) -ax	85% 66% 66% 66% 40%		28,5	4,7	*	*	14
					14 21	XI-SS (abord post) XI-SS	92% 76%		26,2 *	5,1 *	0% 0%	100% 100%	
					24 > 18	XI-SS	28%	44%	24,5	8,6	66%	33%	

Tableau 14: stratégies et résultats des différentes équipes concernant la neurotisation de l'épaule. [35, 83, 88, 91, 97, 118, 199, 215, 220, 222, 236-239][6, 64, 65, 67, 69, 84, 85, 87, 96, 226, 227, 230, 242, 243]

TD: nerf thoraco-dorsal, DPTS: division postérieure du tronc supérieur, phr: nerf phrénique, PCP: plexus cervical profond

-nb: certains résultats ne sont pas retenus dans ce tableau: il n'est pas possible de différencier le résultat de la neurotisation du geste orthopédique complémentaire (Alnot), les résultats ne sont pas chiffrés (Birch, spinner&Shin), où les séries ne sont pas standardisées (Kawai).

1: d'après Terzis

2: abduction 110°, RE 30° dans 57% des cas.

3: concernant la RE: M3 50%, M4, 20%

4: abduction 70°, RE 30° si succès, environ à 17,5 mois pour M3

5: 70° abduction 30° RE dans bons résultats, 8 mois pour M3

6: 70° abduction et flexion

7: abduction 115°, RE 97°

8: abduction 100°, RE 95°

9: 105° abduction, 105° RE

10: 45° abduction, pas de RE

11: inclus 8% de lésions non-traumatiques (tumorale, radique, obstétricale, iatrogène, couteau)

12: abduction 57°

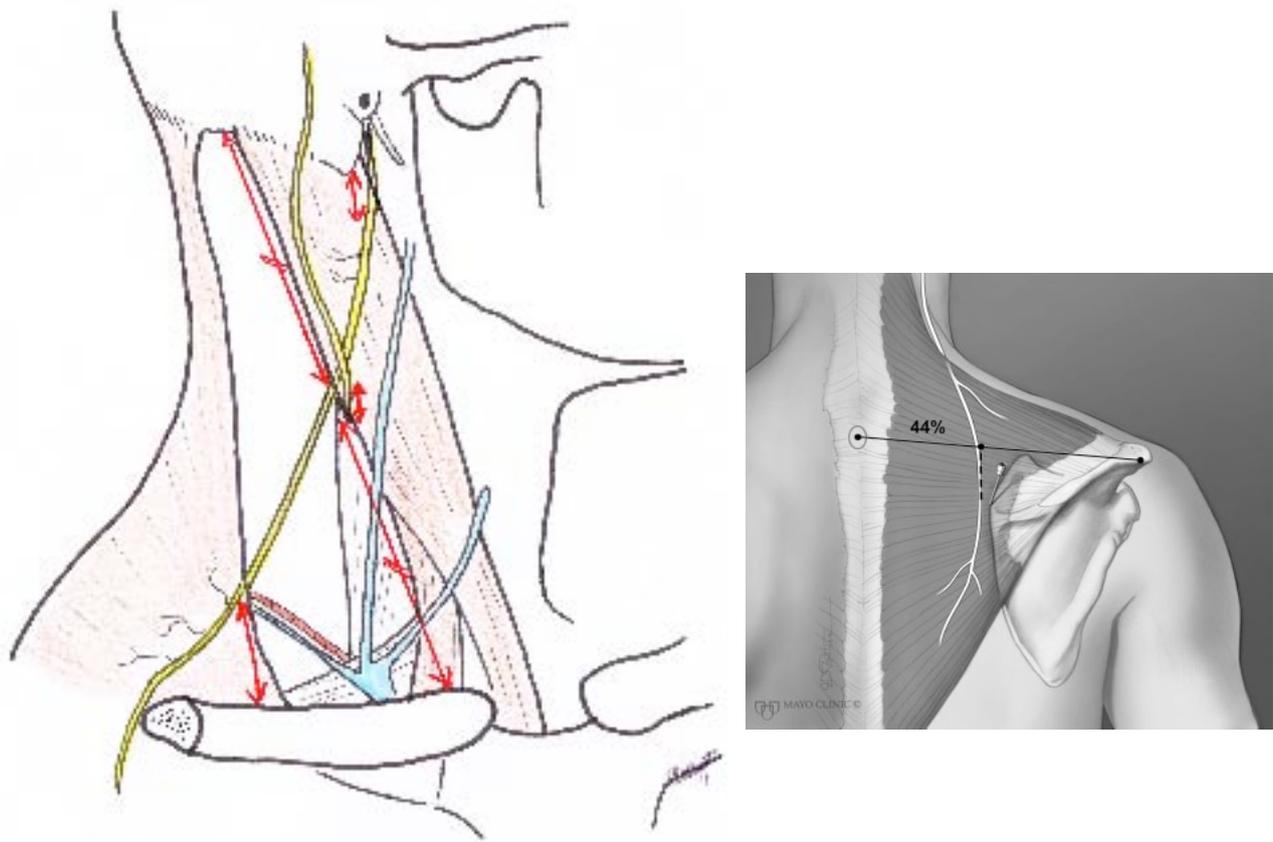
1° neurotisation spino-suprascapulaire (XI-SS)

La neurotisation spino-suprascapulaire (XI-SS) est probablement la moins controversée. Elle consiste à anastomoser la partie distale de la branche externe du nerf spinal accessoire sur le nerf suprascapulaire. Compte tenu de la fréquence de ce geste, nous revenons sur quelques éléments anatomiques et chirurgicaux, avant d'envisager les résultats, avantages et inconvénients de cette technique

Le nerf spinal a déjà été utilisé depuis la fin du XIX^e siècle pour les neurotisations du nerf facial [70]. La première description dans les lésions du plexus brachial est faite en 1913 par Tuttle [71], en évoquant cette option comme une pratique de son temps. L'utilisation courante dans la chirurgie du plexus brachial démarre avec les chirurgiens japonais et notamment Kotani dans les années 1960 [72]. En Europe, c'est Allieu [73] et Merle qui expérimentent cette technique les premiers, suivis par Narakas.

Nous ne revenons pas sur les notions classiques d'anatomie concernant le XI^e nerf crânien, mais choisissons de nous focaliser sur quelques détails utiles à son prélèvement chirurgical et son utilisation dans la chirurgie du plexus brachial. Il est composé de 1300 à 1600 fibres myélinisées à son site de prélèvement pour l'utilisation comme donneur (entre les faisceaux supérieur et moyen du muscle trapèze)[15, 64, 74, 75].

Son anatomie topographique est résumée dans les figures 36 et 37. On peut retenir selon Chammas[76] que le nerf pénètre le muscle sterno-cléido-mastoïdien 3 cm sous le processus mastoïde, pour le quitter à mi-hauteur du muscle. En situation per-opératoire, on peut se repérer sur le nerf grand auriculaire au trajet caractéristique : le nerf accessoire quitte le muscle immédiatement au dessus du point de superficialisation du nerf grand auriculaire. Il pénètre le muscle trapèze 3 à 5 cm au dessus de la clavicule. Bertelli suggère de se repérer sur les vaisseaux cervicaux transverses (que l'on découvre dans le même plan que le muscle omo-hyoïdien et qu'il faut lier au cours de la rétraction latérale du coussin adipeux superficiel au cours de l'abord du plexus brachial). Ils croisent en effet le nerf à ce niveau de façon constante. La première branche destinée au trapèze (à respecter lors de la chirurgie) se trouve à 3 cm (1 à 5 cm d'une ligne imaginaire reliant l'épineuse de T1 et le bord latéral de l'acromion. Vu dorsalement, le nerf accessoire se projette d'ailleurs à 45% de la distance entre ces deux points [77]. Le stimulateur permet également de retrouver le nerf rapidement dans les cas difficiles.



Figures 36 et 37: références topographiques pour le repérage du nerf accessoire

- entrée dans le muscle SCM 3 cm sous le processus mastoïde.
- sortie du muscle SCM à mi-hauteur, 1 cm au dessus du nerf grand auriculaire.
- entrée dans le muscle trapèze 3-5 cm au dessus de la clavicule, en croisant les vaisseaux transverses du cou.
- projection sur une ligne verticale à 45% de la distance «ligne épineuse/acromion».

Concernant la fonction réelle du nerf accessoire, l'étude des patients victimes de lésions du nerf montrent une grande variabilité des conséquences cliniques. La suppléance par le plexus cervical profond pour les faisceaux inférieur et moyen en est sûrement la raison. En revanche la paralysie du faisceau supérieur empêche toute abduction de l'épaule au-delà de 90°. Il existe également un abaissement de l'épaule car le muscle élévateur de la scapula est insuffisant pour une telle compensation. C'est sur cet argument que certains auteurs répugnent à son utilisation (Sedel, Millesi, Morelli, Gilbert) en raison du sacrifice partiel qu'il impose à la fonction de l'épaule. Oberlin note par exemple que les possibilités d'élévation par arthrodèse secondaire passent de 68° à 41° en cas de prélèvement préalable du nerf accessoire. Narakas a évalué sur 20 patients le diamètre moyen du muscle trapèze après le prélèvement du nerf spinal accessoire. Il relève un diamètre moyen de 3 cm du côté opéré (contre 5 cm du côté sain). La conservation chirurgicale de la première branche du trapèze et la double innervation par l'anse de Moberg permettent en théorie de préserver l'importante fonction du trapèze supérieur. Bonnard et Narakas ont constaté également qu'après neurotisation spino-suprascapulaire, le trapèze supérieur n'est cliniquement jamais dénervé et qu'après un an on obtient une trophicité de moitié de celle du muscle opposé sain. Les portions moyenne et inférieure du muscle sont cliniquement paralysées dans 80% des cas en

postopératoire immédiat. Le trapèze moyen récupère «de façon tout à fait valable» dans la moitié des cas après 2-3 ans, plus rarement pour le trapèze inférieur [70].

Pour son prélèvement, Bertelli [78] propose une modification technique qui permet de retrouver le nerf dans un plan de dissection avasculaire, et de le disséquer plus distalement (évitant ou réduisant la greffe d'interposition). Cette variante dans l'approche a également été adoptée par d'autres [79]. Il s'agit d'inciser le fascia antérieur du muscle trapèze à son bord antérieur en partant de la clavicule vers le haut. Le trapèze supérieur est ensuite désinséré de la clavicule jusqu'à l'acromion. Enfin le muscle platysma est soulevé vers l'extérieur comme on tourne une page d'un livre, ce qui découvre le nerf accessoire et ses branches destinées au trapèze. La première est conservée pour préserver la fonction du trapèze supérieur, mais les suivantes sont sectionnées pour permettre de prélever le nerf le plus distalement possible. L'auteur atteint ainsi le nerf à hauteur de l'angle médial de la scapula. Obtenir la plus grande longueur du nerf est très important pour que la période de dénervation du muscle cible soit la plus courte possible et que la suture se fasse sans greffon ou sans tension. Terzis [80] a montré que les résultats de la neurotisation du nerf supra-scapulaire sont logiquement meilleurs quand la neurotisation est directe (59° d'abduction moyenne) qu'avec une greffe d'interposition (47°). Songcharoen insiste également pour le disséquer le plus loin possible (avant qu'il ne plonge dans le trapèze inférieur) [6]. Comme la plupart des auteurs, il préserve 2 des 3 branches du trapèze [81].

L'anastomose directe est possible sur le SS dans 2/3 cas par la technique de prélèvement classique [80] sur 92 cas. Bertelli obtient 100% d'anastomoses directes par sa modification technique du prélèvement (26 patients) [78]. Cet objectif est important car l'interposition d'une greffe réduit les taux de bons résultats de 12% [69]. Plus exactement, la longueur de la greffe influence le résultat (-7% pour une greffe de 3 à 6 cm, -22% pour une greffe de plus de 7 cm).

Une autre modification notable a été proposée pour maximaliser le prélèvement du nerf accessoire [64, 66, 75, 82]. Il s'agit d'une approche postérieure qui permet aussi le transfert combiné d'une branche tricipitale sur le nerf axillaire, de contrôler et transposer le nerf supra-scapulaire. L'approche antérieure classique permet d'obtenir 2,1 cm de nerf accessoire mobilisable. L'approche postérieure fournit 12,4 cm de nerf accessoire mobilisable. Cette longueur considérable permet de le projeter loin pour une anastomose avec la plupart des troncs terminaux du plexus (figure 38), mais aussi très distalement sur le nerf supra-scapulaire. Le résultat ne peut qu'être meilleur tant la diminution du temps de dénervation est raccourcie. La récupération clinique est plus rapide (28 semaines contre 34 semaines [64]).

En revanche le nombre d'axones myélinisés sur la tranche de recoupe pourrait diminuer:

- 1300 là où il est habituellement prélevé par voie antérieure
- 820 par l'abord postérieur.

Ceci est contredit par les observations de Bhandari [64] et Pruksakorn [75] qui comptent 1600 fibres dans la recoupe distale du nerf spinal accessoire.

Cette approche consiste en une incision horizontale reliant la projection du nerf accessoire (4/5 de la distance rachis/acromion) à celle de l'incisure supra-scapulaire (mi-distance acromion/angle supérieur de la scapula), en position latérale ou ventrale. le trapèze est incisé suivant la direction des

fibres et désinséré de l'épine de la scapula. Le muscle suprascapulaire est exposé, ainsi que le bord supérieur de la scapula [82]. Le nerf supra-scapulaire est assez difficile à identifier dans le tissu adipeux, profond à 8 cm sous l'incision cutanée.

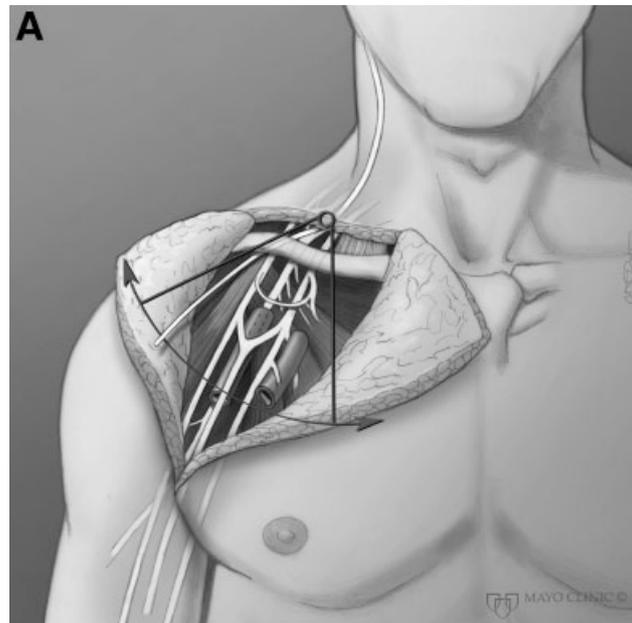


Figure 38: possibilités de projection du nerf accessoire par la voie d'abord postérieure du nerf spinal [77].

Il existe des variantes à la neurotisation isolée du nerf accessoire. Par exemple Brunelli associe le transfert du nerf accessoire avec celui d'une partie du plexus cervical, ce que Narakas avait auparavant réprouvé. Ce dernier utilisait parfois le nerf du muscle élévateur de la scapula en association avec le nerf accessoire, mais à condition d'avoir une bonne innervation par le plexus cervical. Selon lui, dans les rares cas où le plexus cervical était non fonctionnel en post-opératoire par un prélèvement excessif, la fonction scapulo-thoracique était très défailante.

Les résultats cliniques observés par l'utilisation du nerf accessoire sont présentés dans le tableau 15. Ce tableau résume de façon complète les résultats des grandes équipes de chirurgie du plexus brachial mondiales, sans prétendre à l'exhaustivité absolue. On constate que cette modalité de neurotisation constitue le plus efficace des transferts isolés pour l'épaule, devenu désormais une procédure de routine. Ces bons résultats sont probablement expliqués par la qualité motrice du nerf accessoire et la synergie du muscle trapèze avec l'abduction du suprascapulaire: la rééducation en est d'autant facilitée.

On retrouve globalement 51% de résultats utiles.

Nos résultats sont plutôt favorables en comparaison de la littérature (72,2% de résultats utiles à Nantes). Nous avons étudié la comparabilité de notre série de patients avec la littérature. Pour ce faire, nous avons relevé l'âge, le délai opératoire et la proportion de déficit pan-plexique dans toutes les séries. Ces données ont été regroupées avec une pondération tenant compte du nombre de patients de chaque série.

Parmi les facteurs ayant une influence sur le résultat, par ordre d'importance (on rappelle que le facteur nettement le plus fort est le délai opératoire):

- le délai opératoire est plus long dans notre série (8,6 mois contre 6,5 mois dans la littérature)
- la proportion de déficit pan-plexique est plus importante à Nantes (67% contre 57% dans la littérature)
- l'âge est légèrement plus jeune dans notre série (24,5 ans contre 26,57 dans la littérature)

Alnot a montré dans les paralysies partielles supérieures que le déficit de C7 faisait chuter les bons résultats de 80% à 60% [83]. En classant les patients selon le caractère complet ou non du déficit, nos résultats tendent également en ce sens ($p=15\%$).

Nous retrouvons que le délai opératoire est un facteur pronostic majeur ($p=0,0203$), malgré la faible puissance due au faible effectif. Les droites de régression (figure 7) montrent que (statistiquement) le délai opératoire devrait être au maximum de 5-6 mois pour espérer obtenir une force contre résistance (M4).

Terzis a également confirmé ce fait ($p < 0,005$) sur 118 patients [84]:

- intervention avant 6 mois: force moyenne 3,7 /5, abduction moyenne 58,6°
- intervention après 12 mois: force moyenne 2,8 /5, abduction moyenne 42°

Nous retrouvons également d'après nos courbes de régression que l'intervention devrait se situer vers 5 mois maximum pour avoir de bonnes chances d'obtenir une motricité utile.

Elle retrouve également une influence de la présence d'une greffe d'interposition et de sa longueur, et de la présence d'une fracture de la scapula (abduction moyenne passant de 59° à 35° en cas de fracture associée). Le seul cas nantais ayant nécessité une greffe d'interposition (35 ans, 11 mois de délai opératoire) a obtenu une force cotée M3.

Nous retrouvons une influence de l'âge ($p=0,017$), ce qui est une donnée connue et non modifiable. Le résultat étant corrélé significativement au délai opératoire, il l'est logiquement également (non significatif) au délai de récupération.

Bien que l'épaule soit un déterminant indispensable dans le résultat global du membre supérieur, nous ne retrouvons pas de corrélation entre le résultat de sa réanimation et le taux d'invalidité, la présence d'une douleur ou le retour au travail. En revanche le résultat de l'épaule importe pour le bénéfice subjectif de l'intervention (non significatif, $p=10\%$).

Parmi les facteurs modifiables permettant d'améliorer les résultats de cette intervention à Nantes, il paraît important de diminuer le délai opératoire de 8,6 mois. Nous avons vu que la probabilité de récupération spontanée était quasi nulle en cas d'avulsion double, faible en cas d'avulsion simple. L'absence de récupération clinique à 3 mois doit donc inciter fortement à une exploration

chirurgicale du plexus. L'électrophysiologie et l'anatomopathologie orienteront vers la neurolyse (qui accélère la récupération) ou la neurotisation/greffe.

Lors de la rééducation post-opératoire, il est recommandé de réaliser des exercices de soulèvement ou de rétropulsion de l'épaule pour induire et accélérer la croissance nerveuse. Ceci n'a à notre connaissance pas de base scientifique validée, mais il s'agit d'un moyen simple permettant également de conditionner psychologiquement le patient en évitant les attitudes passives néfastes. Ce type d'exercice permet également de renforcer la fameuse «alliance thérapeutique» entre le patient et l'équipe le prenant en charge. Cependant nous ne retrouvons pas d'influence de la rééducation ou de la kinésithérapie sur le résultat de l'épaule.

auteur	période	revue	année publication	localité	nombre (total > retenus)	modalité	M3	M4	âge	délai	proportion plexus complets	proportion plexus n plexus sup
Chuang	1987-1991	plast recon surg	1995	Taipei	99 > 5	phr-SS	*	100%	*	*	*	*
Sungpet	*	aust NZ J surg	2000	Bangkok	10	phr-SS	41°		*	*	*	*
Luedemann	1980-1999	JNS	2002	Hannovre	19	phr-SS	15%	58%	25	*	100%	0%
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	151 > ?	phr-SS	75%		*	*	*	*
Alnot	1984-1994	rev chir orthop traum	1998	paris	70 > 11	C5-SS	27%	18%	30	8	0%	100%
Malessi	*	JNS (focus)	2004	Leiden	53 > 11	C5-SS	9%	0%	26	4,2	73%	27%
Alnot	1983-1987	rev chir orthop traum	1992	Paris	50 > 28	XI-SS ou C5/SS	60%		24,5	5	100%	0%
Narakas	*	clin orthop	1988	lausanne	269 > 22	XI-SS	36%		*	*	*	*
Chuang	1987-1991	plast recon surg	1995	Taipei	99 > 24	XI-SS	*	100%	*	*	*	*
Alnot	*	microsurg	1995	Paris	*	XI-SS	50%		*	*	*	*
Alnot	1984-1994	rev chir orthop traum	1998	paris	70 > 22	XI-SS	22%	40%	30	8	0%	100%
Millesi	*	in: management of peripheral nerve problems	1998	Vienne	12	XI-SS	66%		*	*	*	*
Merrell & wolfe	1991-1999	JHS	2001	New haven	6	XI-SS	16%	33%	28	5	54%	46%
Malessi	*	JNS (focus)	2004	Leiden	53 > 21	XI-SS	14%	10%	24	4,3	43%	57%
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	577 > ?	XI-SS	80%		*	*	*	*
Terzis	*	microsurg	2006	Norfolk	92 > 59	XI-SS	79%		*	*	*	*
Terzis	1978-2002	plast recon surg	2006	Norfolk	118 > ±80	XI-SS	72%		25,5	12,5	>17,8%	*
Guan	2002	chinese med J	2006	Shanghai	26	XI-SS	51°		27,8	5,5	20%	80%
Guan	2003	chinese med J	2006	Shanghai	11	XI-SS (abord post)	62°		26,2	5,1	27%	73%
Robert & Touchais	2000-2010	*	*	Nantes	24 > 18	XI-SS	28%	44%	24,5	8,6	66%	33%

	M3	M4	utile	abduction
phr-SS	12,5%	66%	75-78,5%	41°
C5-SS	18%	9%	27%	
XI-SS	5%	22%	51% (36-80%)	54°
XI-ax	3%	74%	74-77%	

Tableau 15: résultats de la littérature concernant la neurotisation du nerf supra-scapulaire.
Tableau 15 bis: résultats résumés selon la modalité de neurotisation (à partir des données chiffrées recueillies). Le calcul pour neurotisation XI-ax est fournie pour comparaison.

2° greffe C5-suprascapulaire (C5-SS), neurotisation phrénique-suprascapulaire (phr-SS).

Bertelli et Kline soulignent que C5 est disponible pour la greffe dans 75 à 95% des cas. La préservation de C5C6 est liée au ligament radiculo-transversaire développé en C5 et C6, parfois C7 [14]. Nous avons vu la difficulté de juger de la qualité du moignon de C5 en pré et peropératoire.

La reconstruction isolée du nerf supra-scapulaire par la racine non-rompue de C5 permet d'obtenir un résultat utile dans 27% des cas environ, ce qui est inférieur aux résultats de la neurotisation spino-suprascapulaire.

Les tentatives de projection de C5 simultanément sur les nerfs supra-scapulaire et axillaire ont obtenu des résultats contrastés selon les auteurs (14% de résultat utile selon Millesi [85], 61° d'abduction selon Terzis [80]).

C5 est en réalité généralement utilisé pour greffer le nerf musculo-cutané, expliquant les petites séries retrouvées pour l'épaule dans la littérature. C5 est en revanche proposé en association à la neurotisation spino-suprascapulaire. Elle permet de neurotiser le nerf axillaire (directement ou sur la division postérieure du tronc supérieur), et ainsi d'améliorer les résultats en terme de fonction de l'épaule.

Le nerf phrénique a parfois été utilisé pour neurotiser le nerf accessoire, avec un résultat voisin de celui obtenu par le nerf spinal accessoire (75-78% de résultats utiles). Il est plutôt utilisé pour reconstruire le nerf musculo-cutané. Les modalités et conséquences du prélèvement du nerf phrénique seront exposés dans le chapitre consacré au nerf phrénique pour le coude.

3° neurotisation isolée du nerf Axillaire.

Certains auteurs proposent la neurotisation isolée du nerf axillaire. La réanimation de ce nerf permet de fournir à l'épaule une abduction par un muscle puissant, ainsi que la rotation externe (muscle petit rond), et la sensibilité. Concernant ce dernier point, il faut noter que la plupart des patients ont spontanément une sensibilité préservée sur le moignon de l'épaule (en bordure du territoire du plexus cervical superficiel). Le nerf supra-scapulaire lui a été préféré comme priorité à Nantes, car l'objectif de l'abduction est simple: l'abduction doit être forte et suffisante pour éloigner l'avant-bras fléchi de la paroi thoracique. Les amplitudes de flexions supérieures à 45° ne sont pas impératives au bon déroulement de ce mouvement, au contraire de la force développée notamment en rotation externe. Le nerf supra-scapulaire remplit bien cette fonction.

Les tableaux 16 et 16bis reprennent les résultats disponibles de la littérature concernant la neurotisation isolée du nerf axillaire par des modalités variables. Globalement (et avec toute la réserve s'imposant à ce calcul sommaire) le regroupement des données chiffrables des diverses modalités de réinnervation du nerf axillaire obtiennent 46% de résultats utiles. Les meilleurs

résultats sont obtenus par l'utilisation d'une branche du triceps (100%), puis par le nerf spinal accessoire (74-77%), C5 et le nerf phrénique (62-66% des cas). Les donneurs moins fiables sont les nerfs thoraco-dorsal (46%), intercostaux (34%) et pectoral médial (28%). Songcharoen décrit un délai de 17,5 mois pour obtenir une force à M3 par le nerf accessoire.

Il est relativement admis que la neurotisation isolée du nerf axillaire fournit des résultats moins bons que la neurotisation isolée du nerf accessoire. Ceci n'apparaît pas dans notre analyse des séries publiées, puisque la neurotisation spino-suprascapulaire obtient 51% de résultats utiles, alors que la neurotisation spino-axillaire conduit à 74% de bons résultats. Il est important de signaler que le calcul des résultats de la première modalité de neurotisation est fiable car prend en compte de nombreuses études de nombreux auteurs. En revanche, le résultat de neurotisation spino-axillaire est calculé à partir de 3 séries, dont 2 auteurs (Chuang et Songcharoen) ont toujours des résultats cliniques plus favorables que la moyenne des autres équipes.

Pour comparer l'efficacité des différentes techniques, il faut donc se reporter aux études comparatives de patients opérés par la même équipe. Parmi celles-ci, Alnot [86] est le premier à montrer la supériorité du nerf suprascapulaire sur le nerf axillaire. Selon Vekris [87], la neurotisation du nerf suprascapulaire obtient 88% de résultats utiles, contre 58% pour le nerf axillaire. Merrell et Wolfe [88] retrouvent aussi sur toute la littérature avant 2001 que le nerf axillaire est moins efficace (M3 dans 69% des cas) que le nerf suprascapulaire (92% des cas).

Sur le plan chirurgical, l'anastomose avec le nerf axillaire doit être précise. Il faut connaître la situation inférieure du fascicule sensitif du nerf axillaire. Si l'on souhaite maximaliser la récupération motrice en évitant la perte d'axones moteurs, la suture devrait donc éviter d'inclure ce fascicule dans l'anastomose. En revanche il est important de réaliser l'anastomose en amont de l'émergence de la branche du teres minor, tant sa fonction rotatoire est primordiale [66].

Une nouvelle technique de neurotisation est apparue récemment, dans la lignée des neurotisations «proches des effecteurs». Il s'agit de la neurotisation entre une branche du triceps (la branche varie selon les auteurs, longue portion, vaste médial ou vaste latéral). Il semble que l'on doive à Lurge dès 1948 la première description de neurotisation du nerf axillaire par une branche tricipitale [89]. Elle est informellement nommée «Somsak procedure», du nom de Leechvengvongs qui l'a popularisé récemment. Les modalités techniques doivent être précisées car elle est particulièrement prometteuse. Elle est peu utilisée seule (1 seule série de 7 patients avec 100% de succès), mais plutôt en association à la neurotisation spino-suprascapulaire.

L'incision est réalisée à la partie supérieure et postérieure du bras, écartant la longue portion et le chef latéral du triceps pour exposer les espaces axillaires latéral (nerf axillaire) et inférieur (nerf radial).

Lors du temps microchirurgical, les recommandations sont les mêmes que pour toute anastomose sur le nerf axillaire. Certains auteurs choisissent de réaliser la suture sur le nerf axillaire en aval de l'émergence de la branche sensitive [90]. Ceci évite les mauvaises orientations d'axones. D'autres équipes insistent sur l'importance de la réinnervation du muscle teres minor: sa fonction dans la congruence scapulohumérale est importante, et sa fonction rotatoire externe encore plus. Pour

pouvoir inclure le muscle petit rond tout en évitant la branche sensitive, il est alors nécessaire de disséquer le fascicule sensitif, ou plus simplement d'éviter de réaliser l'anastomose sur le fascicule inférieur (qui correspond à la branche sensitive).

Enfin, On retrouve des essais de neurotisation du nerf axillaire par les nerfs intercostaux. Celle-ci est généralement pratiquée par voie antérieure, mais est également possible par voie postérieure. Les résultats de cette neurotisation intercosto-axillaire sont assez pauvres lorsqu'elle est réalisée en tant que geste isolé pour l'épaule (34% de résultats utiles). La connaissance de ce résultat est cependant utile dans le choix de la meilleure modalité de réinnervation combinée des nerfs axillaire et suprascapulaire. Il s'agit en effet d'une possibilité de neurotisation dans les cas des paralysies complètes. Le nerf thoraco-dorsal, quand il est disponible, permettant de meilleurs résultats (46%), est intéressant à garder comme possibilité. Il est néanmoins souvent épargné pour permettre un transfert musculaire libre secondaire en cas d'échec. Il est difficile de se faire une opinion sur le nerf phrénique, car le nombre de patients est faible et les résultats contrastés selon les équipes (0 à 66%). L'équipe de Belgrade a réalisé plusieurs publications sur le transfert du nerf pectoral médial. Les résultats sont médiocres pour le nerf axillaire (28%). Ce nerf est plutôt utilisé dans la réanimation du coude (en association avec l'intervention d'Oberlin) car la flexion du coude et l'adduction du bras sont naturellement synergiques lors de la préparation d'une flexion de coude en force.

auteur	période	revue	année publication	localité	nombre (total > retenus)	modalité	M3	M4	âge	délat	proportion plexus complets	proportion plexus sup
Vekris	1998-2007	injury	2010	Ioannina	57 > 5	(C5 + phr/cerv) -ax	40%		28,5	4,7	*	*
Vekris	1998-2007	injury	2010	Ioannina	57 > 15	(C5 ou triceps)-ax	66%		28,5	4,7	*	*
Sedel	1980-1991	JBJS	1999	Paris	78 > 3	C5-ax	66%		33	5,4	100%	0%
Chuang	1987-1991	plast recon surg	1995	Taipei	99 > 4	IC-ax	*	100%	*	*	*	*
Samardzic	1980-1995	neurosurg	2000	Belgrade	62 > 19	IC-ax	21%	0%	67% < 40 ans	4,5	51%	49%
Samardzic	1980-1995	neurosurg	2000	Belgrade	62 > 7	pect med-ax	28%	0%	67% < 40 ans	4,5	51%	49%
Chuang	1987-1991	plast recon surg	1995	Taipei	99 > 6	phr-ax	*	0%	*	*	*	*
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	151 > ?	phr-ax	66%		*	*	*	*
Vekris	1998-2007	injury	2010	Ioannina	57 > 3	phr-ax	66%		28,5	4,7	*	*
Samardzic	1980-1995	neurosurg	2000	Belgrade	62 > 7	TD-ax	28%	0%	67% < 40 ans	4,5	51%	49%
Sulaiman & Kline	1995-2005	neurosurg	2009	new Orleans	81 > 8	TD-ax	36%	25%	32	*	21%	79%
leechavengvongs	2000-2001	JHS	2003	Bangkok	7	triceps-ax	0%	100%	25	7	0%	100%
Chuang	1987-1991	plast recon surg	1995	Taipei	99 > 23	XI-ax	*	100%	*	*	*	*
Samardzic	1980-1995	neurosurg	2000	Belgrade	62 > 8	XI-ax	12,5%	0%	67% < 40 ans	4,5	51%	49%
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	577 > ?	XI-ax	74%		*	*	*	*

115 + ?

21% 28,80%
46%

	M3	M4	utile
pect med	28%		28%
IC	17%	17%	34%
TD	33%	13%	46%
C5			62%
triceps	*	100%	100%
phr	*	*	0-66%
XI	3%	74%	74-77%

Tableau 16 : résultats de la neurotisation du nerf axillaire.
Tableau 16-bis: résumé selon le donneur

4° utilisation du nerf hypoglosse dans la réanimation de l'épaule.

Malessy a proposé le transfert du XII sur le nerf axillaire, le nerf suprascapulaire ou la racine C5. L'anse cervicale était disséqué et anastomosée au moignon distal du nerf XII pour diminuer la morbidité du prélèvement. La fonction de mastication, articulation et déglutition était altérée dans tous les cas, à des degrés variés, parfois prolongée. Une atrophie de l'hémilangue accompagnée de fasciculations est apparue chez 25% des patients.

Les résultats de cette petite série sont relativement pauvres (tableau 17), justifiant son abandon:

receveur	n	succès	%	remarque
C5	3	0	0%	deltoïde M1
suprascapulaire	4	2	50%	M3
axillaire	4	0	0%	deltoïde M1 ou M2

Tableau 17: résultats de la neurotisation par le nerf hypoglosse [210].

5° Arthrodeèse d'épaule

Plusieurs auteurs considèrent la neurotisation de l'épaule comme insuffisamment fiable et «dépendante» en donneurs nerveux. C'est par exemple l'attitude de Sedel qui privilégie les greffons nerveux pour la partie distale du membre (extension du poignet, flexion des doigts) [91]. L'école de Montpellier est également dans cette philosophie: «mieux vaut une bonne arthrodeèse fiable et stable qu'une neurotisation incertaine». La lecture des résultats de la chirurgie de l'épaule plexique à Montpellier retrouve ainsi 11 cas de neurotisation spino-suprascapulaire, mais les résultats de cette technique ne sont pas explicités. L'équipe de Bichat a également utilisé l'arthrodeèse de scapulo-humérale dans une optique d'utilisation du membre supérieure originale. Plutôt que de privilégier la flexion du coude et l'orientation du membre vers le monde, la fonction de poussée en force est mise en avant pour le membre. L'extension du coude est ainsi réanimée en priorité par la neurotisation du muscle triceps. La stabilité de l'épaule, impérative à l'efficacité du geste, est logiquement assurée par l'arthrodeèse.

Chammas a publié ses résultats d'arthrodeèse scapulo-humérale dans le contexte de paralysie plexique [92]. On constate que cette intervention, réalisée en général à 31-36 mois post-traumatique et toujours après récupération du coude, est relativement exceptionnelle (1 par an).

Par une voie d'abord postérieure, le vissage interne est complété par une attelle portée 2,5 mois avant mobilisation du membre, ou par un fixateur externe permettant une mobilisation dès la seconde semaine postopératoire. Cette technique permet la fusion dans tous les cas, même si 22% des patients ont nécessité une greffe osseuse secondaire.

Le complexe articulaire scapulo-serrato-thoracique permet des résultats flatteurs en terme de mobilité et de possibilités fonctionnelles (Tableau 18):

	paralysie supérieure	paralysie complète
flexion	61	62
abduction	59	63
extension	14	12
rotation externe	7	-9
rotation interne	42	45
main-bouche	100%	81%
main-front	91%	19%
main-nuque	45%	6%
main-poche avant	82%	*
main-asselle	73%	*
main-fesse	36%	*
activités bimanuelles	100%	44%
pince brachio-thoracique	100%	94%
main presse-papier	100%	87%
main pour manger	54%	*
crochet brachio-antébrachial	73%	56%
position de plateau antébrachial	73%	56%

Tableau 18: résultats moteurs et fonctionnels de l'arthrodeèse scapulo-humérale dans la paralysie plexique (d'après Chammas [92]).

note: 40% des patients sont en échecs de neurotisation spino-suprascapulaire.

On rappelle que dans notre série de patients (qui est comparable en terme de sévérité des lésions), on retrouve des résultats fonctionnels bien inférieurs (13% de patients portant la main à la bouche, 9% de patients portant la main au front). L'arthrodèse peut être réalisée en seconde intention en cas d'échec d'une première neurotisation, ce qui était le cas dans 40% de cette cohorte. La fonction du trapèze supérieur et du serratus doit être suffisante (contre résistance) pour permettre le succès de ce geste, mais une parésie de ces muscles n'influence pas forcément le résultat sur le plan statistique. En revanche, il est important d'avoir une force contre pesanteur dans le muscle pectoral. Ce muscle est le déterminant principal de la force post-opératoire développée dans la plupart des mouvements. Oberlin précise qu'il est préférable pour la fonction de l'épaule que le patient n'ait pas déjà eu de neurotisation préalable par le nerf accessoire, car l'élévation moyenne passe alors de 68° à 41° [93].

L'arthrodèse n'a pas d'influence sur les douleurs neuropathiques mais supprime les douleurs de subluxation scapulo-humérale dans tous les cas. Elle améliore également la force du coude subjectivement et les patients sont plus satisfaits de cette intervention (96%) que de la prise en charge globale dans notre série de patients (65%).

Les contraintes sont importantes sur l'arthrodèse, expliquant les échecs (surfaces de contact faibles et planes, importance du bras de levier, absence de congruence dus aux muscles parétiques). En effet les complications ne sont pas exceptionnelles (10 à 15% de fracture de l'humérus sous les fiches du fixateur externe, 3% d'infection de fiche de fixateur, 4 à 12% de pseudarthrodèse). Sur l'ensemble de la littérature, on comptabilise 38% de complications [94]. Une complication supplémentaire est la survenue de douleurs interscapulaires. On les retrouve dans 30% de toutes les arthrodèses, surtout dans les paralysies plexiques. Leur prévention consiste en un long travail de rééducation: initialement le membre est mobilisé tout en étant soutenu, avec une masso-kinésithérapie décontracturante. Secondairement le patient doit apprendre les mouvements de la scapula avant de pouvoir réaliser enfin un travail assidu de renforcement musculaire (voire de surentraînement).

Si les douleurs surviennent et en l'absence de pseudarthrodèse, il convient d'entreprendre un nouveau protocole de renforcement musculaire, ce qui suffit généralement à traiter les douleurs. Ce n'est qu'en cas d'échec qu'on envisage une malposition de l'arthrodèse.

Chirurgicalement, la voie d'abord est variable (supérieure, en sabre ou postérieure). Il existe de nombreuses variantes dans la technique d'arthrodèse, mais deux techniques prédominent: la fixation interne par vis en compression complétée par un fixateur externe et la fixation interne par plaque. L'inconvénient de la synthèse par plaque est l'immobilisation thoracobrachiale de 8 semaines, le fixateur externe autorisant une mobilisation quasi-immédiate.

Lors de la première technique, le fixateur externe est installé en premier (3 fiches de 4 mm sous contrôle de la vue dans le tiers externe de l'épine de la scapula et 3 fiches humérales percutanées en arrière de l'insertion du deltoïde). Le fixateur externe est alors monté dans l'orientation recherchée, tête sous l'acromion en gardant un espace scapulo-huméral pour pouvoir aviver les surfaces

articulaires (glène, face inférieure de l'acromion, et deux traits parallèles sur la tête humérale). Le fixateur est alors resserré.

La fixation interne peut se faire par vissage en compression scapulo-huméral. On utilise souvent 3 vis à compression de 5 mm montées en triangulation:

- la première est oblique en bas et en dedans, pénétrant au bord latéral du tendon supra-épineux et en arrière de la gouttière bicipitale, visant le pilier de la scapula.
- la seconde est horizontale, pénétrant la face externe de l'épiphyse jusqu'à la base de la coracoïde.
- la troisième est verticale pénétrant l'acromion jusqu'à la tête humérale.

La fixation interne par plaque peut être réalisée de deux façons. La première (plaque spino-acromio-humérale selon l'AO) consiste à déformer une plaque 10 trous (en flexion sur le bord externe de l'acromion, puis en flexion vers l'avant) et l'appliquer sur l'épine, la face supérieure de l'acromion puis l'humérus. La plaque est alors très saillante sous la peau. La seconde méthode est une plaque vissée dans la fosse supra-épineuse.

La position idéale est le point clé de cette chirurgie, difficile à trouver en per-opératoire. Depuis 1974, on retient la règle des «30-30-30» :

- 30° de flexion, en vérifiant le retour de la main le long du tronc (sinon l'étirement du serratus et du trapèze entraîneront des douleurs).
- 60° d'angle scapulo-huméral pour l'abduction,
- 30° de rotation externe jugée sur la pente supérieure de l'avant bras avec le bras à l'horizontale). Le réglage de la position de rotation doit pouvoir permettre d'amener la main à la bouche en flexion et au périnée en extension.

L'arthrodèse peut être accompagnée dans le même temps d'un transfert tendineux pour la réanimation du coude (transfert de grand pectoral sur la longue portion bicipitale désinsérée selon Brooks-Seddon), pour éviter une double période d'immobilisation postopératoire [95].

6° réanimation combinée des nerfs Axillaire et accessoire.

Bien que Narakas évoque de son expérience la suprématie du nerf suprascapulaire sur le nerf axillaire, il recommande de ne pas le négliger lorsqu'il reste des donneurs potentiels [35].

Le tableau 19 reprend les résultats de notre recherche bibliographique concernant les transferts combinés sur les nerfs supra-scapulaire et axillaire. Globalement on retrouve 78 à 86% de résultats utiles (dont 60% de patients atteignant M4). L'abduction moyenne obtenue par ces techniques est de 82° d'abduction et 58° de rotation externe.

Les modalités choisies par les auteurs sont variables. On reconnaît des tendances: dans les plexus supérieurs avec préservation du triceps à M4, le nerf axillaire est neurotisé par la branche de la longue portion tandis que le nerf accessoire est anastomosé au nerf supra-scapulaire. Dans les plexus complets, le nerf accessoire est utilisé pour la neurotisation du supra-scapulaire, le donneur du nerf axillaire est soit la racine C5 rompue, soit le nerf phrénique, soit C7 controlatéral. Enfin certains ont essayé de greffer ces deux nerfs clé à partir de C5 rompu avec des résultats discordant.

Cardenas-meijia et Chuang ont récemment évalué l'impact du transfert combiné pour l'épaule [96]. Ils ont comparé le résultat définitif des modalités suivantes:

-transfert simple, en général sur des paralysies totales où les autres donneurs étaient indisponibles (43 patients, utilisant les nerfs accessoire ou phrénique sur le nerf suprascapulaire): abduction moyenne 65°.

-transfert double, en général sur dans les cas d'avulsion double ou triple, correspondant à des plexus supérieurs étendus ou plus (43 patients, utilisant les nerfs phréniques et C5 sur les nerfs supra-scapulaires et division postérieure du tronc supérieur): abduction moyenne 85°.

-transfert triple, en général en cas d'avulsion isolée de C5 (4 patients, utilisant le plexus cervical et les nerfs accessoires et phréniques sur la partie distale de C5 et le nerf suprascapulaire): abduction moyenne 160°.

Terzis a présenté 92 neurotisations destinées à la réanimation de l'épaule [80]. Sa stratégie est de cibler à la fois le nerf supra-scapulaire et le nerf axillaire. Pour cela elle a utilisé diverses combinaisons de transferts nerveux (figure 39). La combinaison la plus fiable est la neurotisation du nerf supra-scapulaire par le nerf accessoire, combinée à la greffe du nerf axillaire à partir de C5. Ceci permet d'obtenir en moyenne 65° d'abduction et 52% de rotation externe. Nagano a également constaté la supériorité de la reconstruction simultanée des nerfs axillaire et suprascapulaire (88% de patients obtenant 50° d'abduction et 30° de rotation externe) [97] sur celle du nerf suprascapulaire isolé.

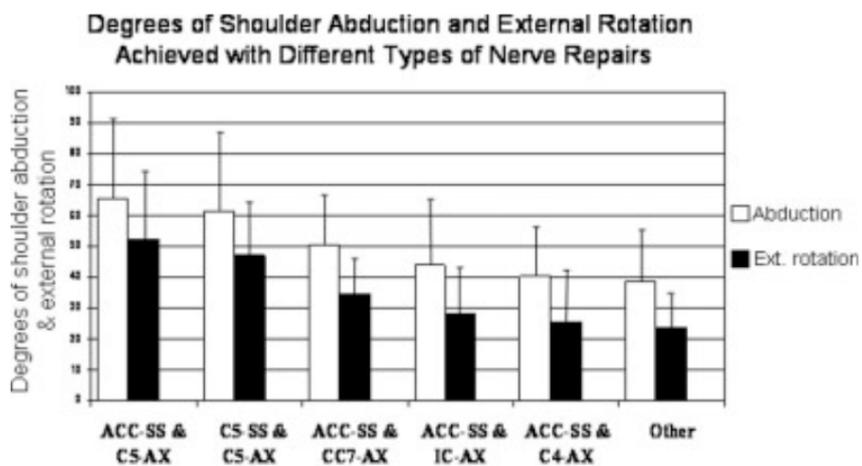


Figure 39: résultats comparatifs de différentes combinaisons de transfert pour la réanimation du nerf supra-scapulaire et du nerf axillaire. (tiré de [69])

ordonnée: abduction et rotation externe de l'épaule (en degrés de 0 à 100° par paliers de 10°. rotation externe mesurée à partir de la position en rotation interne maximale)

ACC: nerf accessoire, AX: nerf axillaire, CC7: C7 controlatéral, IC: intercostal.

auteur	période	revue	année publication	localité	nombre (total > retenus)	modalité	M3	M4	âge	délat	proportion plexus complets	proportion plexus sup
Cardenas-mejia & Chuang	2000-2004	plast recon surg	2008	Taipei	90 > 3	(phr & XI & PCP) -C5	160° abd		29	< 5	45%	55%
Cardenas-mejia & Chuang	2000-2004	plast recon surg	2008	Taipei	90 > 8	(phr & XI) -C5	142° abd		29	< 5	45%	55%
Cardenas-mejia & Chuang	2000-2004	plast recon surg	2008	Taipei	90 > 5	phr-C5	50° abd		29	< 5	45%	55%
Malessi	*	JNS (focus)	2004	Leiden	53 > 13	C5- (SS & ax)	7%	7%	25	5	54%	46%
Terzis	*	microsurg	2006	Norfolk	92 > 16	C5- (SS & ax)	61° abd, 47° RE		*	*	*	*
Terzis	*	microsurg	2006	Norfolk	92 > 9	XI-SS + C3/C4-ax	40° abd, 25° RE		*	*	*	*
Merrell & wolfe	1991-1999	JHS	2001	New haven	7	XI-SS + C5/C6-ax	85%		28	5	54%	46%
Terzis	*	microsurg	2006	Norfolk	92 > 24	XI-SS + C5/C6-ax	65° abd, 52° RE		*	*	*	*
Terzis	*	microsurg	2006	Norfolk	92 > 5	XI-SS + C7e-ax	50° abd, 34° RE		*	*	*	*
Terzis	1978-2002	plast recon surg	2006	Norfolk	118 > ±72	XI-SS + divers-ax	86%		25,5	12,5	>17,8%	*
Terzis	*	microsurg	2006	Norfolk	92 > 18	XI-SS + IC-ax	43° abd, 28° RE		*	*	*	*
Malungpaishrope	*	JHS	2007	Bangkok	2	XI-SS + IC-ax (abord post)	0%	100%	17	7	100%	0%
Nagano	*	J orthop science	1998	Tokyo	7	phr-SS + IC-ax	88%		*	*	*	*
Nagano	*	ann acad med Singapore	1995	Tokyo	112 > 7	phr-SS + IC-ax	57%		*	*	*	*
Cardenas-mejia & Chuang	2000-2004	plast recon surg	2008	Taipei	90 > 13	XI-SS + phr-DPTS	80° abd		29	< 5	45%	55%
Cardenas-mejia & Chuang	2000-2004	plast recon surg	2008	Taipei	90 > 13	phr-SS + C5-DPTS	120° abd		29	< 5	45%	55%
Chuang	1990-2000	Hand clinics	2005	Taipei	542 > 266	phr-SS ± C5-DPTS	60°		*	*	*	*
Bertelli	*	JHS	2007	Florianopolis	30 > 14	XI-SS + (tric-ax ou bell-SS)	8%	92%	26	6	0%	100%
Bertelli	*	JHS	2004	Florianopolis	10	XI-SS + triceps-ax	70%	30%	*	*	0%	100%
leechavengvongs	2000-2002	JHS	2007	Bangkok	15	XI-SS + triceps-ax	13%	77%	27	6	0%	100%

20% 59%

77%-86%

81° abd, 58% RE

Tableau 19: résultats de la littérature des transfert multiples pour la réanimation de l'épaule.

Après avoir présenté les résultats de chacun des auteurs, on doit mentionner les résultats de la méta-analyse de 2001 réalisée par l'équipe du *hospital for special surgery* et Yale. Passant en revue les 78 études relatives aux neurotisations depuis 1972, ils retiennent 8 études représentant 123 transferts orientés vers l'épaule. On peut retenir les résultats suivants:

-globalement: 73% de résultats utiles (M3) et 26% M4.

-le donneur utilisé par les équipes est le nerf accessoire dans 41% des cas, obtenant M3 dans 98% des cas.

-le donneur utilisé est intercostal dans 26% des cas, obtenant M3 dans 56% des cas.

-le nerf receveur est le suprascapulaire dans 30% des cas, obtenant M3 dans 92% des cas.

-le nerf receveur est le nerf axillaire dans 58% des cas, obtenant M3 dans 69% des cas.

On peut donc conclure avec certitude qu'en 2001, le nerf suprascapulaire est le meilleur nerf receveur ($p < 0,008$) et que le meilleur nerf donneur est le nerf accessoire ($p < 0,001$). Ces résultats ne tiennent pas compte des transferts des branches tricipitales, ni des transferts de C7c ou du nerf phrénique, car ces interventions étaient alors peu fréquentes.

Pour conclure sur la stratégie de neurotisation de l'épaule, nous retirons de notre analyse de la littérature que:

-Prise isolément, la neurotisation du nerf axillaire est moins performante que celle du nerf suprascapulaire.

-Le nerf suprascapulaire est réanimé au mieux par le nerf phrénique (75-78%, mais posant des problèmes éthiques) ou accessoire (51%). La greffe de C5 est décevante (27%).

-Le nerf axillaire est au mieux réhabilité par les branches du triceps (100% sur de petites séries), puis par les nerfs accessoire (75%) et phrénique (0 à 66%). En comparaison du nerf suprascapulaire, C5 tire grand avantage à être anastomosé sur le nerf axillaire (62%). Les petits nerfs collatéraux du plexus (thoracodorsal, pectoral médial) et intercostaux obtiennent des résultats inférieurs à 50%.

-L'idéal étant de combiner la réhabilitation des nerfs suprascapulaire et axillaire, obtenant ainsi des résultats plus favorables (80% de bons résultats. Cela est facile en cas de paralysie partielle, mais est également envisageable lors des paralysies complètes.

-L'arthrodèse d'épaule doit être considérée comme une alternative fiable, permettant d'obtenir des résultats en abduction (60°) supérieurs à la moyenne calculée pour les neurotisations spino-suprascapulaires à partir de la littérature (54°).

B2- Le coude

La biomécanique du coude est plus simple que celle de l'épaule. On peut juste rappeler que tous les auteurs insistent sur l'importance d'une épaule stable pour une flexion efficace du coude. On doit également rappeler que le muscle biceps comporte une composante de supination, qui permet de distinguer l'action du biceps parmi les compensations éventuelles.

L'évaluation des résultats de la réanimation du coude est donc plus facile que celle de l'épaule. Il existe pourtant des compensations possibles par le muscle brachioradial (évident à l'examen clinique où l'on voit la corde musculaire se dessiner dans une position de pronosupination neutre) et par les muscles épitrochléens (plus difficile à évaluer, l'avant bras étant alors en pronation/flexion de poignet et des doigts). La plupart des auteurs cotent pour ces raisons la fonction du coude plutôt que la motricité du muscle lui-même. Nous avons procédé de la même façon. On doit préciser sur ce point que M3 est jugé utile par Millesi et la plupart des autres auteurs après lui. Terzis, bien que présentant des résultats fonctionnels impressionnants, est plus drastique pour qualifier un bon résultat; Elle observe en effet que la récupération M3 n'est pas utilisée dans la vie quotidienne des patients et donc considère ce résultat comme moyen («fair»). Pour elle, un résultat satisfaisant débute à M3+. Une recherche bibliographique approfondie n'a pas permis de retrouver de base officielle à cette modification de l'échelle du British Medical Research Council distinguant des «+» et des «-» aux catégories de 0 à 5.

En revanche, l'utilisation de cette échelle nécessite de connaître la qualité de la mesure qu'elle fournit. Elle a été introduite au début du XX^e siècle par Lovett à Harvard à propos des paralysies infantiles. Après sa première publication en 1943, elle est popularisée par Seddon[98], puis régulièrement modifiée pour être celle que nous connaissons aujourd'hui. Elle n'a été évaluée que récemment dans la flexion du coude (modèle le plus simple d'évaluation) après 3 générations d'utilisation universelle[99]. La force de traction pour permettre la flexion du coude contre la pesanteur (M3 considéré comme un résultat correct) a été mesurée sur 27 cadavres formolés, tenant compte de la masse et de la longueur de l'avant-bras pour calculer le moment nécessaire (en Newton.mètre) pour soulever l'avant-bras. M3 correspond en moyenne à un moment de traction de 1,85Nm. Par comparaison, les normes pour la même articulation dans la population sont de 35,4 Nm pour les femmes, 69,5 Nm pour les hommes allant jusqu'à 93,3 Nm chez les culturistes. Cette cotation M3 correspond en réalité à une force de 4% de la force normale. La cotation M4 représente ainsi la force de ce segment de membre dans l'intervalle [4%-95%] de la force normale, ce qui est considérable. Ces remarques ne remettent évidemment pas en cause cette échelle que l'usage universel et la facilité d'utilisation rendent légitime.

D'autres échelles d'évaluation de la fonction du coude dans le plexus brachial ont été proposées. Elle peinent à se répandre car la consultation clinique du patient se doit d'être efficace. Allieu a proposé une échelle qui est présentée en figure 40.

Amplitude de flexion active (°)	score
0	0
<50	1
<80	2
<100	3
<130	4
>130	5
score amplitude:	
Supination active	
absente	0
présente	1
score supination:	
Force maximale (Kg)	
0	0
<1	1
<2	2
<6	3
<8	4
>8	5
score flexion:	
score total:	

Figure 40: «Cotation fonctionnelle d'évaluation de la récupération de la flexion active du coude» (selon Allieu[29]).

On doit noter que beaucoup d'auteurs recommandent de laisser s'installer un léger flessum de coude en cas de faiblesse du résultat. Le tendon parétique est alors mieux orienté pour fléchir le coude, car il est déporté à distance de l'axe de rotation de l'articulation. Les premiers degrés de flexion les plus difficiles ne sont alors plus un obstacle au mouvement.

Concernant l'anatomie du nerf musculo-cutané, kawai et Murase [12] ont étudié précisément sa morphologie interne au microscope sur 25 spécimens. On peut placer son origine à 0,3 cm de la pointe du processus coracoïde. Le nerf ne traverse pas forcément le muscle coraco-brachial, mais peut rarement passer sous le corps musculaire[11, 100].

-La branche destinée au muscle coraco-brachial naît à 0,5 cm du processus coracoïde (donc dès l'origine du nerf)

-La branche destinée au muscle biceps à 7 cm (points moteur à 11,7 et 13,7 cm dans les courte et longue portions). Oberlin retrouve une origine commune des deux branches destinées aux deux chefs du muscle dans 60% des cas. Dans cette configuration, cette origine se situe à 13 cm du processus coracoïde. Dans 40% des cas chaque chef reçoit sa branche nerveuse, longue de 3 cm: celle de la courte portion quitte le tronc musculo-cutané à 11 cm, celle de la longue portion se détache 2 cm distalement.

-La branche du muscle brachial naît à 11,2 cm du processus coracoïde.

Il faut mentionner que le muscle biceps peut rarement être innervé exclusivement par le nerf médian [100].

Dans son organisation fasciculaire, il est difficile de retrouver une systématisation à son origine. En revanche à 5 cm du processus coracoïde, les fascicules destinés au biceps sont en position latérale dans 80% des cas. Médialement se trouvent le fascicule sensitif et le fascicule destiné au muscle brachial. Il existe une anastomose avec le nerf médian dans 20% des cas.

Les résultats des principales études sont présentés dans les pages suivantes (Tableau 20). Comme pour l'épaule, quelques publications (surtout anciennes avant 1990) ont été ignorées en raison du manque de standardisation des techniques. Les publications ayant un faible effectif concernant des stratégies communes ont été ignorées.

auteur	année	revue	année publication	localité	nombre total	modalité	M3	M4	M3 et plus	âge	délat	proportion plexus complet	proportion plexus sup
merle	*	in: réadaptation dans les lésions traumatiques du plexus brachial	1982	Nancy	7	XI	43%	14%	0,57	*	*	*	*
Allieu	*	clin plast surg	1984	Montpellier	15	XI	46%	20%	66%	*	*	*	*
Millesi	1982-1984	in: Terzis (microreconstruction of nerve injuries)	1987	Vienne	16	IC	68%		68%	*	*	*	*
Minami	*	JHS	1987	Sapporo	17	IC-MC	100%		100%	23	6	*	*
Brunelli	*	in: Terzis. microreconstruction of nerve injuries	1987	Brescia	13	XI	30%	15%	45%	*	*	*	*
Narakas	*	clin orthop	1988	Lausanne	24	IC	37%		37%	*	*	*	*
Kawai	1972-1986	clin orthop	1988	Osaka	24	IC	29%	41%	70%	22,7	4,2	47%	53%
Kawai	1972-1986	clin orthop	1988	Osaka	9	XI	0%	44%	44%	22,7	4,2	47%	53%
Gu	1970-*	microsurgery	1989	Shangai	125 > 65	phrénique-MC	85%		85%	24,6	*	*	*
Friedmann	1984-1990	JNS	1990	Durham	14	IC-MC	50%	0%	50%	22	7	*	*
Oberlin	*	JHS	1994	Paris	4	ulnaire (FCU)-bic	0	100%	100,0%	23	4	*	*
Chuang	1987-1989	JHS	1992	Taipei	66	IC	66%		66,0%	27	4 (2-12)	53%	47%
Alnot	*	rev ch orth & traum	1992	Paris	50	effe racine si possible XI-MC sin	80%		80%	24,5	5	100%	0%
Nagano	*	ann acad med Singapore	1995	Tokyo	112	IC	87%		87%	*	*	*	*
Narakas	*	in: Bonnard, narakas, les paralysies du plexus brachial. 2° ed.	1995	Lausanne	4	XI	50%	25%	75%	*	*	*	*
Songcharoen	1984-1992	JHS	1996	Bangkok	192	XI	53,60%	19,30%	72,9%	26	6 (1-12)	*	*
Loy & Oberlin	1990-1997	ann chir main	1997	Paris	17	ulnaire (FCU)-bic	35%	24%	58,0%	25,8	17,2	0%	100%
Allieu	1973-1991	rev ch orth&rep	1997	Montpellier	62	IC (10), XI, C5 (43)	66%		66%	23	7	61%	39%
Leechvongsongs	1992-1995	JHS	1998	Bangkok	32	ulnaire (FCU)-bic	3%	93%	96,0%	28	6 (3-12)	0%	100%
Malesy	*	JNS	1998	Leiden	25	IC-MC	8%	56%	64%	22,1	3,3	*	*
Franciosi	*	ann chir main	1998	Porto alegre	5	biceps end-to-side sur uln	0%	80%	80%	26	34	0%	100%
Waikakul	1989-1994	JHS	1999	Bangkok	130	XI	41%	43%	84,0%	24	3 (1-6)	*	*
Malesy	*	JNS	1999	Leiden	75	IC-MC	44%	20%	64,0%	25	3 (2-6)	*	*
Terzis	1978-1996	plast rec surg	1999	Norfolk	127	hypoglosse	21%		21%	*	*	*	*
Bentolita & Sedel	1980-1991	JBJS	1999	paris	78	divers*	±28%	±15%	48%	25,9	44% < 6 mois 35% > 1 an	100%	0%
Samardzic	1980-1995	neurosurg	2000	Belgrade	62 > 14 62 > 20 62 > 7 62 > 6	greffe intraplexuelle ±IC ±XI IC-MC XI TD pect médial	52%	0%	52%	23	5,4	100%	0%
Merrell & wolfe	1991-1999	JHS	2001	new haven	6	IC	28%	0%	28%	67% < 40 ans	4,5	51%	49%
Xu	1999-*	plast recon surg	2002	Shangai	15 > 11 29	phr-MC direct (thoracoscopie) phr-MC (avec greffe interposition)	72%	0%	72%	67% < 40 ans 67% < 40 ans 67% < 40 ans	4,5 4,5 4,5	51%	49%
Sungpet	1996-1998	microsurgery	2003	Bangkok	5	médian (FCR)	20%	80%	100,0%	28 24,5	5 5,3	54%	46%
Gu	*	JHS	2003	Shangai	3	C7c-MC	0%	66%	66,0%	25	5 (4-7)	*	*
Gu	*	microsurgery	2003	Shangai	4	C7 (homolat)	0	100%	100,0%	7-50	26% < 6 mois 47% < 1 an	100%	0%
Sanni	1994-1998	JNS	2003	Hannover	44	XI	20%	25%	45,0%	32	-	0%	100%
Tung & mackinnon	1997-2000	J neurosurg	2003	St Louis	8	ulnaire (FCU) & autre sur brachial	0%	100%	100%	27	7 (3-24)	59%	41%
Teboul & Oberlin	1990-2000	JBJS	2004	paris	32	ulnaire (FCU)-bic	12%	62%	75,0%	26,4	3,8	0% (50%)	100% (50%)
Chaitapong	1998-2000	JHS(br)	2004	Chiang Mai	19	IC-MC	52%		52%	25	< 6 mois	*	*
					17	phrénique-MC	29%		29%	25	< 6 mois	*	*

auteur	année	revue	année publication	localité	nombre total	modalité	M3	M4	M3 et plus	âge	délat	proportion plexus complet	proportion plexus sup
Chuang	1990-2000	Hand clinics	2005	Taipei	301	IC-MC	80%	80%	80,0%	-	avant 5 mois	*	*
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	577 > ?	XI	60%		60,0%	*	*	*	*
					151 >	phrénique-MC	60%		60,0%	*	*	*	*
					22	IC	65%		65,0%	*	*	*	*
					40 > 24	ulnaire (FCU)-bic	87,50%		87,50%	*	*	*	*
verreaux & Oberl	2003-2006	plast rec surg	2006	paris	15 > 10	médian (FCR)	80%		80%	*	*	*	
					10	ulnaire/biceps + median/brachial	0%	100%	100,0%	27,2	6,6	0%	100%
Leechvengongs	2000-2002	JHS	2006	Bangkok	15	ulnaire (FCU)-bic	13%	87%	100,0%	27 (13-60)	6 (3-10)	0%	100%
					Nath	médian (fasc pronateurs)	5%	90%	95%	24,2	5	0%	100%
Vekris	1998-2004	microsurgery	2006	Athènes	25	C5 ou C6 ou ulnaire (FCU)	92%		92%	24,6	6	*	*
					17	phrénique (seul ou combiné)	100%		100%	24,6	6	*	*
Monreal	*	Hand	2007	Havana	20	phrénique-MC	40%	30%	70,0%	23	4 (2,8-8,6)	*	*
					Moiyadi	IC	18%	13%	32%	28,7	6,4	44%	36%
Hierner	*	acta neurochir (suppl)	2007	Louvain	6	C7c-MC	100%		100%	*	*	*	*
					56	pect médial + reconstruction tronc sup	100%		87%	32	*	21%	79%
Sulaiman & Kline	1995-2005	neurosurg	2009	New Orleans	56	pect médial	87%		87%	32	*	21%	79%
					18	IC	22%		22%	32	*	21%	79%
Yamada	*	neurosurg	2009	Loma linda	18	IC + reconstruction tronc sup	100%		100%	32	*	21%	79%
					Siqueira	C3 et C4	0	100%	100%	32,9	20	0	100%
Bertelli	2002-2007	neurosurg (suppl)	2010	Florianopolis	10	phrénique-MC	50%	20%	70%	24,8	6	100%	0%
					22	C5	22,70%	68,1%	90,8%	23	5 (3-11)	*	*
Carlisen & Shin	1999-2008	plast rec surg	2010	Rochester	23	ulnaire (FCU)-bic	13%	60%	73%	31	5,9	0%	100%
					30	ulnaire (FCU)-bic + median-brachial	10%	80%	90%	32	6	0%	100%
Coulet	1993-2007	JHS	2010	Montpellier	23	ulnaire (FCU)-bic	83%		83%	28	6,5	0%	100%
					17	IC-MC	59%		59%	25	5,7	0%	100%
Dong	2002-2005	JNS	2010	Shanghai	40	phrénique-tronc sup	82,50%		82,50%	31	4,6	77,50%	22,50%
					Ray&Mackinnon	2001-2009	JNS	2011	St Louis	29	ulnaire (FCU)-bic + median-brachial	13%	79%

Tableau 20: résultats des techniques de neurotisation pour la réanimation du coude. [6, 8, 9, 29, 35, 73, 88, 91, 102, 104-106, 114, 115, 117, 120, 122, 124, 125, 148, 199, 200, 210-212, 214-233]

- 1: in: Bonnard, narakas, les paralysies du plexus brachial 2° ed.
- 2: délat de 11 mois pour premiers signes EMG, 17 mois pour M3.
- 3: délat de contraction clinique 3 mois (2-5), 6 mois (4-11) pour MRC 3.
- 4: échec= patient de 45 ans avec délat de 13 mois.
- 5: délat de 11,5 mois pour premiers signes EMG.
- 6: délat de 8 mois pour premiers signes EMG.
- 7: délat de 3,4 mois pour premiers signes EMG, 9 mois pour MRC3.
- 8: perte 1 MRC, engourdissement index. Receveur= div ant&post du Tsup
- 9: 50% sont des plexus complets secondairement améliorés.
- 10: temps moyen M3 12 mois, dissociation respi à 2 ans, sensation non référée à la poitrine à 4 ans;
- 11: temps moyen M3 8 mois.
- 12: 70% de paresthésies transitoires du 1° espace, diminution bénéfique de la pronation.
- 13: inclus 8% de lésions autres (tumorale, radique, obstétricale, iatrogène, couteau).
- 14: C3 & C4 (au delà du nerf phrénique) suturés sur C5 & C6.
- 15: 3 (13%) patients cotés à M5.
- 16: 8 patients (27%) sont cotés M5.

1° greffe de C5 ou C6 sur le nerf musculo-cutané.

Le débat sur la supériorité de la greffe de C5 sur la neurotisation à partir du nerf accessoire ou des nerfs intercostaux est ancestral, ayant fait coulé beaucoup d'encre et asséché de nombreuses gorges. On pourrait le comparer à l'opposition droite-gauche de la politique française, ignorant la possibilité d'une solution intermédiaire adaptée aux circonstances.

Hentz et Narakas [101] étaient parmi les premiers retrouver une tendance aux meilleurs résultats par l'utilisation d'une greffe de C5 ou C6 rompu-non avulsé par rapport à la neurotisation intercostale. Allieu a montré que la greffe de C5, bien que peu différente de la neurotisation intercosto-musculocutanée, était légèrement mieux [29].

Lors du congrès de Lisbonne en mai 2011, les résultats d'une méta-analyse américaine actuellement non publiée ont montré que la neurotisation intercostale et la greffe à partir de C5 et/ou C6 n'obtenaient pas de différence significative. Cette notion qui est désormais admise, correspond selon nous à un débat d'un autre âge: les nouvelles stratégies sont mieux établies et les résultats sont plus fiables, permettant désormais d'entreprendre systématiquement la réhabilitation sensitive et motrice de la main, dès la période initiale.

Le problème devient dès lors de disposer du plus grand nombre possible de donneurs en évitant une morbidité liée au prélèvement excessif de trop de donneurs extraplexuels. L'attitude est donc plus selon nous de «greffer quand cela est possible, neurotiser quand il n'y a pas de disponibilité de C5 ou C6».

Le problème devient aussi un problème de greffons, nécessairement limité si on se cantonne aux greffons autologues, et si on se refuse à sacrifier le nerf ulnaire et les nerfs cutanés médiaux du bras et de l'avant-bras. Il paraît en effet illogique au neurochirurgien centré sur la douleur plexique de sacrifier les nerfs sensitifs dans un territoire où il cherche à rétablir une ré-afférentation sensitive à visée antalgique. De telles conceptions imposent de préférer le recours aux tubes de régénération nerveuse (pourtant de qualité inférieure aux greffons autologues) quand la quantité de nerfs sursaux est «épuisée». Cette conception stratégique impose également d'affiner le prélèvement sural, en particulier de maximaliser sa longueur dans la fosse poplitée et à la cheville. Les implications de cette stratégie sous-tendent également des preuves fondamentales plus solides avant de modifier les objectifs de la réhabilitation du membre.

Concernant le site distal d'anastomose, Allieu a montré (en mélangeant les résultats de greffes de C5C6 et les neurotisations intercosto-musculo-cutanée) qu'il n'existe pas de différence entre réaliser la suture sur le faisceau latéral ou nerf musculo-cutané directement [29]. En revanche la suture plus en amont sur le tronc supérieur obtient des résultats inférieurs. Il précise également (élément important pour la pratique chirurgicale) qu'il ne retrouve pas de différence entre utiliser deux ou trois greffons d'interposition.

Nous avons vu précédemment que C5 était fréquemment préservé (95% des cas, grâce au ligament le rattachant au processus transverse de C4) et disponible pour une greffe intra-plexuelle.

Nous avons également vu les difficultés per-opératoires à juger de la qualité du moignon de C5. Enfin, nous avons évoqué la morbidité du prélèvement des différents donneurs extra-plexuels. L'utilisation de C5 est donc une attitude logique permettant soit de diminuer l'utilisation de donneurs extra-plexuels, soit d'être plus ambitieux (c'est notre opinion) dans les territoires réinnervés. Si une autre racine est disponible pour la greffe sur le nerf musculo-cutané, il faut se rappeler d'une règle empirique: la plasticité cérébrale ne permet pas de s'approprier de façon satisfaisante un mouvement commandé par une racine éloignée de plus de deux étages radiculaires. Ainsi la greffe de C8 ne donne pas de bons résultats. L'idéal étant C6 (2700 fibres destinées majoritairement vers la flexion du coude) plutôt que C5 (16000 fibres plutôt orientées vers l'épaule) ou C7.

Les résultats cliniques obtenus par cette méthode sont variables selon les équipes de 52 à 91% de résultats utiles (tableau X). Cette modalité de réinnervation est surtout rapportée par les grands auteurs français des années 1980 (Alnot, Allieu, Sedel), mais le manque de standardisation de leurs procédures (où la greffe de C5 est mélangée avec d'autres neurotisations) rend difficile l'évaluation précise de l'efficacité propre de la greffe à partir d'une racine C5, C6 ou C7. Alnot rapporte 80% de bons résultats, Allieu 66% et Sedel 52%. Seul Bertelli rapporte l'efficacité spécifiquement de la greffe longue de C5, avec 90 de résultats satisfaisants.

auteur	année	revue	année publication	localité	nombre total	modalité	M3	M4	M3 et plus	âge	délat	proportion plexus complet	proportion plexus sup
Alnot	1983-1987	rev ch orth & traum	1992	Paris	50	greffe racine si possible XI-MC sinon		80%	80%	24,5	5	100%	0%
Allieu	1973-1991	rev ch orth&rep	1997	Montpellier	62	IC (10), XI, C5 (43)	66%	66%	66%	23	7	61%	39%
Bentolia & Sedel	1980-1991	JBS	1999	Paris	78	greffe intraplexuelle ±IC ±XI	52%	52%	52%	23	5,4	100%	0%
Vekris	1998-2004	microsurgery	2006	Athènes	25	C5 ou C6 ou ulnaire (FCU)	92%	92%	92%	24,6	6	*	*
Bertelli	2006-2007	JHS	2010	Florianoopolis	22	C5	22,7%	68,1%	90,8%	23	5 (3-11)	*	*

Tableau 21: résultats de la réinnervation de la flexion du coude à partir des racines cervicales (souvent C5 ou C6)

2° neurotisation ulno-bicipitale selon Oberlin.

Dans les cas de paralysie plexique supérieure, Oberlin a proposé en 1994 le transfert d'un fascicule du nerf ulnaire destiné au fléchisseur ulnaire du carpe sur la branche motrice du biceps. L'abord est alors brachiale antéro-interne sous le tendon du muscle grand pectoral. Les fascicules destinés au biceps, la branche sensitive du musculo-cutané et le nerf ulnaire sont repérés. La stimulation per-opératoire permet de choisir un ou deux fascicules moteurs innervant principalement le muscle fléchisseur ulnaire du carpe. Un seul fascicule est transféré dans les cas où les branches bicipitales naissent d'un tronc commun, deux fascicules sont prélevés si le muscle est innervé par deux branches séparées. L'anastomose est réalisée par quelques points de 11/0 complétés par de la colle biologique. Le membre est immobilisé pendant 3 semaines dans un bandage thoraco-brachial, permettant une mobilisation immédiate du poignet et de la main. Les premières contractions du biceps apparaissent à 3 mois post-opératoire.

Cette intervention s'est rapidement popularisée car les résultats sont très intéressants (80% de résultats utiles, avec en particulier 69% de patients recouvrant une motricité contre résistance).

Dans les cas de paralysie C5C6C7, cette technique est également très efficace. Coulet et Chammas ont récemment comparé les résultats de la neurotisation intercosto-musculocutanée et de l'intervention d'Oberlin dans les paralysies C5C6C7. Comme on pouvait le pressentir, ils concluent à la supériorité de l'intervention d'Oberlin (83% de bons résultats) sur l'utilisation des nerfs intercostaux (59%) [102].

Une variante a été proposée par Franciosi: la neurotisation latéro-terminale de la branche bicipitale sur le bord latéral du nerf ulnaire fonctionnel. Les résultats ont été bons (80% de résultats utiles) mais cette publication est restée isolée. La technique décrite en anglais comme «end-to-side neurorrhaphy» a plus d'un siècle, mais a récemment été remise au centre des débats depuis la publication de quelques résultats intéressants chez le rat par Viterbo [103] puis chez l'homme.

Concernant la morbidité du prélèvement ulnaire, nous avons noté une parésie subjective chez quelques patients opérés au CHU. Ils ont tous récupéré une force normale dans la main. Les séries publiées ne montrent pas de déficit permanent, malgré une légère altération transitoire des prises de force [104]. Leechavengong ne note pas de déficit post-opératoire, malgré des paresthésies transitoires fréquentes [105]. Les autres auteurs ayant rapporté cette technique ont la même expérience.

On retrouve également dans la même philosophie l'utilisation d'autres nerfs distaux pour réinnervier le muscle biceps.

Le nerf médian a été proposé comme «concurrent» au nerf ulnaire pour neurotiser le biceps [6, 106, 107]. Les fascicules transférés sont ceux du muscle fléchisseur radial du carpe pour Sungpet et Songcharoen, ceux de muscles pronateurs (Nath). Les résultats sont voisins de ceux du nerf ulnaire (80 à 100% de bons résultats selon les centres). Les premiers mouvements apparaissent à 4 mois.

La morbidité du prélèvement est également faible: Nath rapporte des paresthésies dans le premier espace interdigital dans 70% des cas. Il n'a pas retrouvé de «perte de fonction». Il considère même que l'affaiblissement de la pronation permet un renforcement supplémentaire de la supination. Sungpet a mesuré la force de serrement, pincement et la sensibilité discriminative de deux points mobiles avant et après l'intervention (tableau 22). On voit que la force et la sensibilité sont légèrement altérés après de l'intervention, mais que la récupération est parfaite à long terme.

	préopératoire	J1 postopératoire	dernier suivi (32 mois)
serrement	11,8	9,7	12,1
pincement	3,4	2,8	3,6
discrimination de 2 points mobiles	5 mm	5,6 mm	5 mm

Tableau 22: conséquences fonctionnelles du prélèvement fasciculaire médian [211]. (force en Kgf ou kilogramme-force)

Dans notre courte expérience du transfert selon la technique d'Oberlin I, les résultats sont conformes aux données de la littérature, car nous obtenons 100% de résultats utiles. On doit constater que la majorité des patients n'a obtenu qu'une force contre la pesanteur. Ce point est souligné également dans la littérature, notamment pour montrer l'intérêt de la neurotisation combinée des muscles brachial et biceps (selon MacKinnon ou intervention d'Oberlin II, voir plus loin). Cette technique est en effet d'augmenter la proportion de patients M4 ou M4+: l'application de cette nouvelle neurotisation combinée est donc prometteuse.

auteur	année	revue	année publication	localité	nombre tota	modalité	M3	M4	M3 et plus	âge	délat	proportion plexus complet	proportion plexus sup
Franciosi	*	ann chir main	1998	Porto alegre	5	biceps end-to-side sur uln	0%	80%	80%	26	34	0%	100%
Vekris	1998-2004	microsurgery	2006	Athènes	25	C5 ou C6 ou ulnaire (FCU)	92%		92%	24,6	6	*	*
Nath	*	J neurosurg	2006	Houston	40	médian (fasc pronateurs)	5%	90%	95%	24,2	5	0%	100%
Sungpet	1996-1998	microsurgery	2003	Bangkok	5	médian (FCR)	20%	80%	100,0%	25	5 (4-7)	*	*
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	15 > 10	médian (FCR)	80%		80%	*	*	*	*
Oberlin	-	JHS	1992	Paris	4	ulnaire (FCU)-bic	0	100%	100,0%	23	4	*	*
Loy & Oberlin	1990-1997	ann chir main	1997	Paris	17	ulnaire (FCU)-bic	35%	24%	58,0%	25,8	17,2	0%	100%
Leechwengvongs	1992-1995	JHS	1998	Bangkok	32	ulnaire (FCU)-bic	3%	93%	96,0%	28	6 (3-12)	0%	100%
Teboul & Oberlin	1990-2000	JBJS	2004	paris	32	ulnaire (FCU)-bic	12%	62%	75,0%	28	9	0%	100%
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	40 > 24	ulnaire (FCU)-bic	87,50%		87,50%	*	*	*	*
Leechwengvongs	2000-2002	JHS	2006	Bangkok	15	ulnaire (FCU)-bic	13%	87%	100,0%	27 (13-60)	6 (3-10)	0%	100%
Carlsen & Shin	1999-2008	plast rec surg	2010	Rochester	23	ulnaire (FCU)-bic	13%	60%	73%	31	5,9	0%	100%
Coulet	1993-2007	JHS	2010	Montpellier	23	ulnaire (FCU)-bic	83%		83%	28	6,5	0%	100%
Carlsen & Shin	1999-2008	plast rec surg	2010	Rochester	30	ulnaire (FCU)-bic + median-brachial	10%	80%	90%	32	6	0%	100%
Ray & Mackinnon	2001-2009	JNS	2011	St Louis	29	ulnaire (FCU)-bic + median-brachial	13%	79%	93%	37	4,9	100%	0%
Livemeaux & Oberlin	2003-2006	plast rec surg	2006	paris	10	ulnaire(FCU)-bic + median/brachial	0%	100%	100,0%	27,2	6,6	0%	100%
Tung & Mackinnon	1997-2000	J neurosurg	2003	St Louis	8	ulnaire (FCU)-bic & autre sur brachia	0%	100%	100%	26,4	3,8	0% (50%)	100% (50%)
Robert & Touchais	2000-2010	*	*	Nantes	6 > 3	ulnaire (FCU)-bic	66%	33%	33%	30	8,7	0%	100%

ulnaire (FCU)-bic 13% 69% 80%
médian 7% 88% 92%
double transfert biceps et brachial 9% 84% 93%

Tableau 23: résultats des neurotisations «proche de l'effecteur» pour la réanimation du coude.

3° neurotisation intercosto-musculocutanée.

Introduite par Yeoman en 1963, collaborateur de Seddon, la neurotisation intercosto-musculocutanée (IC-MC) est la plus utilisée pour réanimer la fonction de flexion du coude. Les nerfs intercostaux sont également utilisés pour neurotiser le nerf suprascapulaire, le nerf axillaire ou le nerf médian. La neurotisation intercosto-musculaire était initialement pratiquée avec interposition d'un greffon saphène, car la section du nerf intercostal était postérieure (sur la ligne axillaire antérieure) avec l'objectif de disposer du maximum de fibres myélinisées à la tranche de section. Il est désormais prouvé que l'anastomose directe est possible et préférable, ce qui impose de disséquer et sectionner le nerf le plus possible en avant (généralement à la hauteur de la jonction costo-chondrale).

Le 1° nerf intercostal est techniquement difficile à prélever, et est trop court pour être utilisable. Le 2° nerf intercostal doit être préservé car il fournit souvent une collatérale sensitive vers la face interne du bras. Enfin le 4° nerf intercostal est préservé par certaines équipes, car il fournit la sensibilité du mamelon. Sur le plan anatomique, Asfazadourian et Oberlin [108] ont mesuré la longueur moyenne des nerfs intercostaux telle que disponible pour une anastomose avec le nerf musculo-cutané. Ils ont mesuré les longueurs suivantes entre le point correspondant à la bascule du nerf vers le bras (ligne axillaire médiane à hauteur de l'émergence de la branche sensitive latérale) et le point le plus antérieur vers le sternum:

- 11,2 cm pour le 3° nerf
- 12,5 cm pour le 4° nerf
- 14,1 cm pour le 5° nerf
- 12,6 cm pour le 6° nerf

Le nerf musculo-cutané présente une longueur moyenne de 5,25 cm entre son origine du faisceau latéral et son entrée dans le muscle coraco-brachial. Cette longueur correspondant à la portion mobilisable du nerf dans l'aisselle pour faciliter l'affrontement avec les nerfs intercostaux.

Les essais de suture directe des nerfs intercostaux sur bras en abduction de 90° montrent les possibilités suivantes:

- C3, C4 et C5 sur le nerf musculo-cutané: possible dans 100% des cas
- C6 sur le nerf musculo-cutané 50% des cas (l'anastomose directe devient possible dans 100% des cas par libération du nerf musculo-cutané de son passage coraco-brachial).
- l'anastomose de ces nerfs directement sur la branche du biceps est impossible.

Il contient 500 à 700 fibres myélinisées. Il perd 10% de fibres tous les 10 cm à partir de la ligne axillaire moyenne (Narakas, Landi).

Techniquement, on peut se demander s'il faut utiliser une greffe d'interposition. Elle permet en effet de prélever le nerf intercostal plus proximale, là où il contient plus de fibres myélinisées. Elle permet également de réaliser l'anastomose distalement sur le nerf musculo-cutané à proximité de l'effecteur. Enfin elle permet d'éviter toute tension sur la suture. Cependant ses détracteurs avancent que la régénération nerveuse doit passer deux fronts de suture. Ce long

dilemme a été résolu assez clairement par l'analyse quantitative des résultats comparatifs. Le taux de bons résultats est nettement meilleur lorsque la neurotisation est directe (72%) plutôt qu'avec une greffe d'interposition (47%, $p < 0,001$) [88]. Le prélèvement du nerf intercostal est donc en règle réalisé à la jonction costo-chondrale [93].

Le nerf inter-costal doit donc être disséqué jusqu'à la jonction chondro-costale en avant, et jusqu'à la ligne axillaire postérieure en arrière. Ceci permet d'optimiser la longueur de nerf transférable, et donc de réaliser la suture le plus proche possible de l'effecteur. La dissection postérieure implique également de disséquer la branche collatérale sensitive qui se superficialise dans cette région. La préservation de cette branche permet d'éviter l'anesthésie thoracique, du mamelon en particulier. Cette branche peut également être utilisée pour une neurotisation sensitive.

Le nerf peut être disséqué à travers les muscles inter-costaux. Cette technique, réalisée au CHU de Nantes, est décrite dans la littérature comme difficile, hémorragique (la section du bistouri électrique ne peut être utilisée à proximité du nerf) et à risque pleural et nerveux. Effectivement, nous avons été confronté à quelques cas d'hématome thoracique, de brèche pleurale, et de traumatisme du nerf intercostal par la dissection. Une séduisante technique alternative a été proposée: le prélèvement sous périoste (figure 38). Elle consiste à inciser le périoste de la côte sus-jacente, puis à décoller en sous-périoste la face externe de la côte jusqu'au bord inférieur, puis continuer le décollement à la face interne de la côte jusqu'à son bord supérieur. la face profonde du périoste est alors incisée pour accéder au nerf intercostal de façon avasculaire (figure 42).

Le problème du nombre de nerfs à transférer sur le musculo-cutané persiste, malgré 20 ans de débat à ce propos. La surface fasciculaire du nerf intercostal mesure $0,23 \text{ mm}^2$ de diamètre s'il est prélevé à la jonction chondrocostale (il a perdu $1/3$ de son calibre entre la ligne axillaire antérieure et la ligne parasternale) [93]. La même surface pour le nerf musculo-cutané mesure $2,64 \text{ mm}^2$. Il faudrait donc en théorie 4 nerfs intercostaux pour une bonne adéquation. Une réponse plus pragmatique serait de s'adapter au cas du patient, car les diamètres sont variables d'un sujet à l'autre. Pour essayer de résoudre ce problème, plusieurs études ont essayé d'évaluer l'influence de ce paramètre sur le résultat final, avec des conclusions contradictoires (2, 3 ou 4 nerfs transférés). La méta-analyse mondiale réalisée par Merrell et Wolfe en 2001 [88] sur 418 patients retrouve que 2 nerfs ont tendance à donner de meilleurs résultats (75% de résultats utiles) que 3 ou 4 (66%), mais cette analyse a une puissance inférieure à 50%.

Suzann macKinnon a proposé une amélioration technique pour maximiser la récupération du biceps en cas de neurotisation du nerf musculo-cutané. Il s'agit de disséquer distalement la branche sensitive (le nerf cutané latéral de l'avant-bras) et de l'enfouir dans le biceps, pour permettre aux axones moteurs éventuellement «égérés» dans ce tronc sensitif de rejoindre le muscle. Il n'est pas clairement établi que la neurotisation neuro-musculaire soit efficace, et ce sacrifice d'une branche sensitive semble excessif au vu du bénéfice que la sensation de l'avant-bras apporte (en terme antalgique notamment).

Plusieurs modalités de suture ont été proposées pour anastomoser les nerfs intercostaux sur le musculo-cutané (figure 41):

1: suture par colle de fibrine (Narakas).

2: suture par refend épineural selon Nagano [109].

3: suture orientée (fascicules sensitifs en dedans, moteurs en dehors) (Chuang [110]).

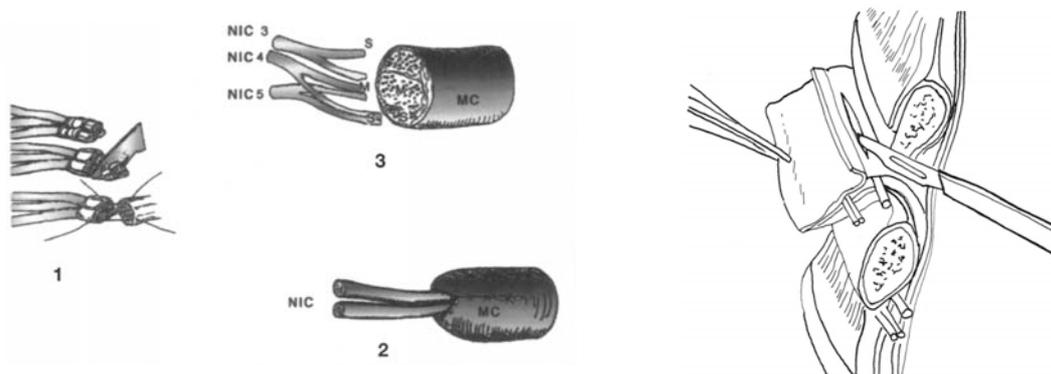


Figure 41: modalités d'anastomose intercosto-musculocutanée [108], et modalité de prélèvement sous-périosté du nerf intercostal [10].

figure 42 (dessin de Afsazadourian): prélèvement sous périosté des nerfs intercostaux. le périoste est incisé sur toute la longueur de la côte. la face profonde est ensuite ruginée jusqu'au bord supérieur sur toute son étendue. On incise ensuite, au bistouri léger le périoste par sa face profonde. On pénètre ainsi dans l'espace intercostal sans effraction musculaire, et donc sans hémorragie.

Enfin, Okinaga et Nagano ont étudié l'intérêt de conserver la vascularisation du pédicule intercostal. Il ne retrouvent pas de supériorité de cette variante chirurgicale [111].

Les complications du prélèvement intercostal ont été étudiées par l'équipe de la mayo-clinic sur 153 patients [112]. Ils retrouvent 15% de complications, proportionnellement au nombre de nerf prélevés:

- brèche pleurale: 9% (ils n'utilisent pas la dissection sous-périostée)
- infection superficielle: 2%
- hémithorax, insuffisance respiratoire aiguë, sérome dans 1,3% des cas chaque.

Ils ont également étudié l'incidence des fractures costales sur la viabilité du nerf: 9% des nerfs prélevés chez ces patients étaient non-fonctionnels par stimulation directe. La recherche systématique préopératoire de fractures costales est donc bien justifiée.

La neurotisation intercosto-musculocutanée est la plus souvent utilisée. Les facteurs influant son succès ont été très étudiés: le premier d'entre eux est le délai de l'intervention. Les résultats chutent après 6 mois de temps de dénervation. Les auteurs s'accordent à dire que le résultat ne sera au mieux que pauvre à partir de 1 an de délai, date où il est préférable de garder les nerfs donneurs pour un transfert musculaire libre [113]. Le délai limite est variable selon les auteurs (9, 6, 3 mois). La plupart des auteurs s'accordent sur un délai maximal de 6 mois pour éviter la baisse des résultats. Ceci implique que les délais de consultation soient adaptés pour permettre de programmer

une intervention dans ce délai. Idéalement, la consultation à 1 mois permet déjà de connaître le pronostic de récupération spontané en fonction du nombre d'avulsions radiculaires (IRM, EMG, clinique). La consultation de 3 mois devrait conduire à confirmer l'indication d'exploration du plexus brachial. Compte-tenu du délai moyen d'organisation d'une telle intervention (électrophysiologie per-opératoire, durée de l'intervention), elle pourrait ainsi être réalisée à 4 mois. L'électrophysiologie per-opératoire et l'histologie complètent le bilan lésionnel, amenant à adopter la stratégie la plus adaptée. Cette relation au délai opératoire est fréquemment retrouvée, mais certains auteurs ne la constatent pas.

Notre recherche des résultats des différentes équipes montre 65% de résultats utiles environ. 23% des patients obtiennent une force contre pesanteur, 19% une force contre résistance (Tableau 24). Certains résultats ont été ignorés dans ce tableau car ils incluaient le résultat définitif, transfert musculaire secondaire compris.

Le délai opératoire moyen est de 4,7 mois, l'âge moyen de 25,4 mois, la proportion de patients plexiques complets 49%. Notre série nantaise le délai opératoire moyen est de 11,9 mois, l'âge moyen de 24,3 mois, la proportion de paralysies panplexiques de 86%.

On peut expliquer les résultats inférieurs (33% de résultats utiles, 26% de résultat contre résistance, 7% de résultats contre la pesanteur) par deux phénomènes principaux, à l'influence majeurs:

-un temps de dénervation beaucoup plus élevé que la moyenne des autres équipes.

-une proportion de paralysies panplexiques beaucoup plus élevée.

On peut donc penser qu'après correction du facteur délai, les résultats seraient comparables à la moyenne des équipes. De plus, les possibilités de transfert secondaire (libre ou pédiculé, voir ci-après) doivent contribuer à améliorer les résultats finaux. Enfin, on doit remarquer que d'autres équipes ont des résultats voisins (Malessy, Moiyadi).

Parmi les facteurs étudiés pouvant influencer les résultats sur notre série de patients, nous n'avons pas identifié d'élément déterminant associé à la motricité définitive.

année	revue	année publication	localité	nombre total	modalité	M3	M4	M3 et plus	âge	délat	proportion plexus complet	proportion plexus sup
1982-1984	in: Terzis (microreconstruction of nerve injuries)	1987	Vienne	16	IC	68%		68%	*	*	*	*
*	JHS	1987	Sapporo	17	IC	100%		100%	23	6	*	*
*	clin orthop	1988	Lausanne	24	IC	37%		37%	*	*	*	*
1972-1986	clin orthop	1988	Osaka	24	IC	29%	41%	70%	22,7	4,2	47%	53%
1984-1990	JNS	1990	Durham	14	IC	50%	0%	50%	22	7	*	*
1987-1989	JHS	1992	Taipei	66	IC	66%		66,0%	27	4 (2-12)	53%	47%
*	ann acad med Singapore	1995	Tokyo	112	IC	87%		87%	*	*	*	*
1973-1991	rev ch orth&rep	1997	Montpellier	62	IC (10), XI, C5 (43)	66%		66%	23	7	61%	39%
*	JNS	1998	Leiden	25	IC	8%	56%	64%	22,1	3,3	*	*
1989-1994	JHS	1999	Bangkok	75	IC	44%	20%	64,0%	25	3 (2-6)	*	*
1980-1995	neurosurg	2000	Belgrade	62 > 14	IC	28%	0%	28%	67% < 40 ans	4,5	51%	49%
1991-1999	JHS	2001	new haven	10	IC	20%	70%	90%	28	5	54%	46%
1998-2000	JHS(br)	2004	Chiang Mai	19	IC	52%		52%	25	< 6 mois	*	*
1990-2000	Hand clinics	2005	Taipei	301	IC	80%		80,0%	-	avant 5 mois	*	*
1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	22	IC	65%		65%	*	*	*	*
1997-2003	JNS	2007	Bangalore	22	IC	18%	13%	32%	28,7	6,4	44%	36%
1995-2005	neurosurg	2009	New Orleans	18	IC	22%		22%	32	*	21%	79%
				18	IC + reconstruction tronc sup	100%		100%	32	*	21%	79%
2000-2010	*	*	Nantes	18 > 15	IC	7%	27%	33%	24,3	11,9	86%	14%
						23%	19%	65%	25,4	4,7	49%	51%

Tableau 24: résultats des neurotisations intercosto-musculo-cutanées.

4° utilisation du nerf phrénique

C'est le russe Lurge qui mentionne le premier en 1948 [89] la possibilité de prélever le nerf phrénique comme donneur. Il ne le réalise cependant pas cliniquement. Curieusement, la section du nerf phrénique et la parésie diaphragmatique résultante était une des modalités de traitement de la tuberculose entre les deux guerres. Gu commence à l'utiliser réellement en 1970, et réalise la première publication en 1970 sur 125 neurotisations du nerf médian avec 85% de résultats satisfaisants [114]. Le nerf phrénique peut être anastomosé au nerf musculo-cutané ou au tronc supérieur [115]. La combinaison du transfert du nerf phrénique sur le musculo-cutané et des nerfs intercostaux sur le triceps a été réalisée par Zheng et Gu. Ils obtiennent de mauvais résultats [116] (ce qu'on aurait pu attendre, la même fonction inspiratoire ne pouvant être transférée à deux fonctions opposées).

Les résultats se sont confirmés comme impressionnants (Tableau 25), de l'ordre de 77,5% en mélangeant les résultats disponibles des auteurs et les différentes modalités.

Le prélèvement a également été décrit par thoracoscopie pour maximiser la longueur du donneur et éviter l'utilisation d'une greffe [117]. Cette méthode de thoracoscopie permet d'obtenir 12,3 cm de longueur supplémentaire de nerf phrénique, autorisant dans tous les cas une suture directe sur le nerf musculo-cutané ou la branche du biceps. L'apparition des premières contractions du biceps se situe dans ce cas à 4,6 mois post-opératoire (8,2 mois en cas de greffe d'interposition comme dans la technique «classique» où le nerf est sectionné derrière la clavicule). Cet artifice technique n'apporte pas de supériorité dans l'analyse réelle des résultats.

Luedemann a étudié sur 12 patients les conséquences pulmonaires du prélèvement phrénique [118]. La capacité vitale des patients passe en moyenne de 4,98 L à 4,64 L en post-opératoire. Ceci constitue une baisse de 15% environ. Gu note de sa grande expérience que la capacité vitale reste basse pendant 1 an, puis revient à la normale en 2 ans. Le VEMS (Volume expiratoire maximal par seconde) passe de 4,3 L à 3,8 L. Le côté de l'intervention influait sur les conséquences pulmonaires (montrant sans rentrer dans les détails une fonction pulmonaire plus altérée par section du nerf phrénique droit). Cliniquement aucun patient n'a eu de problème ventilatoire post-opératoire ou de conséquence dans ses activités physiques. Il faut préciser que pour cette étude, seuls les 12 patients indemnes de contusion pulmonaire préalable ont été étudiés. On aurait aimé connaître justement les résultats des patients à la fonction pulmonaire déjà altérée. Chuang a également confirmé l'impact du prélèvement phrénique et intercostal sur la fonction pulmonaire analytique, mais sans conséquence clinique à moyen terme [119]. Selon l'ensemble de la littérature, on relève uniquement 2 cas de problème pulmonaire postopératoire survenus chez des enfants, ayant récupéré secondairement. Étonnamment, les radiographies pulmonaires post-opératoires n'ont montré qu'une seule paralysie diaphragmatique post-opératoire sur 12 patients. Gu notait lui aussi 5 cas seulement (sur 180 patients) de paralysie diaphragmatique. Certaines études anatomiques anciennes décrivaient des affluences thoraciques pour le nerf phrénique, expliquant ainsi les échecs de section

phrénique (où l'objectif était alors de provoquer la paralysie diaphragmatique). Il existerait également dans 32% des cas un nerf phrénique accessoire non concerné par le prélèvement [120]. La question principale concernant la morbidité liée au prélèvement phrénique n'est toujours pas résolue. En effet, démontrer l'innocuité de son utilisation sur un sujet jeune et sain est une chose, démontrer quelle persiste tout au long de la vie, y compris chez un sujet âgé en est une autre.

auteur	année	revue	année publication	localité	nombre total	modalité	M3	M4	M3 et plus	âge	délai	proportion plexus complet	proportion plexus sup
Monreal	-	Hand	2007	Havana	20	phrénique-MC	40%	30%	70,0%	23	4 (2,8-8,6)		
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	151 >	phrénique-MC	60%	60%	60,0%				
Gu	1970-	microsurgery	1989	Shangai	125 > 65	phrénique-MC	85%	85%	85%	24,6	*	*	*
Vekris	1998-2004	microsurgery	2006	Athènes	17	phrénique (seul ou combiné)	100%	100%	100%	24,6	6	*	*
Xu	1999-	plast recon surg	2001	Shangai	15 > 11	phr-MC direct (thoracoscopie)	72%	0%	72%	28,9	5,1	46%	54%
Chalidapong	1998-2000	JHS(br)	2004	Chiang Mai	29	phr-MC (avec greffe interposition)	79%	0%	79%	24,5	5,3	55%	45%
Siqueira	2002-2007	neurosurgery (suppl)	2009	Sao paulo	17	phrénique-MC	29%	20%	29%	25			
Dong	2002-2005	JNS	2010	Shangai	10	phrénique-MC	50%	20%	70%	24,8	6	100%	0%
					40	phrénique-tronc sup	82,50%	82,50%	82,50%	31	4,6	77,50%	22,50%

Tableau 25: réanimation du coude par le nerf phrénique (résultats chez l'enfant non inclus) [6, 114, 115, 117, 225, 229, 234].

5° neurotisation spino-musculocutanée.

Bien que le nerf spinal accessoire soit principalement utilisé pour neurotiser le nerf suprascapulaire, il est également possible de l'utiliser pour ré-innervier le nerf musculo-cutané, moyennant une greffe de 8 à 13 cm de nerf sural (le taux de succès passe alors de 80% pour le nerf suprascapulaire à 60% pour le biceps) [6]. Il est également possible de suturer la greffe directement sur la branche motrice du biceps au prix d'une greffe encore plus longue (à ce propos, Allieu a montré que l'utilisation de 3 greffons n'était pas supérieure à 2 greffons).

En France, c'est surtout Merle et Allieu qui se sont tournés vers cette technique. Cette stratégie a sa logique, compte tenu de la possibilité d'arthrodèse d'épaule offrant des résultats fiables et une certaine mobilité. Le XI° nerf crânien, dont on a vu la qualité en tant que donneur, est alors libre pour être projeté sur le musculo-cutané. Ces auteurs privilégiant la fonction du coude, il est cohérent d'utiliser le «meilleur» donneur pour le mouvement le plus important.

Waikakul a montré dans un essai randomisé comparatif avec le prélèvement intercostal que l'utilisation du XI° nerf crânien était significativement plus simple que le prélèvement des nerfs intercostaux. Ainsi la durée opératoire, le taux de transfusions, la fréquence des complications immédiates sont significativement différentes. Il a également constaté que le transfert du nerf accessoire possède un inconvénient lié à la nature motrice du nerf accessoire: son utilisation résulte en une mauvaise récupération sensitive dans l'avant-bras et une mauvaise résolution des douleurs. Il conseille donc finalement, malgré de meilleurs résultats moteurs, de préférer les neurotisations intercostales aux transferts de l'accessoire dans les paralysies complètes [121].

Les études retrouvées par notre recherche bibliographique concluent globalement à un succès dans 71% des cas. 43% des patients obtiennent un résultat contre la pesanteur, 28% atteignent une force contre résistance (tableau 26).

Cette stratégie qui a été utilisée à Nantes une seule fois (M2, flexion du coude à 45°) permet globalement d'obtenir 71% de résultats utiles. 28% des patients réussissent à atteindre une force contre résistance. La méta-analyse de 2001 retrouve que 77% des patients parviennent au moins à une force de M3, 29% se hissant jusqu'à M4.

auteur	année	revue	année publication	localité	nombre total	modalité	M3	M4	M3 et plus	âge	délat	proportion plexus complet	proportion plexus sup
Kawai	1972-1986	clin orthop	1988	Osaka	9	XI	0%	44%	44%	22,7	4,2	47%	53%
Songcharoen	1984-1992	JHS	1996	Bangkok	192	XI	53,60%	19,30%	72,9%	26	6 (1-12)	*	*
Waikakul	1989-1994	JHS	1999	Bangkok	130	XI	41%	43%	84,0%	24	3 (1-6)	*	*
Samardzic	1980-1995	neurosurg	2000	Belgrade	62 > 20	XI	35%	0%	35%	67% < 40 ans	4,5	51%	49%
Samii	1994-1998	JNS	2003	Hannover	44	XI	20%	25%	45,0%	27	7 (3-24)	59%	41%
Songcharoen	1984-2003	Hand clinics	2005	Bangkok	577 > ?	XI	60%	60%	60,0%	*	*	*	*
Allieu	*	clin plast surg	1984	Montpellier	15	XI	46%	20%	66%	*	*	*	*
merle	*	in: réadaptation dans les lésions traumatiques du plexus brachial	1982	Nancy	7	XI	43%	14%	0,57	*	*	*	*
Brunelli	*	in: Terzis. microreconstruction of nerve injuries	1987	Brescia	13	XI	30%	15%	45%	*	*	*	*
Narakas	*	in: Bonnard, narakas, les paralysies du plexus brachial 2° ed.	1995	Lausanne	4	XI	50%	25%	75%	*	*	*	*
							43%	28%	71%				

Tableau 26: résultats des neurotisations spino-humérales.

6° double transfert ulno-bicipital et pectoral ou médian-brachial.

MacKinnon et Ray avaient historiquement privilégié la réinnervation du muscle brachial antérieur sur le muscle biceps (ils avaient utilisé avec succès le nerf pectoral médial ou le nerf thoraco-dorsal). Mackinnon considérait en effet depuis longtemps que le muscle brachial était plus puissant et que cet argument prévalait sur la supination apportée par le muscle biceps. Les résultats de l'équipe de Bichat sur la neurotisation ulno-musculocutanée l'ont conduit à associer sa technique avec l'intervention d'Oberlin.

Ils ont réalisé en 2001 leur première double neurotisation du biceps et du brachial antérieur, puis publié 100% de succès à M4 sur leurs premiers 8 patients [122], confirmant l'efficacité de la stratégie du transfert double.

Cette équipe a ensuite délaissé l'utilisation du nerf pectoral médial pour réinnerver le muscle brachial, car il nécessite de sacrifier l'adduction de l'épaule. Ils ont également renoncé au nerf thoracodorsal car il est d'une importance capitale pour les transfert musculaires libres secondaires. C'est donc vers le nerf médian (figure 43) qu'il se sont tournés, obtenant sur une plus grande série de patients (29 patients) 93% de récupération utile, avec 79% de récupération contre résistance (et pour mémoire un quart des patients jugés comme ayant récupéré une force normale) [123, 124]. Le délai moyen d'apparition des contractions musculaire est de 5,4 mois.

Parallèlement, Liverneaux & Oberlin [125] amélioraient sa technique dans la même direction pour aboutir à ce qu'il nomme l'intervention «Oberlin II» («Oberlin I» étant la neurotisation isolée ulno-bicipitale).

Les résultats du transfert combiné ciblant les muscles brachial et biceps marquent encore une amélioration supplémentaire. En moyenne sur les études recensées, on peut assurer une récupération utile dans 93% des cas (tableau 23). Chose importante, la plupart des patients récupèrent une force contre résistance (84%) et les photos de littérature montrant des patients soulevant 10 Kg sont désormais presque banales.

Cette technique de double transfert orienté vers les muscles biceps et brachial s'impose donc comme une nouvelle norme pour les paralysies supérieures.

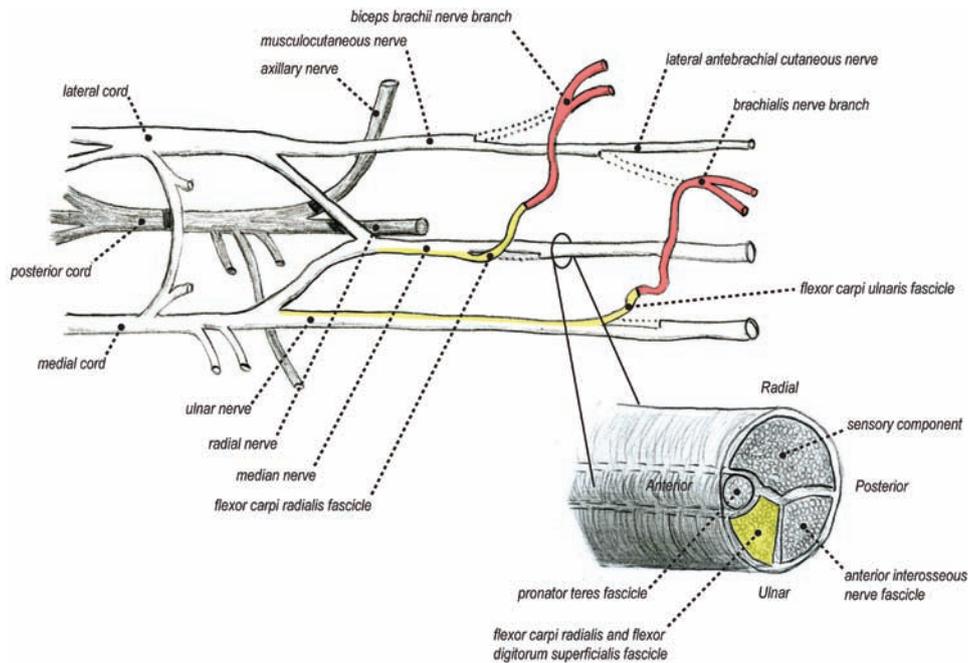


Figure 43: schéma du double transfert fasciculaire sur les muscles biceps et brachial [124].

Liverneaux et Oberlin retrouvent 100% de résultat contre résistance (sur 10 patients). Oberlin rapporte d'autres résultats ultérieurs sur 34 patients. En réalisant une comparaison historique de deux séries (figure 44), on voit clairement la puissance de cette modification technique qui permet de d'obtenir une force à M4 dans presque tous les cas.

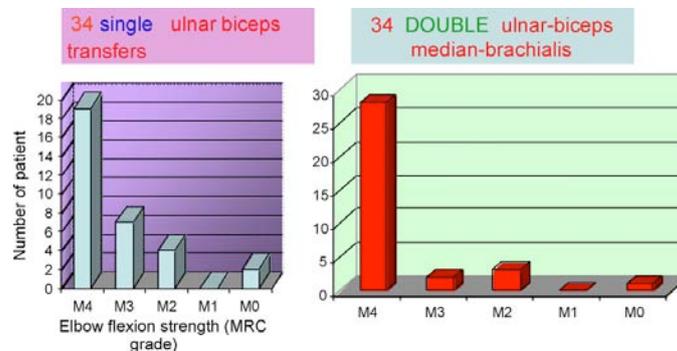


Figure 44: Comparaison graphique entre deux séries (ancienne série de 34 transferts simples, série récente de 34 doubles transferts) [93].

L'équipe de la Mayo-clinic a récemment évalué de façon comparative l'intérêt du double transfert pour la réinnervation du coude. Ils ont comparé la neurotisation isolée du biceps (ulno-musculocutanée chez 22 patients) et la neurotisation combinée du biceps et du muscle brachial (ulno-musculocutanée et médian-brachial chez 30 patients). Globalement ils confirment que l'on obtient de très bons résultats (73% de patients récupérant une fonction utile avec le transfert simple, 90% avec le transfert double). Ils retrouvent une tendance non significative à de meilleurs résultats pour la flexion du coude et la supination. En revanche la force de serrage de la main est meilleure après le transfert double (mais il peut s'agir de la conséquence de biais dans la constitution des

groupes). Ils disposent d'un laboratoire de biomécanique, permettant de donner une idée des forces développées par ces muscles réinnervés:

-flexion du coude: simple transfert (8,9 Nm, 16% du coté opposé) double transfert (12,5 Nm, 21% du coté opposé)

-supination: simple transfert (1,6 Nm, 22% du coté opposé) double transfert (3 Nm, 37% du coté opposé)

-force de serrage de la main: simple transfert (42% du coté opposé) double transfert (63% du coté opposé)

Pour conclure sur les résultats de neurotisation pour la flexion du coude, reportons nous à la méta-analyse réalisée en 2001 par Merrell et Wolfe [88]. En compilant 26 études, ils ont pu analyser en groupe les résultats de 965 transferts pour le coude (54% par les intercostaux, 39% par l'accessoire). Globalement, 74% des patients retrouvent une fonction utile (M3) et 37% retrouvent une force contre résistance. La neurotisation intercosto-musculocutanée directe obtient plus de résultats utiles que lorsqu'une greffe est interposée.

Le transfert du nerf accessoire par une longue greffe obtient des résultats voisins (77% de fonction utile, 29% contre résistance). Une nouvelle méta-analyse non publiée présentée au congrès de Lisbonne en 2011 confirme également l'équivalence de résultat entre la greffe de C5 et/ou C6 et la neurotisation intercostale.

Les enseignements de notre revue de la littérature sont assez clairs dans les paralysies supérieures: on peut presque garantir au patient une flexion utile du coude. L'enjeu devient désormais de lui fournir une force contre résistance en associant la réanimation classique du biceps par le nerf ulnaire à celle du muscle brachial par le nerf médian.

Dans les paralysies totales, la situation est différente, car on reste tributaire de la neurotisation intercosto-musculocutanée dont les résultats semblent plafonner autour des 2/3 de résultats utiles. L'utilisation du nerf phrénique pourrait améliorer la situation motrice, mais le prix à payer sur le plan respiratoire semble trop lourd actuellement. Nous n'oublions pas que les transferts musculaires ou tendineux viennent habituellement améliorer ce bilan imparfait.

La dernière réunion du «club Narakas» à Lisbonne en mai 2011 a mis l'accent sur l'importance de l'exploration systématique du plexus, même en cas de preuve préopératoire d'avulsion. La tentation est en effet grande, au vu des succès des neurotisations (en particulier d'Oberlin), de se cantonner à un geste brachial isolé. Une telle attitude prive le patient de l'effet de neurolyse antalgique sur le plexus, empêche l'utilisation de la racine C5 comme donneur, et impose une attente prolongée avant de poser l'indication de neurotisation.

Terzis notamment, souligne bien lors de l'analyse de ses résultats [8] que les nombreux succès qu'elle obtient sont dus au délai opératoire, mais également à la neurolyse patiente qu'elle réalise chez 43% des sujets. Elle a pour règle, lors de l'exploration du plexus, de réaliser une neurolyse externe sous microscope de toute zone indurée à la palpation. L'épineurotomie longitudinale est systématiquement effectuée, complétée éventuellement par une neurolyse intrafasciculaire.

C- les techniques complémentaires

1° neurotisation pour la main

On doit noter que la sensibilité de la main est primordiale pour plusieurs raisons. D'abord, le retour de la sensibilité est corrélée avec la disparition des douleurs. De plus, un certain degré de sensibilité de protection est importante pour éviter les blessures accidentelles. Enfin, le résultat moteur d'une réactivation de la main est sans effet sur une main aveugle, qui ne sera pas utilisée dans la pratique quotidienne.

Sur le plan anatomique, le nerf médian reçoit des contributions de C5C6 (15%), C7 (35%), C8T1 (25%).

Pour mémoire, on rappelle l'échelle de sensibilité du British Medical Research Council:

- *S4 : sensibilité normale ; distance de discrimination entre 2 points de 15 mm ou moins ; reconnaissance tactile.
- *S3 + : récupération de la discrimination entre 2 points dans le territoire autonome du nerf.
- *S3 : récupération de la sensibilité tactile et douloureuse superficielle dans la totalité du territoire autonome du nerf avec disparition de toute hypersensibilité antérieure.
- *S2 : récupération partielle de la sensibilité tactile et douloureuse superficielle dans le territoire autonome du nerf. Les patients ressentent alors souvent une recrudescence des «douleurs» qui sont en réalité le stade des dysesthésies et hyperesthésies.
- *S1 : récupération de la sensibilité douloureuse profonde dans le territoire autonome du nerf.
- *S0 : absence de sensibilité dans le territoire autonome du nerf.

Idéalement, la sensibilité est également évaluée par le seuil au test des filaments de Semmes-Weinstein (ayant repris dans les années 1940 les filaments de Von Frey en crin de cheval). Il est possible d'utiliser le kit de 20 filaments. Le seuil sensitif retenu est alors la moyenne des 3 derniers filaments perçus [126]. En théorie, 3 séries ascendantes et descendantes doivent être réalisées: la passation est fastidieuse. A titre de référence les seuils des dermatomes cervicaux, établis pour la population normales, sont présentés en figure 45.

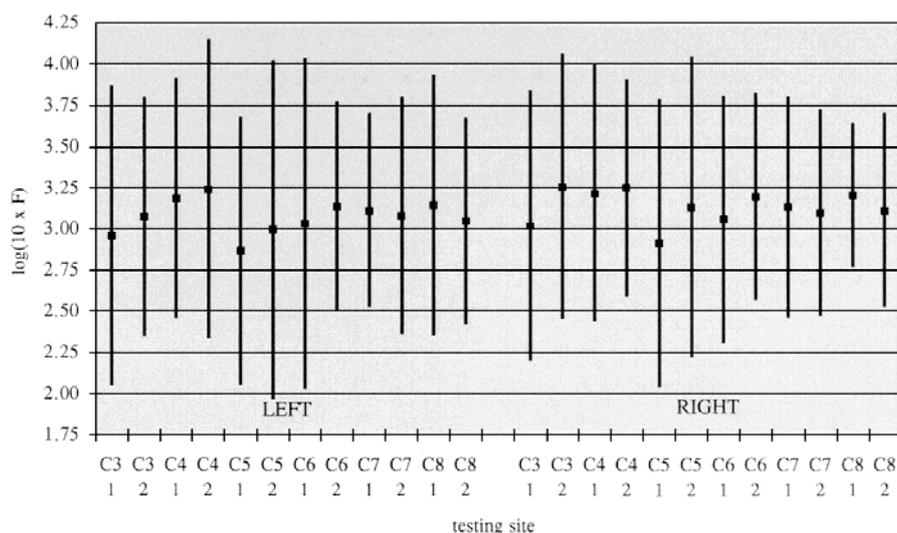


Figure 45: normes sensibles (filaments de Semmes-Weinstein) pour la population générale des dermatomes cervicaux [127].

C3 (milieu de la clavicule, milieu du bord supérieur du muscle trapèze)

C4 (bords antérieur et postérieur de l'acromion)

C5 (insertion du muscle deltoïde et 5 cm inférieur)

C6 (5 cm distalement à l'épicondyle et milieu de l'éminence thénar)

C7 (P1 et P3 de la face palmaire du majeur)

Le kit de 5 filaments de Semmes-Weinstein peut être utilisé pour une passation plus rapide. Il est intéressant car il existe une corrélation avec le seuil de sensibilité. Pour rappel, les filaments de Semmes Weinstein sont corrélés avec la sensibilité selon le BMRC de la façon suivante:

- une sensation profonde est présente si le filament de 6,65 est perçu (300 g, couleur rouge sur les diagrammes conventionnels)
- la sensibilité de protection est perdue ou diminuée si le filament de 4,56 (4g) ou 4,31(2g) n'est pas perçu (couleur rouge ou violette)
- une sensibilité superficielle diminuée est notée en bleu sur les diagrammes conventionnels.
- une sensibilité normale, la perception doit être de 2,83, en réalité 3,94 (0,6g) selon [127] (couleur verte).

Ces seuils augmentent avec l'âge et le sexe masculin[128].

On peut garder en mémoire une norme plus simple: 0,1g sur la face palmaire des doigts, 0,2g sur la face dorsale des doigts.

La densité des récepteurs sensitifs à adaptation rapide est évaluée par le test de Weber modifié par Dellon. La variante introduite par Dellon est que l'application des points est mobile:

- pulpes des doigts D1 D3 D4 D5: 3 mm
- pulpe de l'index: 2 mm
- face palmaire des doigts: 6 mm
- paume: 5 à 8 mm.

On doit enfin préciser qu'il a existé une controverse sur la fiabilité de la mesure de deux points statiques (le seuil de perception variant avec la pression de l'examineur) et que la perception de 2 points se déplaçant sur la peau est plus rapide à réapparaître que la discrimination statique.

Le risque de lésion cutané (conditionnant les conseils et la fabrication de protection de la main) est évalué par l'étude de la sensibilité de protection à la douleur, au moyen de la piqûre d'aiguille. La sensibilité thermo-algique est évaluée par l'application de tubes $>10^{\circ}$ et $>45^{\circ}$. Dans les deux cas, une réponse positive doit intervenir dans les 2 secondes suivant l'application du stimulus.

La réponse végétative est explorée par deux tests de passation exceptionnelle, mais pouvant être réalisés en cas de douleur:

-le test à la ninhydrine de Moberg est toujours réalisé en routine selon les publications de certaines équipes (Royal National Othopaedic Hospital, Norfolk). Il consiste à poser les doigts sur un papier buvard pendant quelques secondes. De la ninhydrine est ensuite vaporisée sur le buvard. Cette substance colore la sueur, les zones d'anhydrose restant alors blanches.

-le test d'O'Ryan consiste à immerger pendant 20 minutes le bras dans de l'eau à 40° . La peau correctement innervée se plisse quand les zones dénervées restent lisses.

Certains tests fonctionnels ne sont pas utilisés en routine, car en général au delà des possibilités du patient (test de graphesthésie, «picking-up test» de Moberg, «coin-test» de Seddon).

Il faut connaître les conséquences d'une lésion périphérique sur le plan sensitif dans le territoire dénervé, afin de mieux comprendre les possibilités et mécanismes de réhabilitation sensitive. La section du nerf périphérique s'accompagne de plusieurs phénomènes:

-une atrophie des récepteurs sensoriels dénervés. Ceci est particulièrement facile à observer pour les corpuscules volumineux et encapsulés comme les corpuscules de Meissner (superficiels immédiatement sous l'épiderme, à adaptation rapide, sensibles à la vibration lente 30 Hz) et de Pacini (profonds dans le derme, à adaptation rapide², sensibles à la vibration rapide 256 Hz). Les corpuscules de Merckel dégénèrent rapidement, puis les corpuscules de Meissner, enfin les organes de Pacini persistent plus longtemps.

-une atrophie cutanée. Les crêtes épidermiques sont moins saillantes et le nombre de couches cellulaires est réduit.

Lors de la récupération sensitive après lésion nerveuse, les modalités sensibles apparaissent selon la chronologie suivante [37]:

-récupération de la sensibilité à la douleur, au chaud et au froid correspondant aux fibres non-myélinisées. Ce stade s'accompagne d'un retour de la sudation, mesurable par le test de sudation à la ninhydrine[129, 130].

-récupération de fibres connectées aux récepteurs à adaptation rapide (Corpuscules de Meissner), évalués par le diapason basse fréquence (30 Hz). La réapparition de la sensibilité au test de discrimination de deux points mobiles suit, testant la densité des récepteurs à adaptation rapide.

² on distingue les récepteurs à adaptation rapide, actifs lors des modifications du stimulus mais entraînant une certaine «habituation» lorsque le stimulus est prolongé. Ces récepteurs sont impliqués surtout dans la prise d'objets. Les récepteurs à adaptation lente sont moins actifs aux modifications de stimulus mais restent actifs pendant toute son application (ils sont indispensables au maintien de la préhension).

-récupération de fibres connectées au récepteurs à adaptation lente (corpuscules de Ruffini) accompagnant la sensibilité à la pression constante. Le test de Weber mesure la densité de ces récepteurs.

-le retour de la sensibilité vibratoire rapide (256 Hz) est le plus tardif, correspondant aux corpuscules de Pacini.

La rééducation sensitive est importante, doit être réalisée en l'absence de douleur, par le patient lui-même quotidiennement, encadré par un thérapeute toutes les semaines. Elle est utilisée par de nombreuses équipes et dans des pathologies variées comme les lésions nerveuses périphériques [131-134], lambeaux cutanés libres, réimplantations digitales et pollicisations. Elle vise à éduquer à la protection des zones anesthésies. Elle lutte également contre le phénomène d'extinction (négligence du membre paralysé dans les gestes de la vie quotidienne). Pour cela, les patients ayant des possibilités motrices sont invités à réaliser régulièrement un geste maladroit de façon séquentielle avec le membre déficitaire. Le contrôle moteur est alors pleinement néocortical, palliant ainsi aux insuffisances des automatismes. Cet aspect est important, car certains patients sous-utilisent leur membre pourtant relativement fonctionnel. Dans les cas d'hypoesthésie, la rééducation repose par exemple sur la méthode du «touche à tout» de Spicher [135]. Cet entraînement consiste à localiser et discriminer les différents types de toucher: fixe ou encore mobile, long ou court, à courbe simple ou multiples. L'analyse est comparative avec le côté sain ou une région plus sensible. Progressivement, des structures de finesse et de grains plus fins sont appliqués. Dans un second temps, les variations portent sur les températures et les formes.

Pour atteindre une réhabilitation sensitive, plusieurs moyens chirurgicaux sont à disposition:

-Le plus simple est le cas des déficits du plexus supérieur. Il est possible de transférer les branches sensitives du nerf radial sur les nerfs collatéraux du pouce et de l'index bordant la première commissure[136-138] par une incision sur la face dorsale de la première commissure, comme proposé par Harris en 1921[139]. Le transfert peut aussi être réalisé au poignet [140].Ceci permet de récupérer une sensibilité de protection de la pince dans 100% des cas (S2). Une sensibilité S4 était obtenue dans 6 cas sur 7. Le transfert du nerf cutané latéral de l'avant-bras vers le nerf ulnaire a également été décrit chez l'enfant[141]. Enfin, il a été proposé d'utiliser le nerf ulnaire (branches digitales dorsales) pour redonner une fonction sensitive au nerf médian [140, 142].

-Il existe des possibilités dans les paralysies complètes. Cet aspect, largement sous-estimé dans la littérature mondiale (car l'attention des chirurgiens de la main et plasticiens s'est logiquement orientée d'abord vers la motricité) est capital pour la gestion de la douleur. La première possibilité est la neurotisation entre le nerf intercostal sensitif et le nerf médian. Hattori a décrit les résultats de la neurotisation sensitive intercostale pour la main chez 17 patients [143]. Millesi[144] et Narakas[35] utilisaient déjà cette technique auparavant.

Les résultats des différents auteurs concernant la récupération sensitive de la main dans les paralysies complètes sont donnés dans le tableau 27.

auteur	année	n	succès	%	donneur	remarque
Millesi	1977	18	15	83%	greffe C5 ou intercostal	protection
Kawai	1988	13	5	38%	intercostal	S2
Nagano	1995	10	9	90%	intercostal	protection
Ihara	1996	3	3	100%	intercostal	S2
Ihara	1996	10	2	20%	nerf supraclaviculaire	S2
Terzis	1999	54	35	65%	intercostal ou supraclav	protection
Songcharoen	2001	21	17	81%	hémi C7c	10(59%) S3
Terzis	2009	29	22	75%	hémi C7c	S3 (41%)
Hattori	2009	17	17	100%	intercostal	S2
		175	125	71%		

tableau 27: résultats des tentatives de ré-innervation sensitive de la main [143, 144, 212, 213].

Hattori utilise 1 à 4 rameaux sensitifs intercostaux pour les anastomoser sur le nerf ulnaire ou médian. Il faut noter que la branche sensitive intercostale est retrouvée de façon constante sur la ligne axillaire médiane[108]. Le choix du nerf à reconstruire est difficile (le nerf médian a une distribution sensitive plus large dans la main, le nerf ulnaire est plus important car il contrôle le bord ulnaire de la main) et l'auteur ne tranche pas. Il faut noter que l'auteur ne recherchait pas d'effet moteur car il utilisait délibérément un double transfert de gracile libre selon Doi [145], réanimant ainsi la plupart des fonctions motrices de la main. Tous les patients ont perçu le filament 6,65 de semmes-weinstein (correspondant à 300g) dans le territoire réinnervé. En revanche aucun n'a obtenu de discrimination de 2 points. Le délai moyen de récupération était de 17,9 mois (12 à 26 mois). On doit noter que la proportion de patients douloureux est faible dans cette série (11% de douleurs sévères occasionnelles) de plexus pourtant complets. Il est également intéressant de noter que le territoire sensitif ressenti était la main isolément dans 11% des cas, ou en association avec la région thoracique dans 29% des cas. On doit noter que Ihara en 1996 a obtenu des résultats plus fiables en utilisant les nerfs intercostaux (3 cas sur 3) que le nerf supraclaviculaire (2 cas sur 10).

Les résultats sont également possibles sur le versant moteur: il est envisageable de réanimer la flexion des doigts et du poignet, ainsi que l'extension du poignet et des doigts, y compris dans les paralysies complètes. Les résultats de la réhabilitation motrice du nerf médian par neurotisation sont présentés dans le tableau 28. Si l'on considère un objectif de M3, ce type de réhabilitation obtient 28% environ de résultats satisfaisants. 50% des patients obtiennent une force dans les muscles dépendant du nerf médian cotée M2.

Gu a été le premier à proposer la neurotisation du nerf médian distal. Il utilise comme donneur la racine C7 controlatérale, dans une intervention en 2 étapes.

Songcharoen et Terzis ont choisi de n'utiliser que la moitié de C7, en considérant que C7 contient 23000 fibres myélinisées, le nerf médian 15000, et que donc la moitié de la racine suffit. Utilisant les fascicules destinés à l'épaule et en utilisant un greffon ulnaire libre, Songcharoen [146] montre que le meilleur signe de récupération clinique est l'apparition d'un signe de Tinel au coude vers 7 mois (s'il apparaît vers 9 mois, la récupération sera de mauvaise qualité). La flexion des doigts et celle du poignet ne peut en général pas être différenciée par le patient. Le délai de récupération est de 34 mois. Wang et Gu ont décrit récemment 5 patients sur 32 (15%) ayant obtenu une force de M2 dans les muscles de l'éminence thénar [147].

Les résultats sont dus à la distance jusqu'aux muscles du nerf médian, car les résultats sont bons si le transfert C7 controlatéral est utilisé pour réhabiliter le nerf musculo-cutané (100% de succès sur 6 patients pour Hierner [148]).

Il existe également des résultats similaires pour la réinnervation des muscles dépendant du nerf radial à la main et au poignet, mais les effectifs sont moindres car la fonction est jugée moins importante (ou le nerf radial est reconstruit par d'autres méthodes).

Sur le plan de la morbidité du prélèvement de C7 controlatéral, Songcharen (sur une grande population de 111 interventions) présente des symptômes mineurs lors du prélèvement de la moitié des fascicules. Les fascicules prélevés sont ceux qui provoquent une extension du coude à la stimulation, généralement situés à la partie postérieure de la racine. Dans ces conditions, il retrouve:

- 97% des patients ayant des paresthésies dans une partie du territoire médian (coté sain) et 7% dans l'épaule et le bras. Les paresthésies ont disparu pour tous les patients en 3 mois (2 semaines à 7 mois).

- 3% des patients ont une parésie du membre sain. 2% ont eu une parésie M4 du triceps totalement récupérée en 2 mois. 1 patient a eu une parésie M2 de l'extenseur des doigts ayant évolué à M4 en 3 ans.

Gu a réalisé un EMG avec étude des vitesses de conduction nerveuse des muscles innervés par C7 chez 27 patients opérés par transfert de C7 controlatéral. Il n'a pas retrouvé de différence notable avec une population contrôle saine [149].

Sur le long terme et sur une grande série de patients, Songcharoen décrit donc 1% de déficit M4 de l'extension des doigts.

Ceci est contredit par l'expérience de la mayo-clinic qui rapporte un cas de déficit permanent ayant nécessité des transferts tendineux de réanimation, alors qu'il a obtenu des résultats peu encourageants [150]. Le tableau 29 reprend les complications relevées dans la littérature par le prélèvement de C7 controlatéral.

On doit enfin noter la technique astucieuse de Terzis qui utilise le concept de nerf «mis en banque sous-cutané». Elle réalise en effet des transferts nerveux lors de la première intervention qui ne sont pas reliés à une cible particulière, mais sont laissés en attente dans le tissu sous-cutané de l'avant-bras. Elle patiente le temps que la régénération se fasse dans ces nerfs d'attente, ce qui permet d'évaluer les besoins fonctionnels moteurs de l'avant-bras et de la main au terme de la

récupération de la 1^o vague de chirurgie. Elle dispose alors d'un greffon donneur nerveux immédiatement disponible et proche de la cible pour un transfert musculaire libre[8, 151]. Elle réalise également les transferts musculaires libres d'emblée, obtenant schématiquement 75% de motricité M2+ à M4- pour le biceps, et 45 à 65% pour l'extension du poignet et la flexion des doigts. Cette volonté de transfert secondaire musculaire libre est probablement l'une des raisons principales des succès globaux pour ses patients. Elle précise que le timing de l'intervention (inférieur à 9 mois) et l'âge (inférieur à 18 ans) sont des critères importants de succès.

auteur	année	revue	année publication	localité	nombre total	modalité	M2	M3	âge	délai	remarques
Gu	1993-1999*	JHS	1992	Shangai	4	C7c entier	25%	75%	26	12,5	données extraites de plusieurs receveurs par C7c plexus total, en association XI-MC et phrénique-MC 13% de M1. enfants (7 plexus obtétricaux, 5 accidents)
Songcharoen	1978-1996	JHS	2001	Bangkok	21	C7c (moitié post)	19%	29%	25	5	
Sammer & Shin	2001-2008	plast rec surg	1999	Norfolk	54	intraplexus (C5C6?)	±35%	30%	25,9	44% <6 mois 35% >1 an	
Hierner	1997-2007	acta neurochir suppl	2009	Rochester	21	hémi C7	7%	0	25	5,1	
Chen		JHS	2007	Louvain	4	hémi C7	25%	0	1,4**	4-7	
Terzis		plast rec surg	2007	Shangai	8	C7 entier*	0	63%	22,5	7	
			2009	Norfolk	29	hémi C7c	28%	34%		29,8	

*: 4 cas sur médian, 4 cas sur le médian et le musculo-cutané

** : 7 plexus obstétricaux, 5 accidents chez des enfants

28%

50%

tableau 28: résultats des séries de réinnervation motrice du nerf médian

auteur	année	modalité	n	paresthésies temporaires	douleur définitive	parésie temporaire	parésie définitive
Gu	1992	C7 entier	49	42	0	11	0
Songcharoen	2001	hémi C7	111	108	0	3	1 (M4)
Hierner	2007	hémi C7	10	10	0	0	0
Chen	2007	C7 entier*	12	"quelques"	0	2	0
Sammer & Shin	2009	hémi C7	21	21	0	8	1 (transfert tendineux)
Terzis	2009	hémi C7	56	40	0	0	0

*: série concernant des enfants

tableau 29: complications relevées dans la littérature après prélèvement de la racine C7 controlatérale (partielle ou entière)

2° transferts tendineux, musculaires et arthrodèses.

Nous avons proposé des transferts tendineux secondaires ou geste d'arthrodèse à 3 patients (11,5%) et ils ont été réalisés chez 1 patient (3,8%).

Concernant ces gestes orthopédiques associés, nous devons faire plusieurs remarques préalables. Selon Oberlin ceux-ci doivent être envisagés dès la première consultation. L'objectif global d'obtenir la meilleure fonction de l'ensemble du membre supérieur en fonction des circonstances de départ peut amener à adapter la stratégie au patient. Outre les caractéristiques cliniques, les notions de délai opératoire et de personnalité du patient sont à prendre en compte. Le résultat d'une arthrodèse semble par exemple plus garanti qu'un transfert nerveux chez un patient visiblement inconscient des enjeux de l'autorééducation. Au vu des résultats de neurotisation tardive de la littérature et de notre propre expérience, il est désormais vraisemblable que la neurotisation tardive XI-SS soit néfaste pour la fonction scapulo-thoracique pour un gain hypothétique de la fonction scapulo-humérale. Une telle stratégie dans les cas tardifs semble inférieure à une proposition d'arthrodèse scapulo-humérale avec renforcement des muscles scapulo-thoraciques. En plus d'affaiblir le trapèze, la neurotisation tardive prive les possibilités de transfert musculaire libre en utilisant un nerf donneur.

Le corollaire de cette assertion est que les équipes de plexus brachial doivent maîtriser toutes ces techniques pour les proposer au bon moment. L'équipe du CHU de Nantes est sur ce point exemplaire en ayant réussi à organiser (et maintenir dans le temps) une consultation multidisciplinaire réunissant trois spécialistes (neurologue, neurochirurgien, chirurgien de la main) dans la même pièce autour du patient.

Oberlin insiste également pour réaliser un certain nombre de gestes orthopédiques précocement, en particulier pour éviter l'enraidissement articulaire. Ce point mérite d'être débattu car (arthrodèse du poignet mise à part) les possibilités de transfert ne peuvent être évaluées qu'après un certain délai de récupération. Alnot préconise un délai de 12 à 18 mois[152]. Observant l'évolution naturelle des patients opérés par geste nerveux, Nagano [97] recommande d'entreprendre ces traitements secondaires dès que le patient reste à M0 à 12 mois, ou M2 à 18 mois (il réalise l'intervention à 3 mois). Ses patients dans cette situation n'ont en effet jamais dépassé M2 à terme. Il précise que la récupération des muscles deltoïde, triceps et biceps est synchrone.

Enfin, il faut d'emblée préciser que ces gestes peuvent être envisagés dans 3 circonstances radicalement différentes:

- le patient est vu tardivement, le résultat favorable d'une neurotisation classique est illusoire. Rien n'est perdu, mais la stratégie de réanimation de l'épaule passe par les transferts tendineux ou l'arthrodèse. La réanimation du coude passe par le transfert tendineux (selon Steindler par exemple) ou le transfert musculaire libre.
- le résultat de réanimation du membre est satisfaisant, permettant d'orienter la main. Il s'agit alors de réanimer un certain degré de fonction utile de la main. en fonction du patient, l'objectif est alors de stabiliser le poignet, de permettre l'ouverture des doigts et une forme de préhension.

-le résultat des neurotisations est décevant, car la motricité obtenue est insuffisante pour retentir dans la vie quotidienne du patient. On entre alors dans une autre phase de la prise en charge, où on entreprend des techniques d'augmentation du résultat partiel déjà acquis. Les résultats partiels (M1-M2 gagnent en général 2 points de cotation, permettant d'obtenir M3+ ou M4. L'expérience montre qu'à cette période les patients, déçus par les neurotisations, fatigués des séances de kinésithérapie, en pleine phase de deuil du membre perdu, sont réticents à toute nouvelle intervention. Notre conception du rôle médical à cette période, au même titre qu'un dépressif n'est pas objectif à consentir, est de prendre le temps de reconditionner psychologiquement les patients. On peut alors entreprendre pour l'épaule une arthrodeuse si la fonction périscapulaire est efficace ou un transfert tendineux. Le coude peut-être traité par transfert tendineux ou musculaire libre.

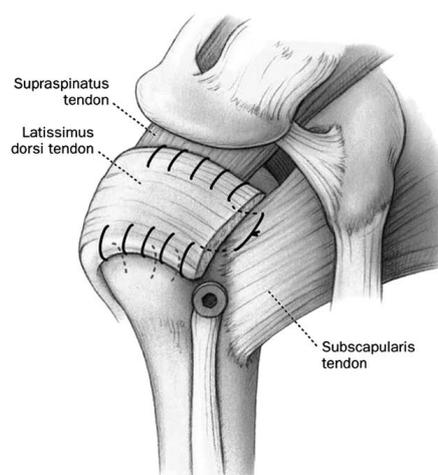
Parmi les techniques de renforcement de l'épaule, nous avons déjà abordé l'arthrodèse scapulo-humérale. Il s'agit de l'intervention palliative de référence, à laquelle les autres techniques doivent être comparées. Il existe néanmoins des situations où l'abduction et la rotation externe ont partiellement récupéré. Arthrodeuser une telle épaule conduit alors à sacrifier le résultat partiel obtenu. On peut dans ces cas s'orienter vers des possibilités de transfert musculaire pédiculé pour réanimer l'épaule. Enfin, certains auteurs déconseillent l'usage de cette technique, sauf en dernier recours [153]. Un des arguments est la difficulté dans la vie quotidienne induite par la rigidité du membre (mettre une main dans la poche, s'habiller) [57].

La plus pratiquée consiste en un transfert du trapèze [154] (Figure 46) selon la technique de Saha. L'acromion est alors sectionné à sa base, ainsi que la partie distale de la clavicule. La partie proximale de l'humérus est alors avivée à la scie oscillante ou aux ciseaux à frapper. Les insertions claviculaires internes et scapulaires du trapèze sont ruginées (en préservant malgré tout la partie médiane des insertions sur l'épine scapulaire). L'acromion avivé est alors fixé sur l'humérus par deux vis de 6,5 mm en compression, dans une position d'abduction à 80-90°. Le gain moyen est de 45° dans l'abduction, 35° dans la flexion d'épaule. Kotwal rapporte 19% d'échec et 60% de bons résultats par cette technique [155]. Ruhman a proposé de suturer en tension l'insertion proximale du deltoïde sur l'aponévrose du trapèze, améliorant l'efficacité du transfert [156]. Cette intervention est possible dans tous les types de paralysies. Elle est même possible après neurotisation par le nerf accessoire, car le chef supérieur du trapèze (qui est toujours préservé) s'hypertrophie en compensation après la neurotisation.



Figure 46: transfert du muscle trapèze pour la réanimation de l'abduction de l'épaule, selon Saha (tiré de Aziz [154]).

-Le transfert du muscle grand dorsal et/ou de teres major a également été proposé dans les paralysies supérieures (car il est déficitaire dans les plexus complets). Ross [157] met en garde contre l'utilisation du grand dorsal (innervé par C5C6) après récupération d'un déficit initial, même partiel. Il n'a en effet jamais obtenu de bon résultat dans cette situation. Il est surtout proposé dans les paralysies obstétricales, et apporte surtout un gain de rotation externe. Le tendon du muscle grand dorsal est abordé par une incision le long du bord latéral de la scapula. Le tendon du muscle grand dorsal est identifié, libéré (sans léser son pédicule vasculo-nerveux) et désinséré. une seconde incision est alors réalisée pour permettre de passer le tendon entre les chefs postérieur et moyen du deltoïde. Le tendon est fixé sur la tête humérale selon la figure 47. Cette intervention qui est habituellement utilisée chez les adultes dans les ruptures de la coiffe des rotateurs, nécessite une fonction suffisante du deltoïde et du muscle subscapulaire.



Le muscle gracile a été utilisé en tant que transfert libre anastomosé sur le nerf accessoire et les vaisseaux cervicaux transverses [158]:

- pour remplacer le muscle supra-épineux, l'insertion proximale était alors fixée sur le processus épineux de C7.

- pour remplacer le muscle deltoïde, l'insertion proximale étant alors fixée sur l'épine de la scapula et la clavicule. L'insertion distale était alors insérée et vissée sur le col huméral.

Les résultats sont de l'ordre de M2-M3, ne permettant pas une abduction supérieure à 20°.

Une autre option souvent envisagée est de réaliser une ostéotomie de dérotation humérale externe en cas d'insuffisance de rotation externe. Ross la considère lorsque la main vient buter contre le thorax. La main est alors inutilisable, malgré une bonne flexion de coude. Ce geste n'a aucun intérêt en cas de coude non-fonctionnel, et risque de ne pas être utile si l'épaule n'est pas stable. Ross la réalise au 1/3 distal de l'humérus: après incision latérale traversant le muscle brachial antérieur, deux broches sont fixées de part-et-d'autre du trait de coupe. La rotation externe est au minimum de 60°, puis fixée par une plaque vissée complétée d'une attelle plâtrée pendant 2 semaines. Il s'agit d'une intervention fiable, car la pseudarthrose est peu fréquente, et la technique permet à 60% des patients de porter la main à la bouche. Dans 35% des cas, ce résultat n'est pas atteint malgré une amélioration fonctionnelle.

Il est également possible de transférer un muscle libre. Cette technique permet de transférer un muscle qui n'a pas subi de dénervation. Les muscles transférables doivent réunir plusieurs conditions:

- Un pédicule artérioveineux unique ou prédominant (correspondant aux types I, II et V de la classification de Mathes et Nahai [159]).

- Un force voisine du muscle remplacé, généralement proportionnelle au volume musculaire (à la surface physiologique de section transversale de ses fibres exactement). Les points d'insertion des tendons et leur distance au centre de rotation de l'articulation ont également une grande importance. Le muscle le plus proche du biceps sur le plan de la force est le droit fémoral (par rapport au gracile et au grand dorsal) mais son excursion est moindre.

- Et une excursion identique au muscle remplacé. L'excursion d'un muscle est en général de 40% de la longueur de la fibre au repos. Cette règle générale varie en fonction du pennage des fibres musculaires, des connections fasciales voisines et des adhérences post-opératoires. Le positionnement du tendon par rapport à l'articulation, ainsi que le nombre d'articulations prises en charge modifient également l'excursion du muscle. Les excursions des muscles les plus courants sont: gracile (26 cm), grand dorsal (23-28 cm), droit fémoral (8 cm). Elle doit idéalement être supérieure à l'amplitude articulaire du site receveur (3 cm pour flexion poignet, 5 cm pour extension des doigts, 7 cm pour flexion des doigts).

La méthode utilisée par Terzis pour la reconstruction de l'épaule [160] consiste en un double transfert des muscles gracile et long adducteur pour simultanément réanimer les fonctions d'abduction de l'épaule et de flexion du coude. Ces deux muscles sont transférés simultanément car ils partagent le même pédicule vasculaire. Les muscles sont placés en place du deltoïde et du biceps

brachial, amenant le pédicule vasculaire à 10-12 cm sous l'acromion. Une greffe veineuse est donc indispensable pour permettre l'anastomose aux artères porteuses (artère carotide interne, sous-clavière ou cervicale transverse), aux veines receveuses (sous-clavière, basilique, jugulaire), rendant la technique particulièrement exigeante sur le plan chirurgical.

Proximale, les deux muscles sont fixés par des points trans-osseux sur l'acromion (long adducteur) ou la clavicule (gracile). L'insertion distale se fait sur le «V» deltoïdien pour le muscle long adducteur, sur la tubérosité radiale pour le muscle gracile. La neurotisation du muscle long adducteur peut se faire alors sur le nerf spinal accessoire, dorsal de la scapula, ou les branches motrices du plexus cervical. Sur une série de 18 transferts, cette technique présente 11% d'échec, mais la force obtenue est de 2,61/5, permettant une abduction moyenne de 30°.

Il est également possible de transférer le muscle grand dorsal avec anastomose de son pédicule vasculaire et nerveux. Il est alors fixé sur la ligne nuchale supérieure et les processus épineux des vertèbres cervicales et dorsales hautes. La partie distale du muscle est fixée au tendon deltoïdien. Le pédicule nerveux est neurotisé par les nerfs intercostaux ou un transfert C7 controlatéral. Ceci permet d'obtenir une force évaluée en moyenne à 3,25/5, avec une abduction moyenne de 40°, sans échec rapporté.

Concernant le renforcement de la fonction du coude, on peut proposer plusieurs techniques:

La plus simple consiste en l'injection de toxine botulinique dans le muscle triceps en cas de co-contractions du coude, ou dans les pectoraux en cas de contraction en adduction de l'épaule. L'option prise au CHU a été de plutôt confier au biofeedback ce type de patient lorsque le cas de figure s'est présenté à la consultation. L'interview de ces patients longtemps après a montré que le biofeedback n'a pas été mis en oeuvre (par défaut d'équipement des kinésithérapeutes). Les patients examinés pour cette étude ont toujours une contraction prometteuse annihilée par la co-contraction antagoniste. L'expérience clinique subjective des partisans de cette technique facile insiste sur l'effet bénéfique dans l'intégration du geste par le patient, permettant d'initier le contrôle de la flexion. L'effet de la toxine disparaissant au bout de 4 mois, la rééducation s'en trouve alors grandement améliorée grâce à l'effet de mémorisation du geste.

La technique la plus courante pour réanimer le coude consiste à renforcer la puissance de flexion de coude des muscles épitrochléens. Ces muscles bi-articulaires permettent en effet à certains patients de compenser le déficit brachial par l'utilisation de ces muscles. Steindler propose de transférer le tendon d'insertion de ces muscles 6 cm plus proximale sur l'humérus afin d'augmenter leur efficacité. Il s'agit donc de disséquer les muscles épitrochléens (en laissant la partie ulnaire du muscle fléchisseur ulnaire du carpe), leur pédicule nerveux, puis de prélever l'épicondyle médial. Alnot conseille de le réinsérer 4 cm plus haut sur l'humérus [161], car il a constaté que l'excès de transposition aggravait l'effet Steindler (la flexion concomitante des doigts et la pronation du poignet), orientant alors la main dans une position non-fonctionnelle. Brunelli

précise que le réglage de la tension du muscle transféré doit produire un déficit d'extension du coude de 25° environ [162]. Brunelli transfère l'épicondyle 6 cm plus haut, comme dans la technique originale de Steindler, mais sa solution pour éviter «l'effet Steindler» est de disséquer l'insertion du muscle fléchisseur superficiel des doigts et d'éviter de prélever son insertion. Tous les patients opérés par Brunelli pouvaient soulever 1-2 Kg, 75% pouvaient soulever 3 Kg, alors que 12% des patients avaient un effet Steindler post-opératoire.

Oberlin dans sa série réalise un transfert des épitrochléens selon Steindler dès 12-15 mois en cas d'insuffisance de résultat moteur [104]. Dans les cas de motricité nulle préopératoire, il obtient M3 ou M4, et dans les cas de motricité M2 préopératoire, il obtient une force permettant de soulever 3,3 kg en moyenne. Alnot conseille ce transfert lorsque la force du coude est à M2 et que les muscles épitrochléens sont au moins capables de contraction contre résistance.

En cas de muscle petit pectoral fonctionnel, il est également possible pour la même force de poignet de réaliser un transfert du muscle petit pectoral selon la technique décrite par P. Le Coeur en 1953. Ce geste permet de transformer un coude insuffisamment fonctionnel (M2) en M3+ ou M4. Il peut également être utilisé seul dans les paralysies C5C6. Techniquement, le muscle est détaché des 3°, 4° et 5° côtes en conservant une bande périostée sur le tendon thoracique. Celui-ci est tunnelisé jusqu'au bras, où plusieurs fils sont faufiletés dans le tendon pectoral, suturés au tendon bicipital. La tension du muscle doit être réglée à 90°. Cette modalité de réanimation du coude a été comparée avec la plastie des fléchisseurs selon Steindler, ne retrouvant aucune différence en terme de force, d'amplitude de mouvement ou subjectivement par le patient [163]. Alnot déconseille le transfert du grand pectoral, car il est innervé principalement par C5C6, donc rarement utilisable dans les paralysies plexiques.

Enfin, il existe une technique idéale en cas de co-contraction du coude [162]: le transfert du triceps sur le biceps selon Bunnell (1948). Elle consiste à prélever le triceps par une incision médiane postérieure. Le tendon est glissé en sous-cutané à la face externe du bras, puis suturé au biceps en position de coude fléchi à 90°. Brunelli considère ce transfert comme le plus simple à réaliser.

Parmi les transferts libres appliqués au coude, le plus utilisé est le muscle gracilis en raison de sa longueur, de la qualité de son tendon distal et de la longueur de son pédicule. Le tendon proximal est fixé proximalelement à travers des trous trans-claviculaires par des fils non résorbables. Le tendon distal est fixé par deux vis en compression avec une rondelle sur la tubérosité bicipitale du radius. Il est également possible de fixer le tendon gracie sur celui du biceps selon Pulvertaft. Les tensions sont ajustées en position de flexion de coude à 30° et le muscle à sa longueur de repos.

Bishop obtient une force à 4/5 dans 79% des cas [113]. Terzis retrouve sur 28 cas une force moyenne de 1,14 en préopératoire améliorée à 2,8 en post-opératoire [164]. On voit que ce transfert permet un gain de force de 1,6 en moyenne. Il s'agit d'un résultat moyen peu satisfaisant, attribué à la faiblesse du muscle gracile. Depuis elle utilise le transfert libre musculo-cutané de grand dorsal avec des résultats plus favorables (augmentation de 2,1 /5 la force du coude). Le droit fémoral

permet également d'augmenter la force du coude de 2,1 /5. Les nerfs utilisables comme donneurs sont variés (XI, C5, phrénique, plexus cervical, intercostaux) avec de meilleurs résultats pour le nerf accessoire. Il faut noter qu'elle propose un transfert combiné sur le même pédicule: gracilis pour la flexion du coude et long adducteur pour l'abduction de l'épaule. Cette technique difficile, imposant une greffe veineuse, est grevée d'un taux d'échec immédiat de 11%.

Enfin, il faut mentionner l'attitude de Doi qui propose d'emblée (sans neurotisation préalable) la reconstruction de tout le plexus avec un double transfert de gracile. Ce double transfert assure à la fois la stabilité de l'épaule, la flexion et extension du coude, et une fonction rudimentaire de préhension/ouverture de la main (et sensibilité de la main par neurotisation intercostale sensitive sur le faisceau latéral).

-Le premier gracile est neurotisé par le nerf accessoire et vascularisé par le tronc thoraco-acromial. Il est fixé à la clavicule puis sur le tendon du muscle court extenseur des doigts en Pulvertaft. Il faut réaliser une anse de seau avec le fléchisseur ulnaire du carpe réaliser une poulie de réflexion évitant que le gracile ne prenne la corde au coude. Ce premier transfert permet la flexion du coude et l'extension des doigts.

-Le second est neurotisé par les nerfs intercostaux et vascularisé par les vaisseaux thoraco-dorsaux. Il est fixé sur la seconde côte et sur les tendons suturés des muscles fléchisseur profond des doigts et long fléchisseur du pouce. Il utilise le rond pronateur comme poulie de réflexion. Il est donc destiné à la flexion des doigts.

Ceci permet de rendre fonctionnelle la flexion du coude dans 96% de ses patients tous en réanimant la flexion des doigts dans 65% des cas (la «flexion des doigts» correspond à 30° minimum de l'amplitude complète de mouvement des doigts) [165]. Ce double transfert a été modifié pour permettre l'extension simultanée des doigts [113]. Ce type de transfert se solde souvent par des adhérences cicatricielles aux poignets et aux doigts, améliorés par la ténolyse secondaire.

Avant d'envisager la remise en fonction de la main[152], on doit commencer par préciser les caractéristiques cliniques de celle-ci. Nous n'envisageons pas le cas des lésions rétro et infraclaviculaires (de présentation différente) car elles ne relèvent en théorie pas de neurotisations mais de greffes intraplexuelles. Les lésions supraclaviculaires peuvent avoir 3 présentations différentes:

- soit il s'agit d'une paralysie supérieure C5C6 ou C5C6C7 donnant un tableau de main tombante
- soit il s'agit d'une paralysie plexique complète totalement inerte.
- soit il s'agit d'une paralysie C8T1 ou C7C8T1 conduisant à un déficit de la flexion des doigts et de la pince.

Le fonctionnement de la main étant extrêmement complexe, il convient de se fixer des priorités et de hiérarchiser les fonctions élémentaires. Celles-ci doivent être évaluées cliniquement, l'intervention visant à rétablir la fonction la plus élémentaire non valide.

-L'extension du poignet est la fonction élémentaire, car elle permet de positionner la main en face de l'objet et de stabiliser sa prise. En cas de déficit complet, elle permet pas effet ténodèse une certaine flexion automatique des doigts.

-La flexion des doigts longs est ensuite la priorité, car elle permet la prise globale digito-palmaire de serrage autour d'un objet. La prise latérale (par flexion de pouce) prime ensuite.

-La priorité suivante revient à l'extension des métacarpophalangiennes et à la fonction de repositionnement du pouce en extension/abduction, afin d'ouvrir la main, d'adapter le volume de la main à l'objet.

-Ensuite la réanimation de la main vise à restaurer la prise fine en restaurant l'opposition du pouce. Ceci permet l'utilisation de la pince polici-digitale pulpo-pulpaire.

Dans le syndrome C5C6(C7) de la main tombante, les fonctions déficitaires sont d'abord l'extension du poignet, puis l'ouverture des doigts et du pouce.

Alnot réalise alors un transfert tendineux dans 70% des cas décrits.

L'extension du poignet était restaurée par le muscle rond pronateur (disponible dans 65% des cas) sur le muscle court extenseur radial du carpe (ECRB), jugé comme fiable (100% de réussite). Les cas d'utilisation du fléchisseur superficiel des doigts sur l'ECRB sont moins fiables (40% de succès).

L'extension des doigts était réanimée par le muscle fléchisseur ulnaire du carpe (disponible dans tous les cas). Là aussi le muscle fléchisseur superficiel donne des résultats inconstants (50%).

Alnot a réalisé une ténodèse des muscles radiaux dans 15% des cas Cela permettant la rectitude du poignet au repos et une extension par effet ténodèse de la flexion des doigts (qui est conservée dans ces cas). Dans les cas où C8 est lui aussi lésé, on ne dispose plus de moteurs pour réanimer activement l'ouverture des doigts. Une ténodèse des tendons extenseurs est alors proposée pour ouvrir passivement les doigts par la flexion du poignet (par fixation des tendons extenseurs au radius). Monreal réalise une ténodèse «dynamique» en suturant les tendons extenseurs à eux-mêmes autour du rétinaculum des extenseurs[166].

Dans le syndrome C8T1 de déficit de flexion des doigts et de la pince, les muscles disponibles sont les radiaux et le brachioradialis. Il arrive qu'aucun muscle ne soit disponible (en cas de déficit complet récupéré partiellement sur les racines supérieures). Il sont utilisés de la façon suivante:

-court extenseur radial du carpe (ECRB, disponible dans 80% des cas) sur le muscle fléchisseur profond des doigts, permettant d'obtenir 80% de bons résultats.

-brachioradialis (BR, disponible dans 80% des cas) sur le tendon du long fléchisseur du pouce avec arthrodèse de la MP, permettant d'obtenir 2/3 de bons résultats.

Enfin dans le syndrome de main complète, inerte, Il y a peu de choses à proposer selon Alnot en 1993, en dehors d'une réhabilitation sensitive. Malgré le coté rétrograde de cette intervention

dans les autres indications que la paralysie plexique, Brunelli préconise l'arthrodèse de poignet à 20° d'extension et 15° d'inclinaison ulnaire[167]. La plupart des auteurs antérieurs préconisent une position entre 0 et 20° d'extension. L'arthrodèse permet d'améliorer la force des éventuels muscles fonctionnels résiduels (spontanés ou réanimés). Les techniques de fusion diffèrent selon les auteurs, mais consistent toutes schématiquement en un avivement articulaire, une prise de greffon osseux (iliaque, radial, tibial) impacté dans l'interligne et une immobilisation (plâtrée ou vis). D'autres auteurs déconseillent formellement l'arthrodèse de poignet car il supprime l'effet ténodèse de fermeture des doigts. Ils soutiennent que l'effet ténodèse suffit à la préhension des doigts, même dans une main complète, si:

- le sujet peut s'asseoir et se lever
- la pronation est fonctionnelle
- le poignet est souple

3° rééducation, réinsertion

Notre enquête auprès des patients nous a fait prendre conscience d'un point important, lors de conversations informelles longtemps après la prise en charge. Le découragement guette et a contribué au résultat dans de nombreux cas. On peut comprendre ce phénomène, compte tenu de la lenteur de la récupération et des efforts cognitifs de la rééducation. Beaucoup de patients n'ont pas effectué la rééducation optimale, souvent par manque d'information de son importance. L'attention portée à ce facteur psychologique est à notre sens primordial dès la phase précoce, car notre expérience montre systématiquement un relâchement au bout de 1 à 2 ans, date où les décisions de transfert secondaires sont à prendre. Ces transferts sont actuellement souvent refusés par nos patients par manque de compréhension et par lassitude à cette période. Cette période charnière des 1 à 2 ans post-opératoire est en général la période de deuil de la fonction perdue, au fur-et-à-mesure que le résultat définitif se confirme. En raison de la rareté des consultations avec chacun des patients, nous n'avons pas franchement observé de réaction strictement caractéristique de deuil selon les 5 étapes d'Elisabeth Kubler-Ross [168] (déli, colère, marchandage, dépression, acceptation). En revanche l'existence de ce type de réaction doit être connu et anticipé. Le rôle médical est à notre sens, de renforcer la motivation des patients pour leur permettre d'accéder aux soins qui ne seront pas réalisés plus tard. Le concept ne se discute pas lorsqu'il s'agit de convaincre un paraplégique de s'auto-sonder, où le médecin se croit en droit de convaincre le patient. Le plexus brachial est également une pathologie chronique qui nécessite de consacrer du temps à expliquer les enjeux de la rééducation et des gestes secondaires. On doit d'ailleurs préciser que de nombreux auteurs présentent leurs résultats APRES gestes d'amélioration de la fonction.

Il est également important de noter l'importance des précautions prises lors de la mobilisation du membre pendant la période initiale. Un patient a raconté comment la motricité bicipitale initiale vers 9 mois a disparu brutalement après un étirement de l'épaule opérée lors d'un match de football. Il a ressenti un claquement dans l'épaule avec une sensation de rupture d'élastique dans l'aisselle. L'EMG qui suivait 2 semaines plus tard a constaté la disparition de toute activité volontaire. La mesure per-opératoire de l'angle limite d'ouverture de l'aisselle devrait être notée dans le dossier et communiquée au patient et au kinésithérapeute.

La période post-opératoire est cruciale pour le résultat post-opératoire (bien que nous n'ayons pas retrouvé d'influence de la pratique de la kinésithérapie sur le résultat de l'épaule ou du coude. On retrouve peu de référence sur la rééducation postopératoire du plexus brachial. Nous livrons ici les réflexions personnelles des auteurs des quelques articles sur le sujet [169, 170].

La rééducation doit débiter dès la période préopératoire, période où il faut être attentif à plusieurs facteurs:

-l'immobilisation préopératoire par une attelle de soutien du membre est souvent utilisée, car elle sécurise le patient, préserve la capsule articulaire scapulo-humérale. La position

permettant de surélever légèrement la tête humérale par rapport à la glène serait idéale. Une orthèse de poignet en extension de 10-20° peut être utile, car l'enraidissement du poignet en extension peut aider la flexion des doigts ultérieurement.

-l'auto-entretien articulaire doit être appris au patient, y compris des doigts. La mobilisation articulaire devrait être réalisée 5 à 6 fois par jour, avec 10 à 20 répétitions à chaque fois.

-la stimulation musculaire des muscles dénervés prochainement neurotisés est recommandée par Terzis et Doi, négligée par d'autres. On doit préciser les notions de rhéobase et de chronaxie. La rhéobase est le seuil d'intensité de stimulation minimale efficace, avec une durée de stimulation infinie. Elle doit être mesurée en pratique en utilisant des impulsions de 100 à 300 ms, séparées de 1 seconde. L'intensité est ainsi augmenté progressivement. Ceci permet de mesurer la chronaxie (seuil temporel de stimulation minimale efficace, avec une intensité de 2 fois la rhéobase).

Le muscle normal a une chronaxie de moins de 1 ms, évoluant vers 25-30, voire 100 ms pour un muscle dénervé. La mesure régulière de la chronaxie par le patient permet d'observer sa normalisation, critère de réinnervation du muscle plus précoce que les signes EMG et cliniques.

Un appareil de stimulation et de biofeedback portatif pourrait être prescrit au patient pour une utilisation autonome et quotidienne. L'apprentissage devrait se faire en milieu de rééducation, pour trouver les points moteurs et avec des vérifications régulières de l'utilisation par le patient. On trouve actuellement en 2011 quelques appareils de biofeedback portatifs:

- MYODYN 2, MYODYN 3
- MYONOS 2
- MYOX 2
- DYNATRAC 2
- MÉTROGYM
- MYOTRAC INFINITI
- PHENIX PORTABLE PHYSIO

Les impulsions de stimulation doivent être rectangulaires (pas de pente), longues (de l'ordre de 100 ms), isolées (séparées par un long intervalle de temps), unidirectionnelles à polarité fixe ou alternée. Il est important de vérifier l'absence de brûlure, surtout en zone anesthésiée, et de varier les points d'application des électrodes. On recommande de réaliser 2 à 6 séances quotidiennes, chacune de 30 à 60 contractions modérément fortes (contraction visible).

La prise en charge post-opératoire débute par l'immobilisation qui doit être contrôlée. Pendant l'immobilisation initiale d'une durée de 3 semaines minimum, la main et le poignet sont mobilisés immédiatement. Ensuite, la mobilisation de l'épaule devrait être restreinte définitivement à une zone d'amplitude articulaire sûre (en particulier pour les transferts intercostaux). Cela permet de prévenir les ruptures de l'anastomose intercosto-musculocutanée, comme cela s'est produit pour l'un de nos patients lors d'une partie de football. Son bras a été porté involontairement en abduction

rotation externe, conduisant à une sensation de claquement élastique dans l'aisselle. Les contractions volontaires naissantes ont alors complètement et définitivement disparu.

On peut choisir de provoquer intentionnellement un flessum de coude, aidant à l'initiation du mouvement de flexion de l'avant-bras.

La stimulation électrique recommence à 3 semaines, après la cicatrisation cutanée, selon les mêmes modalités. Il est important de rencontrer le patient tous les jours pendant les 3 premiers mois post-opératoires, puis tous les deux jours. Il s'agit de la période clé pour le résultat postopératoire. Le biofeedback est alors très utile, car on constate souvent un défaut d'efficacité dans la commande de muscles pourtant réinnervés. Il faut alors monitorer simultanément la fonction controlatérale pour fournir au patient une référence qui lui montre les progrès accomplis.

Si le biofeedback est indisponible, on peut proposer la stimulation électrique neuromusculaire, en déclenchant la contraction artificiellement pour apprendre au patient sa sensation proprioceptive. On diminue alors progressivement l'intensité de stimulation en demandant au patient de continuer seul les contractions. En outre la contraction musculaire provoquée permet, de façon variable selon le protocole de stimulation, d'entretenir la trophicité musculaire. On améliore ainsi de 10 à 25% l'atrophie et de 25% environ la force [171].

La rééducation musculaire débute lorsque les signes EMG de réinnervation apparaissent. Le patient produit alors en général facilement une contraction en reproduisant la fonction du nerf donneur (les séances doivent être courtes pour éviter la fatigue et l'hyperventilation). Les consignes à donner au patient sont variables selon le nerf donneur:

- en cas d'utilisation du nerf phrénique ou intercostal: il est préconisé d'utiliser des techniques de respiration (notamment respiration profonde, respirer à lèvres plissées, tousser, bailler, manoeuvre de Valsalva).
- en cas d'utilisation du nerf accessoire: utiliser l'élévation de l'épaule.
- si C7 controlatéral été utilisé: mimer les mouvements de C7 en miroir, notamment la fermeture du poing controlatéral.
- pour les fascicules du nerf ulnaire: utiliser la flexion du coude combinée à flexion ulnaire du poignet. On peut utiliser également les autres fonctions ulnaires comme adduction abduction des doigts.

Initialement les exercices se font avec élimination de la gravité (assis le bras sur une table, ou allongé): l'objectif est d'atteindre le maximum d'amplitude. Puis on rajoute quelques poids légers dans cette position. Lors de la période suivante de renforcement musculaire, on utilise d'abord la gravité, puis les poids (100-250g). Il est important de varier les contractions isométriques, concentriques et excentriques. Cette phase de travail peut induire des douleurs de surentraînement.

La rééducation sensitive est également envisageable, dans un but antalgique. Flor a montré qu'il existait chez les patients amputés une modification somatotopique dans le cortex sensitif primaire: la représentation du membre amputé est recouverte par les zones adjacentes [172]. Ramachandran est également parvenu à la même conclusion à partir de l'étude des sensations référées ressenties par les patients amputés [173]. L'intensité de cette modification est corrélée à l'intensité de la douleur. Elle a pu montrer plus tard que la rééducation à la sensibilité discriminative

permettait conjointement d'améliorer la douleur et de normaliser le schéma corporel somatotopique [174]. Il a été prouvé par la suite que tous les états douloureux étaient marqués par une altération de la sensibilité. Moseley a développé une méthode de rééducation sensitive dans le CRPS [175] (Complex Regional Pain Syndrom) qui peut être appliquée à la douleur neuropathique plexique. Elle consiste successivement à:

- déterminer par la méthode de Moberg la distance discriminée entre deux points dans la région douloureuse.
- prendre une photographie de la zone douloureuse du patient, et y marquer 5 points ou plus (espacés selon le seuil de discrimination du patient dans cette zone).
- montrer au patient les 2 types de stimulateurs mécaniques, appliquant une pression calibré (l'un large 11mm, l'autre fin 3mm)
- appliquer au hasard 24 stimulus sur la région douloureuse. Le patient (qui ne voit pas la stimulation) doit deviner le point stimuler et la nature du stimulateur.

Ce protocole appliqué quotidiennement pendant 3 fois 6 minutes pendant plusieurs semaines améliore le seuil de discrimination au test de Weber, améliore la douleur chez les patients présentant une algodystrophie. Il ne s'agirait pas d'un effet de prise en charge car le même protocole de stimulation sans effort de perception par le patient n'a aucun effet. Il est possible que le mécanisme soit en réalité un «phénomène d'exposition»: l'application de stimuli indolores sur la zone douloureuse (et donc redoutée par le patient) est en effet un point clé de la prise en charge des troubles anxieux des patients douloureux chroniques. Le plus probable est que l'efficacité de cette technique soit liée à un remodelage des cartes somatotopiques. Un protocole voisin a été développé par Flor [174] avec une diminution de près de 60% des douleurs d'amputation du membre supérieur, incitant à son utilisation dans les douleurs plexiques (la stimulation était appliquée sur le moignon d'amputation).

Il est intéressant de noter que l'effet de cet entraînement est renforcé par la vision du segment de membre douloureux (ou plutôt de son image dans un miroir) [176]. L'amélioration des performances sensibles par la vision de la peau était en effet déjà connue chez les sujets sains [177]. La propriété intéressante de cet effet est sa durée dans le temps [178], suggérant un effet allant au-delà d'une simple modification synaptique immédiate, plutôt de l'ordre des modifications structurelles.

L'utilisation de feedback visuel par le biais d'une boîte -miroir, telle que décrite par Ramachandran [179], est susceptible d'apporter un soulagement supplémentaire de la douleur. Cette modalité de traitement a été proposée initialement pour les douleurs fantômes post-amputations, mais son efficacité a été décrite dans de nombreuses autres pathologies douloureuses, comme la douleur plexique, la douleur centrale, le CRPS. Il s'agit d'une boîte équipée de miroirs, où le sujet place le membre douloureux. Le patient se place alors de façon à observer l'image de son bras valide parfaitement en place de son bras paralysé. Il est alors incité à effectuer des mouvements simultanés des deux mains (ouvrir/fermer les mains, faire des mouvements de chef d'orchestre,...). Un des mécanismes avancés pour expliquer l'effet de cette intervention serait la résolution du conflit entre l'image visuelle et la commande motrice (pour les rares patients ayant une sensation de mouvement fantôme). Un autre mécanisme impliquerait les neurones miroir découverts par

Rizzolatti dans les années 1990 [180]. Ces cellules cérébrales frontales et pariétales auraient une fonction motrice de déclenchement de mouvements simples, mais surtout comme caractéristique principale d'être activées par la vision de l'action en train de se réaliser. L'explication est valable pour expliquer l'amélioration d'une atteinte cérébrale, mais on voit mal son application dans les douleurs plexiques.

Enfin, le retour au travail concerne 55% des patients opérés à Nantes. On retrouve une proportion identique dans la population britannique [181].

D- douleurs plexiques

La discussion informelle avec les patients plexiques, en dehors du contexte de la consultation, fait ressortir une chose surprenante: la perte de mobilité est accessoire, même pour des patients ayant faiblement récupéré. En effet, les patients ont adapté leur mode de vie et, période de deuil de la fonction passée, cet aspect moteur n'est pas au centre des revendications. En revanche, la douleur (neuropathique ou scapulaire) est le déterminant principal de leur qualité de vie. Cet aspect attire une attention croissante des spécialistes du plexus brachial, mais pas encore au point d'influer sur les stratégies de réanimation du membre.

Les douleurs neuropathiques sont les plus fréquentes, souvent décrites cliniquement selon deux modalités. La distinction entre ces deux composantes est importante et devrait être évaluée séparément car elles relèveraient de mécanismes différents et ne répondraient pas aux mêmes techniques de neurochirurgie de la douleur. La première est une douleur paroxystique, décrite comme une décharge électrique, traversante durant quelques secondes. Cette composante serait le reflet de l'hyperactivité de la corne postérieure et répondrait mieux à la DREZtomie[182]. La seconde composante est continue, décrite comme une brûlure, lancinante éventuellement pulsatile. Elle correspondrait à des anomalies retrouvées jusque dans le thalamus et serait logiquement mieux traitée par stimulation du cortex moteur primaire[183]. Ce type de douleur est amélioré par la distraction, la chaleur (météo ou application d'eau chaude). Elle est exacerbée par le froid, le stress et les maladies intercurrentes. La consommation d'alcool peut aggraver ou soulager les douleurs [181].

Les antalgiques permettent de traiter complètement ce type de douleur dans 15% des cas, partiellement dans 50% des cas. La consommation de cannabis soulage cette douleur dans 23% des cas, l'utilisation de TENS dans 27% des cas. Enfin, lorsque la motricité est restaurée par l'intervention, le premier signe annonciateur est la disparition de la douleur, quelques semaines avant que la motricité soit visible [181].

A coté des douleurs neuropathiques, il existe également des douleurs mécaniques fréquentes, souvent négligées à coté des premières. On peut supposer que la coexistence d'une telle douleur par excès de nociception provoque une modification du seuil de sensibilité douloureuse, selon l'effet bien connu du « wind up » sur le neurone convergent de la corne postérieure. Leur dépistage systématique apparaît donc logique. On peut distinguer plusieurs mécanismes douloureux.

-Les douleurs mécaniques les plus fréquentes sont généralement localisées à l'épaule, pouvant témoigner d'un étirement de la capsule articulaire dans le cadre d'une sub-luxation scapulo-humérale. Ces douleurs ont pour caractéristique d'être soulagées par le soutien de l'humérus conduisant certains patients à garder une écharpe.

-Il peut également exister des douleurs scapulaires postérieures de fin de journée liées à la sur-utilisation des muscles moteurs de l'articulation scapulo-thoracique, en compensation d'une abduction gléno-humérale insuffisante. Le patient expérimente ainsi les inconvénients d'une syssarcose : elle n'est pas susceptible d'arthrose ni d'entorse, de luxation (pas de surface

cartilagineuse, de ligament ou de capsule), mais au prix d'un risque de surmenage musculaire. Il semble important de dépister ce type de douleur qui peut être amélioré par un programme rééducatif de renforcement des muscles péri-scapulaires. Il paraît logique de cibler plus particulièrement les muscles rotateurs latéraux de la scapula donc « abducteurs » (trapèze supérieur et serratus antérieur) et élévateurs impliqués dans le port de charge lourdes (élévateur de la scapula, petit rhomboïde, trapèze supérieur). Cette phase de surentraînement des muscles moteurs de la scapula constitue d'ailleurs une étape cruciale post-opératoire des arthroèses d'épaule. Chammas indique que ce type de douleur (fréquentes après arthroèse) répond très bien au renforcement musculaire.

-La présence d'une attitude scoliotique du rachis cervical est à dépister, surtout chez les patients ayant eu une voie d'abord de DREZtomie. On ne peut à ce propos que supposer le bénéfice de la laminoplastie par rapport à la laminectomie chez ces patients douloureux à la musculature cervicale sollicitée. En revanche son usage ne doit pas faire oublier que l'objectif principal reste l'exposition la plus latérale possible de la moelle spinale, pour éviter la mobilisation de celle-ci.

Enfin, il n'est pas impossible qu'une partie de ces douleurs soit liée au prélèvement du nerf accessoire lui-même. On dénombre en effet 65% de patients douloureux après lésion de ce nerf pourtant « moteur » [184]. Les études en microscopie de ce nerf ont ainsi montré qu'il ne contenait pas uniquement des fibres motrices comme décrit en anatomie classique, mais également 41-53% de fibres C et 2-9% de fibres A δ [185]. Ceci expliquerait également pourquoi les muscles trapèze et sterno-cléido-mastoïdien sont si représentatifs de la douleur à la pression dans la fibromyalgie.

Pour évaluer et quantifier ces douleurs, une nouvelle échelle a récemment été proposée pour l'évaluation et le suivi des douleurs liées aux lésions plexiques [186]. Celle-ci est la somme de l'EVA, de la fréquence des douleurs, de l'importance du traitement antalgique, du territoire douloureux et du retentissement sur le sommeil. Cette échelle n'était pas publiée au moment du recueil des données de ce travail, raison pour laquelle elle n'a pas été utilisée. Elle est reproduite dans la figure 48.

Parameter	Description	PTS	Sum
Intensity (VAS)		0 to 10	✓
Incapacity		0 to 10	✓
Frequency of pain	Never	0	✓
	Rarely	1	
	Once a day	2	
	More than once a day	3	
	Continuous	4	
Use of pain medication	Never	0	✓
	Occasionally	1	
	Once a day	2	
	More than once a day	3	
	All the time	4	
Zones affected by pain	No alleviation	1	✓
	Distal	1	✓
	Medial	1	✓
Sleep	Proximal	1	✓
	Normal	0	✓
	Awakens only in some nights	1	
	Awakens once every night	2	
	Awakens more than once every night	3	
Insomnia	Insomnia	4	
	Use of hypnotics	1	✓
Total			✓

Figure 48: échelle intégrée de la douleur plexique (d'après [186]).

Les douleurs les plus significatives de ces patients sont donc les douleurs neuropathiques. Leur mécanisme est désormais mieux connu, dont la synthèse est faite dans une revue récente du *Lancet neurology* [187]. Les douleurs neuropathiques sont liées à une lésion du système nerveux périphérique ou central. Il existe plusieurs mécanismes conduisant à la douleur, et ceux-ci peuvent être partiellement distingués cliniquement. Cette orientation par l'examen clinique du mécanisme créant la douleur permet de mieux orienter les traitements individuellement, et plus tard de mieux caractériser les cohortes de patients des futurs essais cliniques. Le réseau allemand sur la douleur neuropathique a récemment proposé dans ce sens un protocole d'évaluation sensitive [188] (basé sur 13 modalités cliniques d'évaluation sensitive avec notamment les filaments de Von Frey, les tests quantitatifs thermiques, ...). Ce protocole mis au point chez 1200 patients permettrait d'orienter vers le mécanisme physiopathologique en jeu chez un patient donné. Aujourd'hui, toutes les publications concernant les douleurs neuropathiques utilisent ces méthodes de quantification sensitive. On ne peut que se réjouir d'un retour de l'analyse sémiologique fine dans l'évaluation de la douleur, en plus de l'évaluation psychosociale actuellement prédominante.

Le premier mécanisme en jeu s'applique probablement aux avulsions radiculaires. Il s'agit d'une sensibilisation centrale, liée au développement d'une hyperactivité ectopique dans les fibres afférentes primaires, expliquant l'allodynie secondaire et l'hyperalgésie survenant dans un territoire adjacent au territoire lésé. Les expériences de rhizotomie et d'avulsion dorsale sur les chats montrent l'apparition de cette hyperactivité de la corne postérieure dans les 14 jours suivant la lésion [189]. Cette activité est plus fréquente en cas d'avulsion que de rhizotomie [190]. Le siècle

des décharges ectopiques peut-être dans la corne postérieure de la moelle épinière, au niveau du site d'un névrome [191] ou du ganglion rachidien sensitif [192, 193].

Le développement de l'hyperactivité peut-être du à une lésion primitive du système nerveux (il existe effectivement des descriptions opératoires d'avulsion médullaire avec les radicelles), mais peut également être modifié par «intoxication» des neurones de second ordre. dans ce mécanisme d'intoxication, les neurones de second ordre modifient leurs récepteurs post-synaptiques: phosphorylation des récepteurs NMDA et AMPA au glutamate, expression de canaux sodium voltage-dépendants. L'abaissement des seuils d'excitabilité qui en résulte provoque l'activation des neurones de second ordre par les fibres C et A δ par des stimuli normalement indolores. Il existe également un manque d'inhibition au sein du système nerveux (par exemple, on retrouve une perte d'interneurones GABAergiques dans la moelle épinière après lésion d'un nerf périphérique) [194].

Le second mécanisme se développe dans le système nerveux périphérique. Il se manifeste également par une hyperactivité ectopique des neurones afférents primaires des fibres C et A δ . Celle ci est liée à une surexpression des canaux sodiques (taux élevés d'ARNm et forte expression cellulaire du récepteur) à la fois dans les fibres lésées et également dans les fibres saines voisines. Il existe également une modulation de l'expression de protéines comme le TRP (Transient Receptor Potential) type V1 (pour l'hyperalgésie au chaud) ou type M8 (pour l'hyperalgésie au froid). La douleur neuropathique est maintenue par l'inflammation médiée par les macrophages dans les fibres nerveuses elles-mêmes, et par l'intervention de la microglie provoquant la libération de modulateurs immunologiques.

A contre-pied de cette théorie dominante, un dernier mécanisme périphérique est proposé dans une publication récente de Bertelli [195], dont l'intérêt est d'être traitable par les armes du chirurgien. Il postule en effet que la douleur neuropathique des patients plexiques serait due aux racines non-avulsées (par opposition aux douleurs de déafférentation qui sont plus liées aux étages avulsés). La fibrose radiculaire sur ces moignons radiculaires seraient à l'origine des douleurs plexiques. Il insiste en effet sur la fréquence (80% des cas) de la disponibilité de C5 ou C6 pour une greffe intraplexuelle (mais aussi pour la genèse d'un tel mécanisme douloureux). Sindou ne retrouverait d'ailleurs que 16% d'avulsion radiculaire à tous les étages lors de DREZ de paralysies complètes. Il faut noter que l'utilisation de C5 est de la stratégie habituelle de réanimation du plexus de Bertelli. Pour étayer ses suppositions, il a neurolysé et greffé ces racines, avec un effet antalgique immédiat (56% des patients). On doit remarquer que sa technique de dissection du plexus brachial est agressive, recherchant les racines à la sortie du défilé interscalénique, n'hésitant pas à désinsérer le muscle scalène antérieur pour rechercher la racine dans l'espace inter-transversaire. Le plus impressionnant est le résultat antalgique complet chez les 10 patients douloureux chroniques infiltrés sous scanner au niveau du moignon radiculaire. On peut émettre des doutes sur la qualité de la preuve apportée par cette série de patients, mais l'efficacité apparente des résultats mérite d'envisager l'hypothèse. De plus Bonila semble avoir la même expérience de l'effet immédiat antalgique de la neurolyse radiculaire [186].

Il faut également aborder un sujet encore non tranché: la douleur plexique serait en partie liée à une modification somatotopique du cortex sensitif primaire par diminution des afférences. La réorganisation somatotopique de S1 provoquerait une distorsion des cartes corporelles utilisées pour

contrôler le mouvement. Cette distorsion provoquerait un conflit entre les commandes motrices et le feedback sensitif, à l'origine de la douleur [196]. Cette conception est actuellement à l'origine de la rééducation sensitive discriminative, qui semble montrer une certaine efficacité clinique, mais la validité de ce concept n'est absolument pas établie.

Nous avons constaté que 27% seulement des patients présentaient des douleurs neuropathiques au moment de l'interview. On est également frappé par la faible incidence de douleurs préopératoires (8% parmi les patients traités à Nantes). Les rares publications concernant la douleur des patients plexiques font état d'une prévalence bien plus élevée. Le tableau 30 récapitule les séries principales publiées à ce sujet. Pour expliquer cette différence importante avec les chiffres existant, on peut préciser que notre recueil de données concernant les douleurs neuropathiques pré-opératoires était basé sur l'analyse des dossiers (courriers de consultation, EVA dans les transmissions infirmières et interrogatoire à posteriori des patients). il ne s'agit pas d'une recherche systématique prospective, avec les biais qui lui sont liés. Ce chiffre discordant avec la littérature (85% selon Bruxelles[197], 81% selon Narakas) est possiblement du à une meilleure prise en charge de la douleur lié à l'hospitalisation en service de neurochirurgie (particulièrement attentif par nature au dépistage et au traitement précoce des douleurs neuropathiques). Ce résultat peut également être expliqué par la meilleure sensibilisation à la douleur de tous les professionnels de santé, depuis les années 1980. Enfin la pharmacologie et l'approche multidisciplinaire de la douleur sont bien plus performantes dans les années 2010.

auteur	année	n	dououreux	remarque
Taylor	1962	50	26,0%	
Bertelli	2008	36	38,8%	
Bonney	1959	25	48,0%	non opérés
Yeoman & Seddon	1961	40	55,0%	non opérés avec récupération partielle
Yeoman & Seddon	1961	46	69,5%	non opérés sans récupération
Bonila	2011	51	74,5%	
Narakas	1981	85	81,0%	
Bruxelle	1988	76	85,0%	préopératoire
Bruxelle	1988	76	85,0%	long terme postopératoire
Waikakul	2000	246	89,0%	
Wynn Parry	1983	108	90,7%	non opérés
Vannier	2008	60	95,0%	

Tableau 30: tableau récapitulatif des principales séries relatives aux douleurs après lésion traumatique du plexus brachial.

Nous retrouvons chez les patients opérés à Nantes une relation entre l'incidence des douleurs et le type lésionnel ($p=0,045$), ce qui est un phénomène connu (Figures 12 et 13, Tableau 6) [197, 198]. Les douleurs sont d'autant plus importantes que le nombre de racines impliquées dans le déficit augmente. Nous observons également que l'importance du déficit influence aussi l'intensité

des douleurs, quand elle sont présentes. On note avec surprise qu'il existe une différence importante sur le plan des douleurs entre les déficits C5C6 (EVA: 2/10) et les déficits C5C6C7 (6,5/10), alors que sur le plan moteur ces deux groupes partagent les possibilités de neurotisation et des résultats voisins. Ceci s'explique probablement par le nombre et la répartition des fibres de C7 (elle est la racine la plus riche en fibres nerveuses avec 18000 à 40000 neurones mais est distribuée dans quasiment tous les territoires tronculaires). Le même raisonnement que sur le plan moteur peut être tenu pour la douleur: la neurolyse de C7 doit être entreprise quand la racine n'est pas avulsée, car l'appoint de fibres motrices et sensibles dispersées dans tout le plexus permet d'espérer une récupération minimale des muscles agonistes, et un certain degré de réhabilitation sensitive diffuse. On observe que l'incidence d'une douleur neuropathique est (logiquement) liée au retour au travail et au taux d'invalidité. Le port d'une écharpe est non significativement corrélé avec la présence d'une douleur. Ceci est le reflet d'un moins bon résultat moteur, mais peut en soi expliquer des douleurs en exerçant une traction sur les tissus (certains patients ayant à la fois une subluxation scapulo-humérale et une douleur neuropathique décrivent la diminution des paroxysmes quand ils portent leur écharpe).

Nous n'avons pas étudié le délai d'apparition des douleurs après le traumatisme initial. Bruxelles a étudié ce point prospectivement sur 76 patients, Kato et Birch sur 85 patients. Les Figures 49 et 50 sont la mise en image des chiffres de l'étude de Bruxelles. On voit que la majorité des patients (85%) est douloureuse, que l'incidence des douleurs n'est pas fonction du type clinique de déficit, mais plutôt du nombre d'avulsions radiculaires [181, 197]. Enfin, les douleurs apparaissent généralement dans les 2 premiers mois post-lésionnels. Kato et Birch retrouvent également que passé un délai de 6 semaines, la probabilité qu'une douleur s'installe est plus faible (9% des patients déclarent des douleurs au delà de ce délai)[181]. Au delà de 3 mois, la probabilité qu'une douleur chronique intense s'installe est plus faible (le maximum d'intensité douloureuse est atteint pour 80% des patients). Il faut nuancer ces résultats en précisant qu'Alnot ne retrouve pas d'influence de l'âge, du délai opératoire, de la réussite de la chirurgie nerveuse ou du nombre de racines avulsées [199].

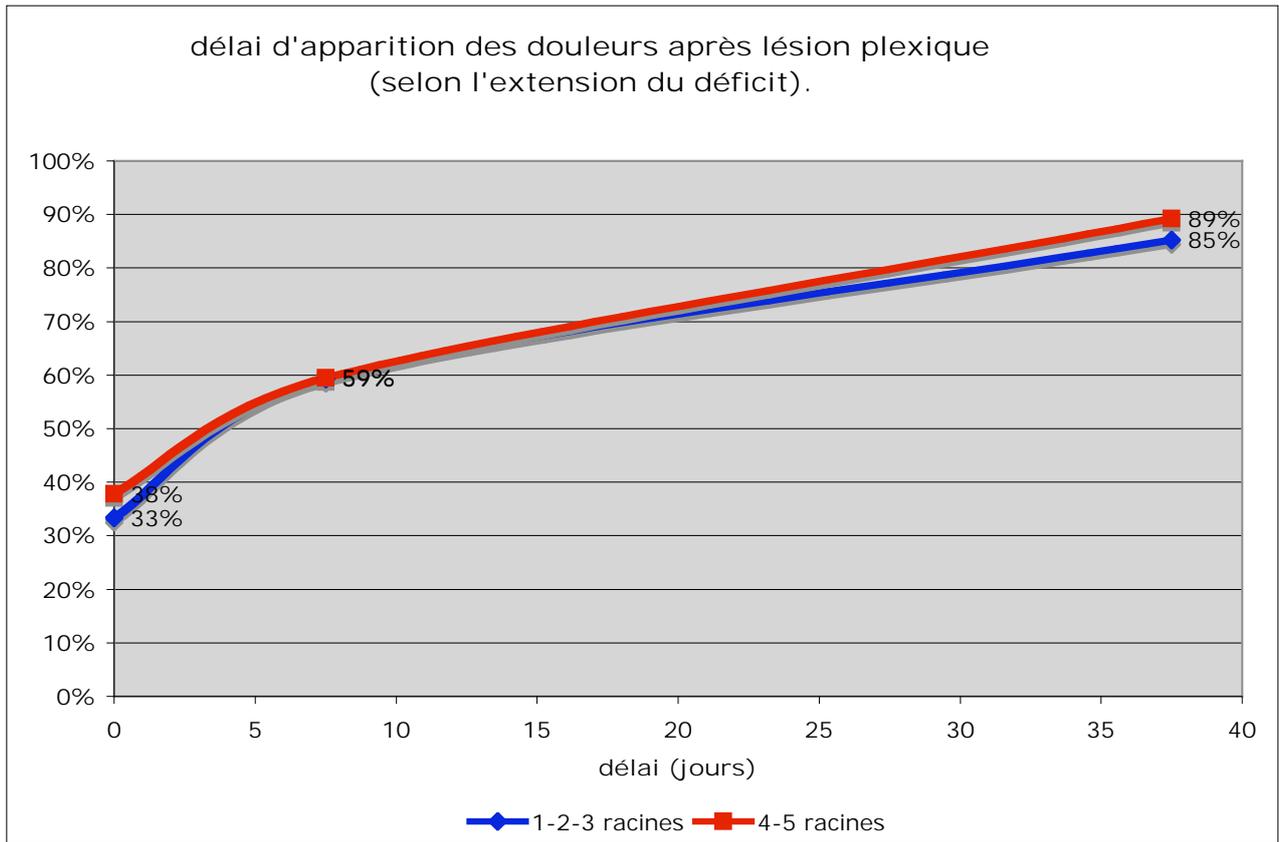


Figure 49 : incidence et délag d'apparition des douleurs neuropathiques après traumatisme du plexus brachial, en fonction de l'extension du déficit. (selon[197]).

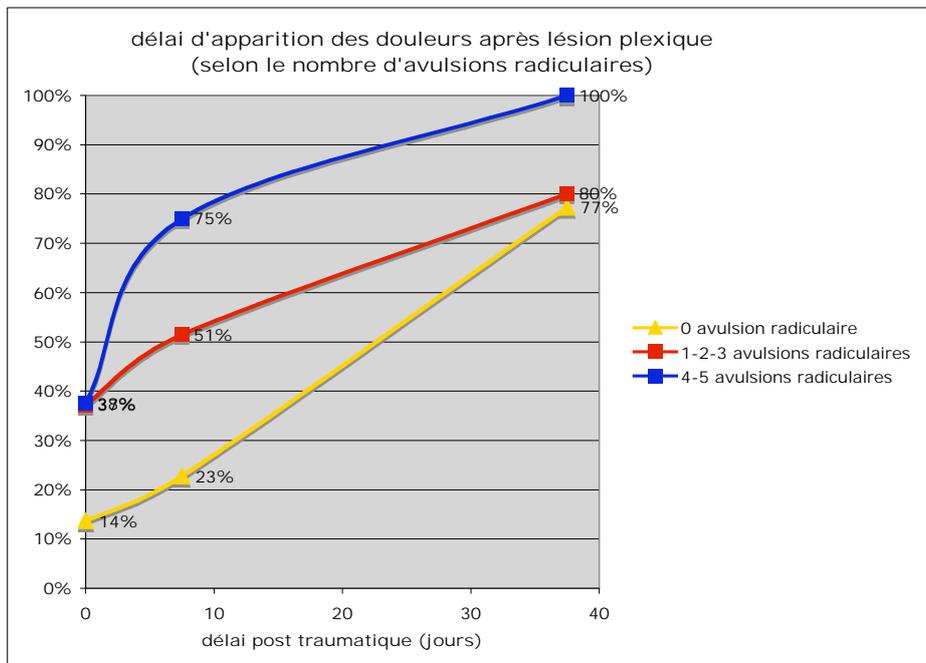


Figure 50 : incidence et délag d'apparition des douleurs neuropathiques après traumatisme du plexus brachial, en fonction du nombre de racines avulsées. (selon[197]).

Kato et Birch ont étudié l'influence du délai opératoire sur la survenue des douleurs sur 148 patients [181]. Ils ont classé les patients opérés en 4 groupes comparables opérés à des délais variables (moins de 1 mois, 1 à 3 mois, 3 à 6 mois, plus de 6 mois). Ils confirment la corrélation entre l'intensité de la douleur et la qualité de la récupération fonctionnelle ($p < 0,01$ à $P < 0,05$) que nous avons noté dans notre série de patients. Ceci avait déjà été montré par Berman (de la même équipe) auparavant [198]. Ils constatent également que le délai opératoire influence l'intensité de la douleur à terme ($p < 0,01$ à $p < 0,05$ selon les comparaisons inter-groupes) (Figure 51).

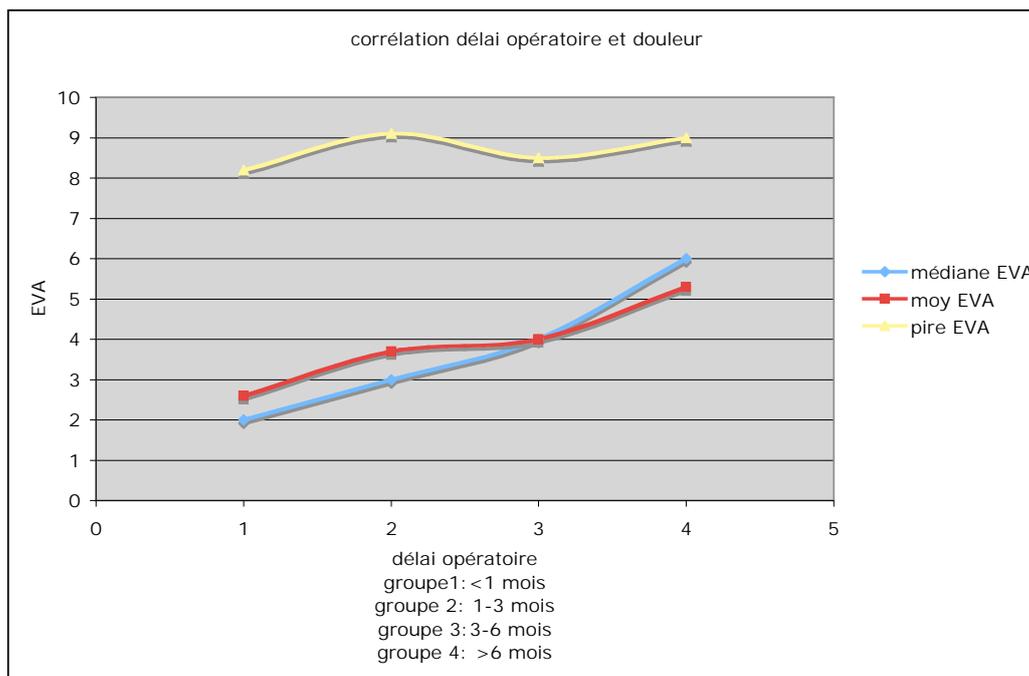


Figure 51: influence du délai opératoire sur l'intensité des douleurs à terme (selon kato et Birch [181]).

Dans la série de patients nantais, la proportion de patient douloureux est plus élevée en post-opératoire qu'avant l'intervention (27% contre 8%). Ceci est discordant avec la plupart des publications, montrant de façon homogènes l'effet favorable de l'intervention sur les douleurs. Nous n'avons pas d'échantillon suffisant de patients non-opérés pour évaluer l'effet propre de la chirurgie sur les douleurs. Malgré les résultats de notre expérience, l'efficacité de la chirurgie nerveuse (neurotisations, neurolyse, greffe) est désormais admise. Ce point a particulièrement été accentué initialement par l'équipe du Royal national orthopedic hospital (service de premier plan depuis sa fondation par Seddon) [38, 198]. Berman a montré une amélioration significative de la douleur chez 84% des patients opérés (neurotisation intercostale orientée vers le territoire douloureux) avec pour seul objectif le traitement antalgique [198]. Cette équipe intervient ainsi couramment sur le plexus brachial au seul titre du traitement de la douleur. L'effet antalgique de la chirurgie du nerf est désormais acceptée par la plupart [200].

Berman a également démontré plus tard l'effet antalgique de l'intervention longtemps après le traumatisme initial [201]. L'effet antalgique surviendrait dans les 3 mois post-opératoires, puis resterait stable dans le temps [186]. Enfin, beaucoup d'auteurs ont noté que la disparition de la

douleur survenait avant la récupération motrice [198]. Notre expérience avec ce concept est limitée. Nous avons eu le cas d'un tel patient douloureux, vierge de toute intervention sur le plexus brachial et en échec de stimulation médullaire, DREZ et stimulation corticale. Malgré la relative innocuité de l'intervention de neurotisation au regard de l'intensité des douleurs et malgré ces exemples de la littérature, aucune intervention nerveuse périphérique ne lui a été proposée.

Les résultats obtenus par de nombreux auteurs dans la réhabilitation sensitive de la main montrent que le retour d'une sensibilité distale est certes long, mais fréquent (tableau 27). Le délai semble moins important que pour la fonction motrice, car les récepteurs sensitifs seraient plus longs à disparaître, en particulier les corpuscules de Pacini. Il paraît envisageable et peu invasif d'introduire le concept de neurotisation sensitive du membre supérieur, à titre trophique et antalgique. En plus des gestes habituels, tous les troncs sensitifs distaux correspondant à une racine avulsée avec certitude pourrait être neurotisés par des nerfs sensitifs (branches du plexus cervical superficiel, nerfs intercostaux). Ce concept mériterait d'être étudié chez l'animal puis envisagé dans un essai clinique.

Nous ne retrouvons pas d'association entre la présence d'une douleur neuropathique et l'âge. Cette relation a pourtant été mise en évidence chez les enfants après une lésion nerveuse périphérique [202]. Il n'y aurait en particulier pas de douleur neuropathique ou d'allodynie lorsque la lésion survient avant l'âge de 5 ans. Après l'âge de 5 ans, l'incidence de ces phénomènes serait également plus faible que chez les adultes.

Nous retrouvons que 94,4% des patients douloureux rapportent leur douleur comme située dans la portion distale du membre (incluant l'avant-bras pour les patients C5C6 et C5C6C7, la main et les doigts pour les paralysies complètes). Ceci correspond au territoire dé-afférenté. On constate souvent une réapparition de la sensibilité au moignon de l'épaule, ainsi les douleurs de l'épaule n'ont jamais été de type neuropathique dans notre expérience.

Les traitements médicaux étant souvent dépassés par l'intensité des douleurs, les techniques de neurochirurgie de la douleur sont souvent envisagées.

-La technique chirurgicale de référence est la DREZtomie ou lésion de la zone d'entrée de la racine dorsale dans la moelle épinière. Sindou a montré que les fibres véhiculant la douleur s'y trouvaient regroupées, et que la lésion de cette région située en avant de la racine dorsale pouvait cliniquement soulager la douleur neuropathique dans le myélomère ainsi traité. Compte-tenu du recouvrement des dermatomes, plusieurs étages doivent être traités simultanément pour obtenir l'effet clinique escompté. L'intervention est discutable en cas de déficit partiel, car il supprime complètement et définitivement la sensibilité du dermatome correspondant. Il existe un risque de syndrome de Brown-Sequard (12% selon Rath et Richter), dont nous avons eu l'expérience sur un patient.

La popularité de cette intervention tient à son efficacité: à court et long terme, Silhouette et Thiebaut décrivent 73% de résultats bons et excellents [203]. Rath et Richter obtiennent également les mêmes effets (77%). Chen note que les bons et excellents résultats ont tendance à diminuer avec le temps:

- 80% à la phase précoce
- 75% à 3 ans.
- 60% à 5 ans.
- 50% à 10 ans.

Ali a récemment montré que la DREZ était efficace pour le traitement de la composante paroxystique de la douleur neuropathique (70% de patients soulagés). La composante continue est assez peu soulagée par la destruction de la DREZ (20%). Au contraire, la stimulation du cortex moteur primaire serait complémentaire, car son effet serait exactement inverse: 42% des douleurs continues seraient ainsi soulagées, sans aucune efficacité sur les douleurs paroxystiques [183].

La stimulation médullaire est rarement envisagée, car la condition principale de son efficacité est l'intégrité des cordons postérieurs (vérifiés par PES). Cette condition n'est pas toujours garantie, compte tenu de l'avulsion radiculaire fréquente et des répercussions sur le cordon spinal. Sindou a réalisé des PES chez 8 patients plexiques dans le cadre d'une éventuelle indication de stimulation médullaire. Ceux-ci étaient altérés dans 100% des cas, et l'effet de la stimulation médullaire était alors nul dans tous les cas. Dans une autre étude, il relève 32% d'arachnoïdite sévère lors de l'intervention de DREZtomie. Les constatations opératoires montrent des pseudo-ménigocèles compressifs sur la moelle spinale dans 7% des cas. Il existe une rotation ou une déviation du cordon médullaire dans 32% des cas, liée à des adhérences dures. Dans 11% des cas on retrouve une atrophie localisée de la moelle épinière, une hernie de parenchyme spinal à travers la pie-mère dans 5% des cas [182]. Toutes ces anomalies cumulées expliqueraient la réputation de manque d'efficacité de la stimulation médullaire. On peut remarquer également que le placement de l'électrode sur une zone remaniée par le traumatisme, avec la fibrose associée incite à éviter cette option thérapeutique. le dernier argument contre la stimulation médullaire est la fréquence de la déviation du cordon, compliquant le placement de l'électrode dans le plan frontal.

Les résultats des séries retrouvées par notre recherche bibliographique sont présentés dans le tableau 31. Ce ne sont pour le moment que des séries de cas, mais cette possibilité de traitement mérite d'être envisagée dans les impasses thérapeutiques particulièrement réfractaires. En particulier la stimulation médullaire cervicale haute a été réalisée avec succès après échec de DREZtomie [204].

		nombre de patients	position électrode	succès immédiat	succès long terme	suivi	amélioration
Zorub	1974	7	*	43% (3 pt)	14% (1pt)	>12 mois	
Garcia	1987	6	*	66% (4 pt)	50% (3 pt)	28 mois	1 complet, 2 partiels
Bennett	1994	5	C6C7	100% (5 pt)	100% (5 pt)	13,5 mois	-4 sur EVA
Piva	2003	4	C2T1	100% (4 pt)	100% (4 pt)	9 mois	-3 sur EVA
Brill	2008	2	*	100% (2 pt)	100% (2 pt)	12 mois	-7 sur EVA
Sindou	2003	8	*	0%	0%	18,8 mois	PES altérés (100%)
Lai	2009	1*	C3C5	*	100% 1pt	12 mois	pas de douleur

* SCS après 2 DREZ

Tableau 31: résultats de stimulation médullaire pour le traitement des douleurs plexiques.

La stimulation corticale (stimulation du cortex moteur primaire) s'est imposée comme une méthode antalgique de référence, en seconde intention, dans les cas de douleur neuropathique. Cette technique chirurgicale peu invasive (extradurale) est désormais proposée comme une nouvelle référence dans le traitement des douleurs d'avulsion du plexus brachial, compte tenu de son caractère réversible. Les taux de succès sont voisins de 80% dans les meilleures indications, mais les données à long terme sont encore mal établies. L'efficacité de la stimulation corticale pour les douleurs post-traumatiques du plexus brachial est cependant en deçà de ce que l'on pourrait espérer. Le Pr Nguyen rapporte ainsi 36% de résultats satisfaisants dans cette indication particulière [205].

Ali a récemment suggéré que ces techniques seraient en fait complémentaire de la DREZtomie, car leur action ne porterait pas sur la même composante clinique de la douleur[183].

Nous ne voyons pas de raison conceptuelle à ces résultats, car l'efficacité sur les douleurs neuropathiques périphériques est de 65%. On peut certes objecter que le traumatisme plexique est conceptuellement différent, mélangeant des lésions périphériques (lésions post-ganglionnaires) et centrales (médullaires et radiculaires pré-ganglionnaires). La raison principale serait selon nous liée à une contrainte technique opératoire provoquée par le manque de repères fiables peropératoires pour le positionnement de l'électrode sur le cortex. En effet la position de l'électrode est guidée par les potentiels évoqués moteurs dans les muscles de la région douloureuse. La paralysie du patient ne permet pas l'enregistrement des muscles du bras, obligeant à se repérer sur les muscles de régions adjacentes (épaule, face). Nous avons donc récemment étudié en ce sens les meilleurs points de repère à utiliser pour la cartographie du cortex moteur primaire.

Il existe également une modification de la somatotopie du cortex moteur primaire (réduction de la représentation du membre supérieur, recouvert par les représentations du visage et du tronc). Ceci complexifie encore le repérage peropératoire d'une zone brachiale non seulement «aveugle» mais également rétrécie. Le remodelling somatotopique, sa relation avec l'importance du déficit et des douleurs a également été récemment étudié dans notre service par IRMf et nTMS (Jean-Marie Louppe, MASTER II sciences chirurgicales 2011).

5-conclusion

Les résultats des neurotisations effectuées au chu de Nantes sont satisfaisants pour la fonction de l'épaule car la neurotisation spino-suprascapulaire permet un résultat utile d'abduction chez 72 % des patients. Ce résultat est conforme à celui des autres équipes.

En revanche, pour la neurotisation inter costo-musculocutanée, les résultats sont plus mitigés avec une flexion utile du coude chez un tiers des patients. Il semble possible d'améliorer ces résultats par une prise de décision opératoire plus rapide en intégrant notamment la valeur prédictive de la clinique, de l'imagerie et de l'électrophysiologie pré-opératoire développées dans ce travail.

Cette prise de décision si possible avant trois mois doit tenir compte de ces critères statistiques précis. Nous proposons aussi de confirmer l'absence de régénération infra clinique par l'utilisation de l'électrophysiologie per-opératoire.

Parallèlement l'utilisation des nouveaux nerfs donneurs disponibles, dont nous avons revu la morbidité et l'efficacité, permet d'envisager une réanimation plus ambitieuse motrice et sensitive tournée vers la main.

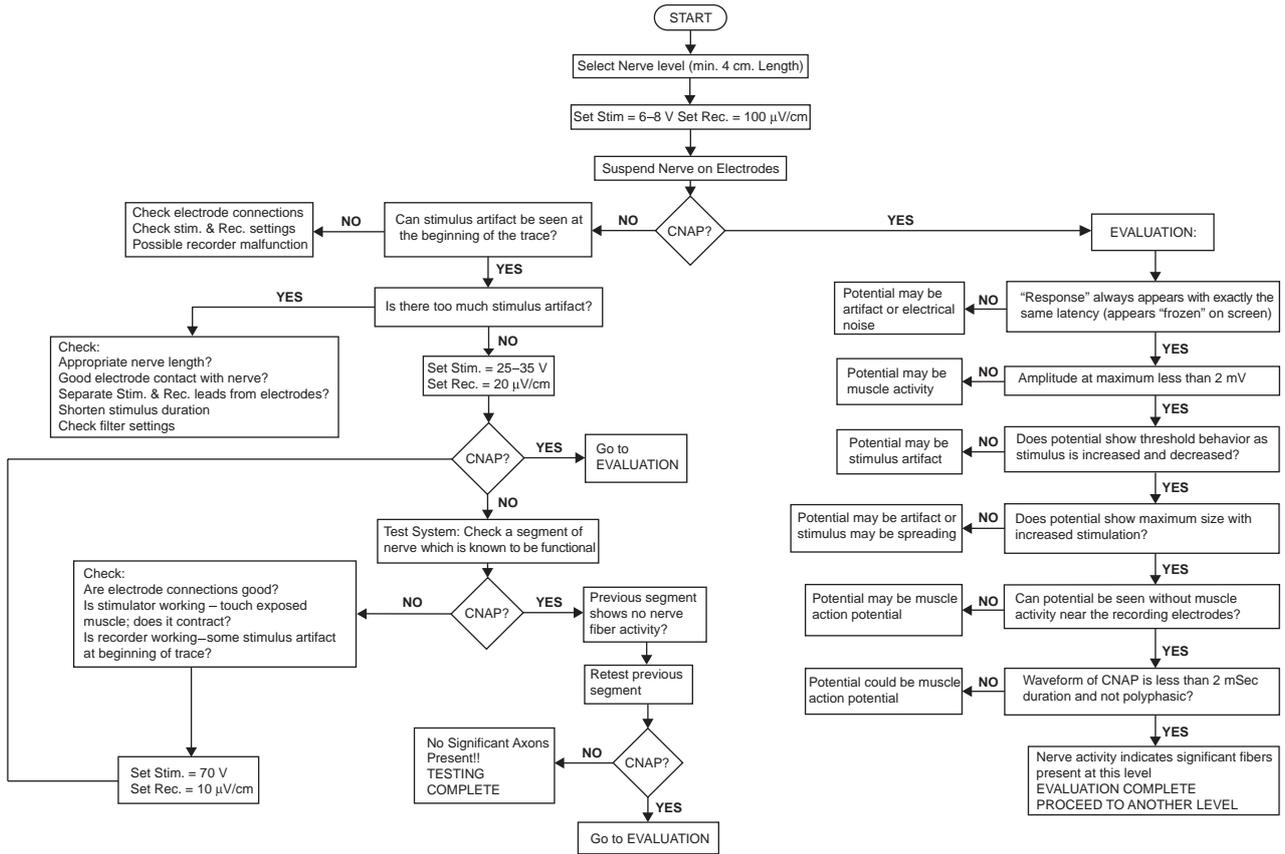
Nous avons montré que cette nouvelle stratégie de prise en charge est de nature à obtenir une réduction des douleurs au point qu'il semble possible d'utiliser la chirurgie du plexus brachial comme arme thérapeutique antalgique. Nous avons montré aussi qu'à distance du traumatisme le concept de neurotisation sensitive antalgique est également susceptible d'être efficace.

Enfin les techniques de transferts tendineux, musculaires libres et gestes d'arthrodèse dont nous avons exposé les principales modalités doivent être intimement associées au traitement du nerf périphérique.

Au delà des perspectives apportées par les améliorations techniques que nous proposons, l'horizon entrevu par les neurotisations combinées et "proches des effecteurs" est particulièrement prometteur.

Les défis à relever restent nombreux: la douleur, la réanimation de la main, la rééducation et la gestion des échecs notamment. Nous pensons que l'approche multidisciplinaire nantaise constitue une démarche de progrès de nature à relever ces défis.

Annexes



annexe 1: protocole de stimulation peropératoire et algorithme de résolution des problèmes (d'après Happel et Kline [52]).

Bibliographie

- [1] Friedman AH. An eclectic review of the history of peripheral nerve surgery. *Neurosurgery* 2009;65(4 Suppl):A3-8.
- [2] thornburn W. Obstetrical paralysis. *the Journal of Obstetrics and Gynaecology of the British Empire* 1903;3:454.
- [3] Seddon RJ. Surgical experiences with peripheral nerve injuries. *Q Bull Northwest Univ Med Sch* 1947;21(3):201-10.
- [4] Seddon HJ. A review of work on peripheral nerve injuries in Great Britain during World War II. *J Nerv Ment Dis* 1948;108(2):160-8.
- [5] Belzberg AJ, Dorsi MJ, Storm PB, Moriarity JL. Surgical repair of brachial plexus injury: a multinational survey of experienced peripheral nerve surgeons. *J Neurosurg* 2004;101(3):365-76.
- [6] Songcharoen P, Wongtrakul S, Spinner RJ. Brachial plexus injuries in the adult. nerve transfers: the Siriraj Hospital experience. *Hand Clin* 2005;21(1):83-9.
- [7] Sedel L. The results of surgical repair of brachial plexus injuries. *J Bone Joint Surg Br* 1982;64(1):54-66.
- [8] Terzis JK, Vekris MD, Soucacos PN. Outcomes of brachial plexus reconstruction in 204 patients with devastating paralysis. *Plast Reconstr Surg* 1999;104(5):1221-40.
- [9] Bonnard C, Allieu Y, Alnot JY, Brunelli G, Merle M, Santos-Palazzi A, Sedel L, Raimondi PL, Narakas A, Les paralysies supraclaviculaires totales. 1. possibilités chirurgicales et résultats. Alnot JY and Narakas A, eds. *Les paralysies du plexus brachial*, 2^o édition. paris: Expansion scientifique française, 1995.
- [10] Oberlin C. [Brachial plexus palsy in adults with radicular lesions, general concepts, diagnostic approach and results]. *Chir Main* 2003;22(6):273-84.
- [11] Oberlin C, Beal D, Leechavengvongs S, Salon A, Dauge MC, Sarcy JJ. Nerve transfer to biceps muscle using a part of ulnar nerve for C5-C6 avulsion of the brachial plexus: anatomical study and report of four cases. *J Hand Surg Am* 1994;19(2):232-7.
- [12] Kawai I, chaper I. Anatomy of the brachial plexus. Kawai I and Kawabata H, eds. *brachial plexus palsy*. singapore: Word Scientific Publishing Co, 2000.
- [13] Narakas A. Surgical treatment of traction injuries of the brachial plexus. *Clin Orthop Relat Res* 1978(133):71-90.
- [14] Herzberg G, Narakas A, Comtet JJ, Bouchet A, Carret JP. Microsurgical relations of the roots of the brachial plexus. Practical applications. *Ann Chir Main* 1985;4(2):120-33.
- [15] Bonnel F. Microscopic anatomy of the adult human brachial plexus: an anatomical and histological basis for microsurgery. *Microsurgery* 1984;5(3):107-18.
- [16] Totossy de Zepetnek JE, Zung HV, Erdebil S, Gordon T. Innervation ratio is an important determinant of force in normal and reinnervated rat tibialis anterior muscles. *J Neurophysiol* 1992;67(5):1385-403.
- [17] Uysal, II, Seker M, Karabulut AK, Buyukmumcu M, Ziylan T. Brachial plexus variations in human fetuses. *Neurosurgery* 2003;53(3):676-84; discussion 84.
- [18] J. J, Les variation du plexus brachial (résumé). *Mémoire Anatomique de l'Université Varsoviensis*. Vol 3, 1925.
- [19] Senecail B. *Le plexus brachial de l'Homme*. Reims: université de Reims, 1975.
- [20] AT. K. Brachial plexus of nerves in man. The variations in its formation and branches. *Am J Anat* 1918;23:285-95.
- [21] Jr SC, JK T, MT E, The quantitative microanatomy of the brachial plexus in man: Reconstructive relevance. Terzis J, ed. *Microreconstruction of Nerve Injuries*. Philadelphia: WB Saunders, 1987.
- [22] Bertelli J, Ghizoni M. Use of clinical signs and computed tomography myelography findings in detecting and excluding nerve root avulsion in complete brachial plexus palsy. *J Neurosurg* 2006;105(6):835-42.
- [23] Allieu Y, Triki F, de Godebout J. [Total paralysis of the brachial plexus. Value of the preservation of the limb and the restoration of active flexion of the elbow]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1987;73(8):665-73.
- [24] Coulet B, Chammas M, Daussin PA, Lazerges C, Lacombe F, César M, Domergue S, Bacou F, Micallef JP, dégénérescence et régénération des nerfs périphériques et des effecteurs musculaires et sensitifs. Alnot JY and Chamas M, eds. *lésions traumatiques des nerfs périphériques. De la réparation nerveuse directe aux interventions palliatives.*: Elsevier Masson, 2007.
- [25] Kline DG. Timing for brachial plexus injury: a personal experience. *Neurosurg Clin N Am* 2009;20(1):24-6, v.
- [26] Nagano A, Tsuyama N, Hara T, Sugioka H. Brachial plexus injuries. Prognosis of postganglionic lesions. *Arch Orthop Trauma Surg* 1984;102(3):172-8.

- [27] Narakas AO. The treatment of brachial plexus injuries. *Int Orthop* 1985;9(1):29-36.
- [28] Kanaya F, Gonzalez M, Park CM, Kutz JE, Kleinert HE, Tsai TM. Improvement in motor function after brachial plexus surgery. *J Hand Surg Am* 1990;15(1):30-6.
- [29] Allieu Y, Chammas M, Picot MC. [Paralysis of the brachial plexus caused by supraclavicular injuries in the adult. Long-term comparative results of nerve grafts and transfers]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1997;83(1):51-9.
- [30] Magalon G, Bordeaux J, Legre R, Aubert JP. Emergency versus delayed repair of severe brachial plexus injuries. *Clin Orthop Relat Res* 1988(237):32-5.
- [31] Jivan S, Kumar N, Wiberg M, Kay S. The influence of pre-surgical delay on functional outcome after reconstruction of brachial plexus injuries. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2009;62(4):472-9.
- [32] Sedel L. Repair of severe traction lesions of the brachial plexus. *Clin Orthop Relat Res* 1988(237):62-6.
- [33] Dubuisson AS, Kline DG. Brachial plexus injury: a survey of 100 consecutive cases from a single service. *Neurosurgery* 2002;51(3):673-82; discussion 82-3.
- [34] Gilbert A, Birch R. Brachial Plexus Injuries Peripheral Nerve Injuries. Benson M, Fixsen J, and Macnicol M, eds. *Children's Orthopaedics and Fractures*. London: Springer-Verlag, 2010.
- [35] Narakas AO, Hentz VR. Neurotization in brachial plexus injuries. Indication and results. *Clin Orthop Relat Res* 1988(237):43-56.
- [36] Escamilla RF, Yamashiro K, Paulos L, Andrews JR. Shoulder muscle activity and function in common shoulder rehabilitation exercises. *Sports Med* 2009;39(8):663-85.
- [37] Terzis JK, Kostopoulos VK. The surgical treatment of brachial plexus injuries in adults. *Plast Reconstr Surg* 2007;119(4):73e-92e.
- [38] Parry CB. Pain in avulsion lesions of the brachial plexus. *Pain* 1980;9(1):41-53.
- [39] Bonnard C, Narakas A. [Pain syndromes and post-traumatic lesions of the brachial plexus. Study of the effect of surgical repair on the pain syndrome in 211 operated patients with post-traumatic lesions caused by avulsion or rupture of the brachial plexus]. *Helv Chir Acta* 1985;52(3-4):621-32.
- [40] White JC, Hanelin J. Myelographic sign of brachial plexus avulsion. *J Bone Joint Surg Am* 1954;36-A(1):113-8.
- [41] Carvalho GA, Nikkiah G, Matthies C, Penkert G, Samii M. Diagnosis of root avulsions in traumatic brachial plexus injuries: value of computerized tomography myelography and magnetic resonance imaging. *J Neurosurg* 1997;86(1):69-76.
- [42] Hayashi N, Masumoto T, Abe O, Aoki S, Ohtomo K, Tajiri Y. Accuracy of abnormal paraspinal muscle findings on contrast-enhanced MR images as indirect signs of unilateral cervical root-avulsion injury. *Radiology* 2002;223(2):397-402.
- [43] Hayashi N, Yamamoto S, Okubo T, Yoshioka N, Shirouzu I, Abe O, Ohtomo K, Sasaki Y, Nagano A. Avulsion injury of cervical nerve roots: enhanced intradural nerve roots at MR imaging. *Radiology* 1998;206(3):817-22.
- [44] Walker AT, Chaloupka JC, de Lotbiniere AC, Wolfe SW, Goldman R, Kier EL. Detection of nerve rootlet avulsion on CT myelography in patients with birth palsy and brachial plexus injury after trauma. *AJR Am J Roentgenol* 1996;167(5):1283-7.
- [45] Ochi M, Ikuta Y, Watanabe M, Kimori K, Itoh K. The diagnostic value of MRI in traumatic brachial plexus injury. *The Journal of Hand Surgery: Journal of the British Society for Surgery of the Hand* 1994;19(1):55-9.
- [46] Pondaag W, van der Veken LP, van Someren PJ, van Dijk JG, Malessy MJ. Intraoperative nerve action and compound motor action potential recordings in patients with obstetric brachial plexus lesions. *J Neurosurg* 2008;109(5):946-54.
- [47] Riley DA, Ellis S, Bain JL. Ultrastructural cytochemical localization of carbonic anhydrase activity in rat peripheral sensory and motor nerves, dorsal root ganglia and dorsal column nuclei. *Neuroscience* 1984;13(1):189-206.
- [48] Kline DG. Nerve surgery as it is now and as it may be. *Neurosurgery* 2000;46(6):1285-93.
- [49] Tiel RL, Happel LT, Jr., Kline DG. Nerve action potential recording method and equipment. *Neurosurgery* 1996;39(1):103-8; discussion 8-9.
- [50] Kline DG, Happel LT. Penfield Lecture. A quarter century's experience with intraoperative nerve action potential recording. *Can J Neurol Sci* 1993;20(1):3-10.
- [51] Robert EG, Happel LT, Kline DG. Intraoperative nerve action potential recordings: technical considerations, problems, and pitfalls. *Neurosurgery* 2009;65(4 Suppl):A97-104.
- [52] Happel L, Kline D, chap 8. Intraoperative neurophysiology of the peripheral nervous system. Deletis V and Shils JL, eds. *Neurophysiology in neurosurgery: a modern intraoperative approach*. Elsevier science, 2002.
- [53] Viel E. Biomécanique de l'épaule et incidences sur la rééducation. *Ann Kinesither* 1979;6:441-54.

- [54] Poppen NK, Walker PS. Forces at the glenohumeral joint in abduction. *Clin Orthop Relat Res* 1978(135):165-70.
- [55] Burke WS, Vangsness CT, Powers CM. Strengthening the supraspinatus: a clinical and biomechanical review. *Clin Orthop Relat Res* 2002(402):292-8.
- [56] Kuechle DK, Newman SR, Itoi E, Niebur GL, Morrey BF, An KN. The relevance of the moment arm of shoulder muscles with respect to axial rotation of the glenohumeral joint in four positions. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2000;15(5):322-9.
- [57] Hawkins RJ, Neer CS, 2nd. A functional analysis of shoulder fusions. *Clin Orthop Relat Res* 1987(223):65-76.
- [58] Elhassan B, Endres NK, Higgins LD, Warner JJ. Massive irreparable tendon tears of the rotator cuff: salvage options. *Instr Course Lect* 2008;57:153-66.
- [59] Revel M. étude électrocinesiolgique mettant en évidence le rôle des adducteurs dans le centrage de la tête humérale et déroulement kinésiothérapique de leur sollicitation dans le traitement des conflits de la coiffe. X^o journée de Menucourt- sept 1999 sept 1999:24-32.
- [60] Coeur PL. Acromio-coraco-humeral joint. Direction and extent of stress-bearing ability. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1988;74(4):329-32.
- [61] monet J, Augereau B. L'épaule: rappels d'anatomie descriptive et fonctionnelle. *Kinesithérapie scientifique* 1988;271:41-3.
- [62] Lucas DB. Biomechanics of the shoulder joint. *Arch Surg* 1973;107(3):425-32.
- [63] Karduna AR, Williams GR, Williams JL, Iannotti JP. Kinematics of the glenohumeral joint: influences of muscle forces, ligamentous constraints, and articular geometry. *J Orthop Res* 1996;14(6):986-93.
- [64] Bhandari PS, Deb P. Dorsal Approach in Transfer of the Distal Spinal Accessory Nerve Into the Suprascapular Nerve: Histomorphometric Analysis and Clinical Results in 14 Cases of Upper Brachial Plexus Injuries. *J Hand Surg Am*.
- [65] Bertelli JA, Ghizoni MF. Transfer of the accessory nerve to the suprascapular nerve in brachial plexus reconstruction. *J Hand Surg Am* 2007;32(7):989-98.
- [66] Colbert SH, Mackinnon S. Posterior approach for double nerve transfer for restoration of shoulder function in upper brachial plexus palsy. *Hand (N Y)* 2006;1(2):71-7.
- [67] Guan SB, Hou CL, Chen DS, Gu YD. Restoration of shoulder abduction by transfer of the spinal accessory nerve to suprascapular nerve through dorsal approach: a clinical study. *Chin Med J (Engl)* 2006;119(9):707-12.
- [68] Mikami Y, Nagano A, Ochiai N, Yamamoto S. Results of nerve grafting for injuries of the axillary and suprascapular nerves. *J Bone Joint Surg Br* 1997;79(4):527-31.
- [69] Terzis JK, Kostas I, Soucacos PN. Restoration of shoulder function with nerve transfers in traumatic brachial plexus palsy patients. *Microsurgery* 2006;26(4):316-24.
- [70] Bonnard C. NA, Neurotisation par le nerf spinal dans les lésions du plexus brachial. française es, ed. les paralysies du plexus brachial. Paris, 1995.
- [71] Tuttle HK. Exposure of the brachial plexus with nerve transplantation. *JAMA* 1913;61(1):15-7.
- [72] Kotani P.T. MH, Suzuki T. trial surgical procedures of nerve transfers to avulsion injuries of plexus brachialis. *SICOT congress-1972* 1972:348-50.
- [73] Allieu Y, Privat JM, Bonnel F. Paralysis in root avulsion of the brachial plexus. Neurotization by the spinal accessory nerve. *Clin Plast Surg* 1984;11(1):133-6.
- [74] Narakas AO. Thoughts on neurotization or nerve transfers in irreparable nerve lesions. *Clin Plast Surg* 1984;11(1):153-9.
- [75] Pruksakorn D, Sananpanich K, Khunamornpong S, Phudhichareonrat S, Chalidapong P. Posterior approach technique for accessory-suprascapular nerve transfer: a cadaveric study of the anatomical landmarks and number of myelinated axons. *Clin Anat* 2007;20(2):140-3.
- [76] Chammas M, Coulet B, Lazerguez C, Thauray MN, lésions du nerf spinal accessoire. Masson, ed. Épaule neurologique et médecine de rééducation. 2009.
- [77] Vathana T, Larsen M, de Ruitter GC, Bishop AT, Spinner RJ, Shin AY. An anatomic study of the spinal accessory nerve: extended harvest permits direct nerve transfer to distal plexus targets. *Clin Anat* 2007;20(8):899-904.
- [78] Bertelli JA, Ghizoni MF. Improved technique for harvesting the accessory nerve for transfer in brachial plexus injuries. *Neurosurgery* 2006;58(4 Suppl 2):ONS-366-70; discussion ONS-70.
- [79] Leechavengvongs S, Witoonchart K, Uerpairojkit C, Thuvasethakul P, Malungpaishrope K. Combined nerve transfers for C5 and C6 brachial plexus avulsion injury. *Journal of Hand Surgery* 2006;31(2):183-9.
- [80] Terzis J, Kostas I, Soucacos P. Restoration of shoulder function with nerve transfers in traumatic brachial plexus palsy patients. *Microsurgery* 2006;26(4):316-24.

- [81] Songcharoen P, Mahaisavariya B, Chotigavanich C. Spinal accessory neurotization for restoration of elbow flexion in avulsion injuries of the brachial plexus. *Journal of Hand Surgery* 1996;21(3): 387-90.
- [82] Bahm J, Noaman H, Becker M. The dorsal approach to the suprascapular nerve in neuromuscular reanimation for obstetric brachial plexus lesions. *Plast Reconstr Surg* 2005;115(1):240-4.
- [83] Alnot JY, Rostoucher P, Oberlin C, Touam C. [C5-C6 and C5-C6-C7 traumatic paralysis of the brachial plexus of the adult caused by supraclavicular lesions]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1998;84(2):113-23.
- [84] Terzis JK, Kostas I. Suprascapular nerve reconstruction in 118 cases of adult posttraumatic brachial plexus. *Plast Reconstr Surg* 2006;117(2):613-29.
- [85] Malessy MJ, de Ruitter GC, de Boer KS, Thomeer RT. Evaluation of suprascapular nerve neurotization after nerve graft or transfer in the treatment of brachial plexus traction lesions. *J Neurosurg* 2004;101(3):377-89.
- [86] Alnot JY, Jolly A, Frot B. [Direct treatment of nerve lesions in brachial plexus injuries in adults--a series of 100 operated cases]. *Int Orthop* 1981;5(2):151-68.
- [87] Vekris MD, Beris AE, Pafilas D, Lykissas MG, Xenakis TA, Soucacos PN. Shoulder reanimation in posttraumatic brachial plexus paralysis. *Injury* 2010;41(3):312-8.
- [88] Merrell GA, Barrie KA, Katz DL, Wolfe SW. Results of nerve transfer techniques for restoration of shoulder and elbow function in the context of a meta-analysis of the English literature. *J Hand Surg Am* 2001;26(2):303-14.
- [89] Lurge A. Concerning surgical treatment of traumatic injury of the upper division of the brachial plexus (Erb's type). *ann surg* 1948;127:317-26.
- [90] Shin A, Spinner R, Bishop A. Nerve transfers for brachial plexus injuries. *Operative Techniques in Orthopaedics* 2004;14(3):199-212.
- [91] Bentolila V, Nizard R, Bizot P, Sedel L. Complete traumatic brachial plexus palsy. Treatment and outcome after repair. *J Bone Joint Surg Am* 1999;81(1):20-8.
- [92] Chammas M, Goubier JN, Coulet B, Reckendorf GM, Picot MC, Allieu Y. Glenohumeral arthrodesis in upper and total brachial plexus palsy. A comparison of functional results. *J Bone Joint Surg Br* 2004;86(5):692-5.
- [93] Oberlin C, Durand S, Belheyar Z, Shafi M, David E, Asfazadourian H. Nerve transfers in brachial plexus palsies. *Chir Main* 2009;28(1):1-9.
- [94] Ruhmann O, Schmolke S, Bohnsack M, Flamme C, Wirth CJ. Shoulder arthrodesis: indications, technique, results, and complications. *J Shoulder Elbow Surg* 2005;14(1):38-50.
- [95] Solomons M, Cvitanich M. A one-stage shoulder arthrodesis and Brooks Seddon pectoralis major to biceps tendon transfer for upper brachial plexus injuries. *J Hand Surg Eur Vol* 2007;32(1):18-23.
- [96] Cardenas-Mejia A, O'Boyle CP, Chen KT, Chuang DC. Evaluation of single-, double-, and triple-nerve transfers for shoulder abduction in 90 patients with supraclavicular brachial plexus injury. *Plast Reconstr Surg* 2008;122(5):1470-8.
- [97] Nagano A. Treatment of brachial plexus injury. *J Orthop Sci* 1998;3(1):71-80.
- [98] Seddon HJ. *Peripheral nerve injuries*. M.R.C. Special Report: London: Her Majesty's Stationery Office, 1954.
- [99] MacAvoy MC, Green DP. Critical reappraisal of Medical Research Council muscle testing for elbow flexion. *J Hand Surg Am* 2007;32(2):149-53.
- [100] Hovelacque A. *Anatomie des nerfs crâniens et rachidiens et du système grand sympathique chez l'homme*. paris: G. Douin, 1927.
- [101] Hentz VR, Narakas A. The results of microneurosurgical reconstruction in complete brachial plexus palsy. Assessing outcome and predicting results. *Orthop Clin North Am* 1988;19(1):107-14.
- [102] Coulet B, Boretto JG, Lazerges C, Chammas M. A comparison of intercostal and partial ulnar nerve transfers in restoring elbow flexion following upper brachial plexus injury (C5-C6+/-C7). *J Hand Surg Am*;35(8):1297-303.
- [103] Viterbo F, Trindade JC, Hoshino K, Mazzoni Neto A. End-to-side neurotization with removal of the epineurial sheath: an experimental study in rats. *Plast Reconstr Surg* 1994;94(7):1038-47.
- [104] Loy S, Bhatia A, Asfazadourian H, Oberlin C. [Ulnar nerve fascicle transfer onto to the biceps muscle nerve in C5-C6 or C5-C6-C7 avulsions of the brachial plexus. Eighteen cases]. *Ann Chir Main Memb Super* 1997;16(4):275-84.
- [105] Leechavengvongs S, Witoonchart K, Uerpaiojkit C, Thuvasethakul P, Ketmalasiri W. Nerve transfer to biceps muscle using a part of the ulnar nerve in brachial plexus injury (upper arm type): a report of 32 cases. *Journal of Hand Surgery* 1998;23(4):711-6.

- [106] Nath RK, Lyons AB, Bietz G. Physiological and clinical advantages of median nerve fascicle transfer to the musculocutaneous nerve following brachial plexus root avulsion injury. *J Neurosurg* 2006;105(6):830-4.
- [107] Sungpet A, Suphachatwong C, Kawinwonggowit V. One-fascicle median nerve transfer to biceps muscle in C5 and C6 root avulsions of brachial plexus injury. *Microsurgery* 2003;23(1):10-3.
- [108] Asfazadourian H, Tramond B, Dauge MC, Oberlin C. Morphometric study of the upper intercostal nerves: practical application for neurotizations in traumatic brachial plexus palsies. *Chir Main* 1999;18(4):243-53.
- [109] Nagano A, Tsuyama N, Ochiai N, Hara T, Takahashi M. Direct nerve crossing with the intercostal nerve to treat avulsion injuries of the brachial plexus. *J Hand Surg Am* 1989;14(6):980-5.
- [110] Chuang DC. Neurotization procedures for brachial plexus injuries. *Hand Clin* 1995;11(4):633-45.
- [111] Okinaga S, Nagano A. Can vascularization improve the surgical outcome of the intercostal nerve transfer for traumatic brachial plexus palsy? A clinical comparison of vascularized and non-vascularized methods. *Microsurgery* 1999;19(4):176-80.
- [112] Kovachevich R, Kircher MF, Wood CM, Spinner RJ, Bishop AT, Shin AY. Complications of intercostal nerve transfer for brachial plexus reconstruction. *J Hand Surg Am*;35(12):1995-2000.
- [113] Bishop AT. Functioning free-muscle transfer for brachial plexus injury. *Hand Clin* 2005;21(1):91-102.
- [114] Gu YD, Wu MM, Zhen YL, Zhao JA, Zhang GM, Chen DS, Yan JG, Cheng XM. Phrenic nerve transfer for brachial plexus motor neurotization. *Microsurgery* 1989;10(4):287-9.
- [115] Dong Z, Zhang CG, Gu YD. Surgical outcome of phrenic nerve transfer to the anterior division of the upper trunk in treating brachial plexus avulsion. *J Neurosurg*;112(2):383-5.
- [116] Zheng MX, Xu WD, Qiu YQ, Xu JG, Gu YD. Phrenic nerve transfer for elbow flexion and intercostal nerve transfer for elbow extension. *J Hand Surg Am*;35(8):1304-9.
- [117] Xu WD, Gu YD, Xu JG, Tan LJ. Full-length phrenic nerve transfer by means of video-assisted thoracic surgery in treating brachial plexus avulsion injury. *Plast Reconstr Surg* 2002;110(1):104-9; discussion 10-1.
- [118] Luedemann W, Hamm M, Blomer U, Samii M, Tatagiba M. Brachial plexus neurotization with donor phrenic nerves and its effect on pulmonary function. *J Neurosurg* 2002;96(3):523-6.
- [119] Chuang ML, Chuang DC, Lin IF, Vintch JR, Ker JJ, Tsao TC. Ventilation and exercise performance after phrenic nerve and multiple intercostal nerve transfers for avulsed brachial plexus injury. *Chest* 2005;128(5):3434-9.
- [120] Siqueira MG, Martins RS. Phrenic nerve transfer in the restoration of elbow flexion in brachial plexus avulsion injuries: how effective and safe is it? *Neurosurgery* 2009;65(4 Suppl):A125-31.
- [121] Waikakul S, Wongtragul S, Vanadurongwan V. Restoration of elbow flexion in brachial plexus avulsion injury: comparing spinal accessory nerve transfer with intercostal nerve transfer. *Journal of Hand Surgery* 1999;24(3):571-7.
- [122] Tung TH, Novak CB, Mackinnon SE. Nerve transfers to the biceps and brachialis branches to improve elbow flexion strength after brachial plexus injuries. *J Neurosurg* 2003;98(2):313-8.
- [123] Mackinnon SE, Novak CB, Myckatyn TM, Tung TH. Results of reinnervation of the biceps and brachialis muscles with a double fascicular transfer for elbow flexion. *J Hand Surg Am* 2005;30(5):978-85.
- [124] Ray WZ, Pet MA, Yee A, Mackinnon SE. Double fascicular nerve transfer to the biceps and brachialis muscles after brachial plexus injury: clinical outcomes in a series of 29 cases. *J Neurosurg*.
- [125] Liverneaux PA, Diaz LC, Beaulieu JY, Durand S, Oberlin C. Preliminary results of double nerve transfer to restore elbow flexion in upper type brachial plexus palsies. *Plast Reconstr Surg* 2006;117(3):915-9.
- [126] Valembois B, Blanchard M, Mitermique B, Noël L. Rééducation des troubles de la sensibilité de la main. *Encyclopédie Médico-Chirurgicale. Vol. Kinésithérapie-Médecine physique-Réadaptation*. Paris: Elsevier SAS, 2006.
- [127] Voerman VF, van Egmond J, Crul BJ. Normal values for sensory thresholds in the cervical dermatomes: a critical note on the use of Semmes-Weinstein monofilaments. *Am J Phys Med Rehabil* 1999;78(1):24-9.
- [128] Berquin AD, Lijesevic V, Blond S, Plaghki L. An adaptive procedure for routine measurement of light-touch sensitivity threshold. *Muscle Nerve*;42(3):328-38.
- [129] Perry JF, Hamilton GF, Lachenbruch PA, Bevin AG. Protective sensation in the hand and its correlation to the ninhydrin sweat test following nerve laceration. *Am J Phys Med* 1974;53(3):113-8.
- [130] Aschan W, Moberg E. The ninhydrin finger printing test used to map out partial lesions to hand nerves. *Acta Chir Scand* 1962;123:365-70.

- [131] Imai H, Tajima T, Natsumi Y. Successful reeducation of functional sensibility after median nerve repair at the wrist. *J Hand Surg Am* 1991;16(1):60-5.
- [132] Dyck PJ. Evaluation of sensibility and re-education of sensation in the hand. By A. L. Dellon, 263 pp, Williams & Wilkins, Baltimore, MD, 1981. \$35.00. *Muscle & Nerve* 1982;5(1):88-.
- [133] Dellon AL. Functional sensation and its reeducation. *Clin Plast Surg* 1984;11(1):95-9.
- [134] Wynn Parry CB, Salter M. Sensory re-education after median nerve lesions. *HAND* 1976;8(3):250-7.
- [135] Spicher C. Manuel de rééducation sensitive du corps humain. Genève: Medecine et Hygiene, 2003.
- [136] Matloubi R. Transfer of sensory branches of radial nerve in hand surgery. *J Hand Surg Br* 1988;13(1):92-5.
- [137] Bedeschi P, Celli L, Balli A. Transfer of sensory nerves in hand surgery. *J Hand Surg Br* 1984;9(1):46-9.
- [138] Rapp E, Lallemand S, Ehrler S, Buch N, Foucher G. Restoration of sensation over the contact surfaces of the thumb-index pinch grip using the terminal branches of the superficial branch of the radial nerve. *Annales de Chirurgie de la Main et du Membre Supérieur* 1999;18(3):179-83.
- [139] Harris RI. Treatment of irreparable nerve injuries. *Can Med Assoc J* 1921;11:833.
- [140] Brunelli GA. Sensory nerves transfers. *J Hand Surg Br* 2004;29(6):557-62.
- [141] Ruchelsman D, Price A, Valencia H, Ramos L, Grossman J. Sensory restoration by lateral antibrachial cutaneous to ulnar nerve transfer in children with global brachial plexus injuries. *HAND* 2010;5:370-3.
- [142] Peacock EE, Jr. Restoration of Sensation in Hands with Extensive Median Nerve Defects. *Surgery* 1963;54:576-86.
- [143] Hattori Y, Doi K, Sakamoto S, Yukata K. Sensory recovery of the hand with intercostal nerve transfer following complete avulsion of the brachial plexus. *Plast Reconstr Surg* 2009;123(1):276-83.
- [144] Millesi H. Surgical management of brachial plexus injuries. *J Hand Surg Am* 1977;2(5):367-78.
- [145] Doi K, Sakai K, Kuwata N, Ihara K, Kawai S. Double free-muscle transfer to restore prehension following complete brachial plexus avulsion. *J Hand Surg Am* 1995;20(3):408-14.
- [146] Songcharoen P, Wongtrakul S, Mahaisavariya B, Spinner RJ. Hemi-contralateral C7 transfer to median nerve in the treatment of root avulsion brachial plexus injury. *J Hand Surg Am* 2001;26(6):1058-64.
- [147] Wang L, Zhao X, Gao K, Lao J, Gu YD. Reinnervation of thenar muscle after repair of total brachial plexus avulsion injury with contralateral C7 root transfer: Report of five cases. *Microsurgery*;31(4):323-6.
- [148] Hierner R, Berger AK, Did the partial contralateral C7-transfer fulfil our expectations? Results after 5 year experience. How to Improve the Results of Peripheral Nerve Surgery. Vol 100: Springer Vienna, 2007.
- [149] Gu YD, Shen LY. Electrophysiological changes after severance of the C7 nerve root. *J Hand Surg Br* 1994;19(1):69-71.
- [150] Sammer DM, Kircher MF, Bishop AT, Spinner RJ, Shin AY. Hemi-Contralateral C7 Transfer to the Median Nerve: Outcomes and Complications: Level 4 Evidence. *The Journal of hand surgery* 2009;34(7, Supplement 1):28-9.
- [151] Terzis JK, Kokkalis ZT. Selective contralateral c7 transfer in posttraumatic brachial plexus injuries: a report of 56 cases. *Plast Reconstr Surg* 2009;123(3):927-38.
- [152] Alnot JY, Salon A. La main plexique (l'atteinte de la main dans les lésions traumatiques du plexus brachial de l'adulte). *Annales de Chirurgie de la Main et du Membre Supérieur* 1993;12(5):291-301.
- [153] Goldner JL. Strengthening of the partially paralyzed shoulder girdle by multiple muscle-tendon transfers. *Hand Clin* 1988;4(2):323-36.
- [154] Aziz W, Singer RM, Wolff TW. Transfer of the trapezius for flail shoulder after brachial plexus injury. *J Bone Joint Surg Br* 1990;72(4):701-4.
- [155] Kotwal PP, Mittal R, Malhotra R. Trapezius transfer for deltoid paralysis. *J Bone Joint Surg Br* 1998;80(1):114-6.
- [156] Ruhmann O, Schmolke S, Bohnsack M, Carls J, Wirth CJ. Trapezius transfer in brachial plexus palsy. Correlation of the outcome with muscle power and operative technique. *J Bone Joint Surg Br* 2005;87(2):184-90.
- [157] Ross AH, Birch R, traitement chirurgical palliatif de l'épaule paralysée après lésion du plexus brachial. Tubiana R, ed. traité de chirurgie de la main. Vol 4-AFFECTIONS NEUROLOGIQUES. paralysies du membre supérieur. syndromes canalaies. paris: Masson, 1991.
- [158] Chuang DC. Functioning free muscle transplantation for brachial plexus injury. *Clin Orthop Relat Res* 1995(314):104-11.

- [159] Mathes SJ, Nahai F. Classification of the vascular anatomy of muscles: experimental and clinical correlation. *Plast Reconstr Surg* 1981;67(2):177-87.
- [160] Terzis JK, Kostopoulos VK. Free muscle transfer in posttraumatic plexopathies: part 1: the shoulder. *Ann Plast Surg*;65(3):312-7.
- [161] Alnot JY, Oberlin C, transferts musculaires dans les paralysies de la flexion et de l'extension du coude. technique chirurgicale. Tubiana R, ed. traité de chirurgie de la main. Vol 4-AFFECTIONS NEUROLOGIQUES. paralysies du membre supérieur. syndromes canalaire. paris: Masson, 1991.
- [162] Brunelli GA, Vigasio A, Brunelli GR. Modified Steindler procedure for elbow flexion restoration. *J Hand Surg Am* 1995;20(5):743-6.
- [163] Beaton DE, Dumont A, Mackay MB, Richards RR. Steindler and pectoralis major flexorplasty: a comparative analysis. *J Hand Surg Am* 1995;20(5):747-56.
- [164] Terzis JK, Kostopoulos VK. Free Muscle Transfer in Posttraumatic Plexopathies Part II: The Elbow. *Hand (N Y)* 2009.
- [165] Doi K, Muramatsu K, Hottori Y, Watanabe M. Reconstruction of upper extremity function in brachial plexopathy using double free gracilis flaps. *Tech Hand Up Extrem Surg* 2000;4(1):34-43.
- [166] Monreal R. Dynamic Tenodesis of the Finger Extensors to Improve Hand Function After Brachial Plexus Injury. *Hand (N Y)* 2009.
- [167] Brunelli G, Vigasio A, Battiston B, Brunelli F, Guizzi P. L'arthrodèse du poignet dans les paralysies de la main: technique personnelle. *Annales de Chirurgie de la Main et du Membre Supérieur* 1990;9(1):47-53.
- [168] Kubler-Ross E. *On Death and Dying*. New York: Macmillan, 1969.
- [169] Kinlaw D. Pre-/postoperative therapy for adult plexus injury. *Hand Clin* 2005;21(1):103-8, vii.
- [170] Delprat J. Principes de rééducation des lésions des nerfs périphériques au membre supérieur. *Annales de readaptation et de médecine physique* 1997;40(6):379-80.
- [171] Eberstein A, Eberstein S. Electrical stimulation of denervated muscle: is it worthwhile? *Med Sci Sports Exerc* 1996;28(12):1463-9.
- [172] Flor H, Elbert T, Knecht S, Wienbruch C, Pantev C, Birbaumer N, Larbig W, Taub E. Phantom-limb pain as a perceptual correlate of cortical reorganization following arm amputation. *Nature* 1995;375(6531):482-4.
- [173] Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D, Stewart M. Perceptual correlates of massive cortical reorganization. *Science* 1992;258(5085):1159-60.
- [174] Flor H, Denke C, Schaefer M, Grusser S. Effect of sensory discrimination training on cortical reorganisation and phantom limb pain. *Lancet* 2001;357(9270):1763-4.
- [175] Moseley GL, Zalucki NM, Wiech K. Tactile discrimination, but not tactile stimulation alone, reduces chronic limb pain. *Pain* 2008;137(3):600-8.
- [176] Moseley GL, Wiech K. The effect of tactile discrimination training is enhanced when patients watch the reflected image of their unaffected limb during training. *Pain* 2009;144(3):314-9.
- [177] Macaluso E, Frith CD, Driver J. Modulation of human visual cortex by crossmodal spatial attention. *Science* 2000;289(5482):1206-8.
- [178] Taylor-Clarke M, Kennett S, Haggard P. Persistence of visual-tactile enhancement in humans. *Neurosci Lett* 2004;354(1):22-5.
- [179] Ramachandran VS, Altschuler EL. The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function. *Brain* 2009;132(Pt 7):1693-710.
- [180] di Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G. Understanding motor events: a neurophysiological study. *Exp Brain Res* 1992;91(1):176-80.
- [181] Kato N, Htut M, Taggart M, Carlstedt T, Birch R. The effects of operative delay on the relief of neuropathic pain after injury to the brachial plexus: a review of 148 cases. *J Bone Joint Surg Br* 2006;88(6):756-9.
- [182] Sindou MP, Blondet E, Emery E, Mertens P. Microsurgical lesioning in the dorsal root entry zone for pain due to brachial plexus avulsion: a prospective series of 55 patients. *J Neurosurg* 2005;102(6):1018-28.
- [183] Ali M, Saitoh Y, Oshino S, Hosomi K, Kishima H, Morris S, Shibata M, Yoshimine T. Differential Efficacy of Electrical Motor Cortex Stimulation and Lesioning of the Dorsal Root Entry Zone for Continuous versus Paroxysmal Pain after Brachial Plexus Avulsion. *Neurosurgery*.
- [184] Williams WW, Twyman RS, Donnell ST, Birch R. The posterior triangle and the painful shoulder: spinal accessory nerve injury. *Ann R Coll Surg Engl* 1996;78(6):521-5.
- [185] Bremner-Smith AT, Unwin AJ, Williams WW. Sensory pathways in the spinal accessory nerve. *J Bone Joint Surg Br* 1999;81(2):226-8.

- [186] Bonilla G, Di Masi G, Battaglia D, Otero JM, Socolovsky M. Pain and brachial plexus lesions: evaluation of initial outcomes after reconstructive microsurgery and validation of a new pain severity scale. *Acta Neurochir (Wien)*;153(1):171-6.
- [187] Baron R, Binder A, Wasner G. Neuropathic pain: diagnosis, pathophysiological mechanisms, and treatment. *Lancet Neurol*;9(8):807-19.
- [188] Rolke R, Baron R, Maier C, Tolle TR, Treede RD, Beyer A, Binder A, Birbaumer N, Birklein F, Botefur IC, Braune S, Flor H, Huge V, Klug R, Landwehrmeyer GB, Magerl W, Maihofner C, Rolko C, Schaub C, Scherens A, Sprenger T, Valet M, Wasserka B. Quantitative sensory testing in the German Research Network on Neuropathic Pain (DFNS): standardized protocol and reference values. *Pain* 2006;123(3):231-43.
- [189] Loeser JD, Ward AA, Jr. Some effects of deafferentation on neurons of the cat spinal cord. *Arch Neurol* 1967;17(6):629-36.
- [190] Ovelmen-Levitt J. Abnormal physiology of the dorsal horn as related to the deafferentation syndrome. *Appl Neurophysiol* 1988;51(2-5):104-16.
- [191] Janig W, Levine JD, Michaelis M. Interactions of sympathetic and primary afferent neurons following nerve injury and tissue trauma. *Prog Brain Res* 1996;113:161-84.
- [192] Wall PD, Devor M. Sensory afferent impulses originate from dorsal root ganglia as well as from the periphery in normal and nerve injured rats. *Pain* 1983;17(4):321-39.
- [193] Michaelis M, Liu X, Janig W. Axotomized and intact muscle afferents but no skin afferents develop ongoing discharges of dorsal root ganglion origin after peripheral nerve lesion. *J Neurosci* 2000;20(7):2742-8.
- [194] Moore KA, Kohno T, Karchewski LA, Scholz J, Baba H, Woolf CJ. Partial peripheral nerve injury promotes a selective loss of GABAergic inhibition in the superficial dorsal horn of the spinal cord. *J Neurosci* 2002;22(15):6724-31.
- [195] Bertelli JA, Ghizoni MF. Pain after avulsion injuries and complete palsy of the brachial plexus: the possible role of nonavulsed roots in pain generation. *Neurosurgery* 2008;62(5):1104-13; discussion 13-4.
- [196] Flor H, Nikolajsen L, Staehelin Jensen T. Phantom limb pain: a case of maladaptive CNS plasticity? *Nat Rev Neurosci* 2006;7(11):873-81.
- [197] Bruxelles J, Travers V, Thiebaut JB. Occurrence and treatment of pain after brachial plexus injury. *Clin Orthop Relat Res* 1988(237):87-95.
- [198] Berman JS, Birch R, Anand P. Pain following human brachial plexus injury with spinal cord root avulsion and the effect of surgery. *Pain* 1998;75(2-3):199-207.
- [199] Alnot JY, Daunois O, Oberlin C, Bleton R. [Total paralysis of the brachial plexus caused by supra-clavicular lesions]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1992;78(8):495-504.
- [200] Moiyadi AV, Devi BI, Nair KP. Brachial plexus injuries: outcome following neurotization with intercostal nerve. *J Neurosurg* 2007;107(2):308-13.
- [201] Berman J, Anand P, Chen L, Taggart M, Birch R. Pain relief from preganglionic injury to the brachial plexus by late intercostal nerve transfer. *J Bone Joint Surg Br* 1996;78(5):759-60.
- [202] Atherton DD, Taherzadeh O, Elliot D, Anand P. Age-dependent development of chronic neuropathic pain, allodynia and sensory recovery after upper limb nerve injury in children. *J Hand Surg Eur Vol* 2008;33(2):186-91.
- [203] Silhouette B, Margot-Duclot A, Andrianasolo H, Sitzmann L, Thiebaut JB. DREZ operation in brachial plexus pain: long term results. second international congress on neuropathic pain-2007 2007.
- [204] Lai HY, Lee CY, Lee ST. High cervical spinal cord stimulation after failed dorsal root entry zone surgery for brachial plexus avulsion pain. *Surg Neurol* 2009;72(3):286-9; discussion 9.
- [205] Nguyen JP, Lefaucheur JP, Decq P, Uchiyama T, Carpentier A, Fontaine D, Brugieres P, Pollin B, Feve A, Rostaing S, Cesaro P, Keravel Y. Chronic motor cortex stimulation in the treatment of central and neuropathic pain. Correlations between clinical, electrophysiological and anatomical data. *Pain* 1999;82(3):245-51.
- [206] M. Dufour, Pillu M, épaule. *Biomécanique fonctionnelle*. Elsevier-Masson, 2006.
- [207] Nagano A, Ochiai N, Sugioka H, Hara T, Tsuyama N. Usefulness of myelography in brachial plexus injuries. *J Hand Surg Br* 1989;14(1):59-64.
- [208] Yoshikawa T, Hayashi N, Yamamoto S, Tajiri Y, Yoshioka N, Masumoto T, Mori H, Abe O, Aoki S, Ohtomo K. Brachial plexus injury: clinical manifestations, conventional imaging findings, and the latest imaging techniques. *Radiographics* 2006;26 Suppl 1:S133-43.
- [209] Fournier E, 22. *Analyse des potentiels d'unité motrice. internationales ém, ed. Examen électromyographique. sémiologie électrophysiologique des nerfs et des muscles*. Lavoisier, 2008.

- [210] Malessy MJ, Hoffmann CF, Thomeer RT. Initial report on the limited value of hypoglossal nerve transfer to treat brachial plexus root avulsions. *J Neurosurg* 1999;91(4):601-4.
- [211] Sungpet A, Suphachatwong C, Kawinwonggowit V. One-fascicle median nerve transfer to biceps muscle in C5 and C6 root avulsions of brachial plexus injury. *Microsurgery* 2003;23(1):10-3.
- [212] Kawai H, Kawabata H, Masada K, Ono K, Yamamoto K, Tsuyuguchi Y, Tada K. Nerve repairs for traumatic brachial plexus palsy with root avulsion. *Clin Orthop Relat Res* 1988(237):75-86.
- [213] Ihara K, Doi K, Sakai K, Kuwata N, Kawai S. Restoration of sensibility in the hand after complete brachial plexus injury. *Journal of Hand Surgery* 1996;21(3):381-6.
- [214] Bonnard C, Y.Allieu, Alnot JY, Brunelli G, Merle M, Santos-Palazzi A, Sedel L, Raimondi PL, Narakas A, Les paralysies supra-claviculaires totales. 1-possibilités chirurgicales et résultats. Francaise ES, ed. *Les paralysies du plexus brachial*. 1995.
- [215] Millesi H, Omer GE, Spinner M, and Beek ALV, eds. *Management of Peripheral Nerve Problems*. Philadelphia: Saunders, 1997.
- [216] Minami M, Ishii S. Satisfactory elbow flexion in complete (preganglionic) brachial plexus injuries: produced by suture of third and fourth intercostal nerves to musculocutaneous nerve. *J Hand Surg Am* 1987;12(6):1114-8.
- [217] Brunelli G, Terzis JK, ed. *Microreconstruction of Nerve Injuries*. Saunders, 1987.
- [218] Friedman AH, Nunley JA, 2nd, Goldner RD, Oakes WJ, Goldner JL, Urbaniak JR. Nerve transposition for the restoration of elbow flexion following brachial plexus avulsion injuries. *J Neurosurg* 1990;72(1):59-64.
- [219] Chuang D, Yeh M, Wei F. Intercostal nerve transfer of the musculocutaneous nerve in avulsed brachial plexus injuries: evaluation of 66 patients. *The Journal of hand surgery* 1992;17(5):822.
- [220] Nagano A, Yamamoto S, Mikami Y. Intercostal nerve transfer to restore upper extremity functions after brachial plexus injury. *Ann Acad Med Singapore* 1995;24(4 Suppl):42-5.
- [221] Songcharoen P, Mahaisavariya B, Chotigavanich C. Spinal accessory neurotization for restoration of elbow flexion in avulsion injuries of the brachial plexus. *J Hand Surg Am* 1996;21(3):387-90.
- [222] Samardzic M, Rasulic L, Grujicic D, Milicic B. Results of nerve transfers to the musculocutaneous and axillary nerves. *Neurosurgery* 2000;46(1):93-101; discussion -3.
- [223] Gu Y, Cai P, Xu F, Peng F, Chen L. Clinical application of ipsilateral C7 nerve root transfer for treatment of C5 and C6 avulsion of brachial plexus. *Microsurgery* 2003;23(2):105-8.
- [224] Samii A, Carvalho G, Samii M. Brachial plexus injury: factors affecting functional outcome in spinal accessory nerve transfer for the restoration of elbow flexion. *J Neurosurg* 2003;98(2):307-12.
- [225] Chalidapong P, Sananpanich K, Kraissarin J, Bumroongkit C. Pulmonary and biceps function after intercostal and phrenic nerve transfer for brachial plexus injuries. *J Hand Surg Br* 2004;29(1):8-11.
- [226] Chuang DC. Nerve transfers in adult brachial plexus injuries: my methods. *Hand Clin* 2005;21(1):71-82.
- [227] Leechavengvongs S, Witoonchart K, Uerpairojkit C, Thuvasethakul P, Malungpaishrope K. Combined nerve transfers for C5 and C6 brachial plexus avulsion injury. *J Hand Surg Am* 2006;31(2):183-9.
- [228] Vekris MD, Beris AE, Johnson EO, Korobilias AV, Pafilas D, Vekris AD, Soucacos PN. Musculocutaneous neurotization to restore elbow flexion in brachial plexus paralysis. *Microsurgery* 2006;26(4):325-9.
- [229] Monreal R. Restoration of elbow flexion by transfer of the phrenic nerve to musculocutaneous nerve after brachial plexus injuries. *Hand (N Y)* 2007;2(4):206-11.
- [230] Sulaiman OA, Kim DD, Burkett C, Kline DG. Nerve transfer surgery for adult brachial plexus injury: a 10-year experience at Louisiana State University. *Neurosurgery* 2009;65(4 Suppl):A55-62.
- [231] Yamada S, Lonser RR, Colohan AR, Yamada SM, Won DJ. Bypass coaptation for cervical root avulsion: indications for optimal outcome. *Neurosurgery* 2009;65(4 Suppl):A203-11.
- [232] Bertelli JA, Ghizoni MF. Reconstruction of complete palsies of the adult brachial plexus by root grafting using long grafts and nerve transfers to target nerves. *J Hand Surg Am*;35(10):1640-6.
- [233] Carlsen BT, Kircher MF, Spinner RJ, Bishop AT, Shin AY. Comparison of single versus double nerve transfers for elbow flexion after brachial plexus injury. *Plast Reconstr Surg*;127(1):269-76.
- [234] Vekris M, Beris A, Johnson E, Korobilias A, Pafilas D, Vekris A, Soucacos P. Musculocutaneous neurotization to restore elbow flexion in brachial plexus paralysis. *Microsurgery* 2006;26(4):325-9.
- [235] Bertelli JA, Ghizoni MF, Loure Iro Chaves DP. Sensory disturbances and pain complaints after brachial plexus root injury: a prospective study involving 150 adult patients. *Microsurgery*;31(2):93-7.
- [236] Chuang DC, Lee GW, Hashem F, Wei FC. Restoration of shoulder abduction by nerve transfer in avulsed brachial plexus injury: evaluation of 99 patients with various nerve transfers. *Plast Reconstr Surg* 1995;96(1):122-8.

- [237] Alnot JY. Traumatic brachial plexus lesions in the adult: indications and results. *Microsurgery* 1995;16(1):22-9.
- [238] Sungpet A, Suphachatwong C, Kawinwonggowith V. Restoration of shoulder abduction in brachial plexus injury with phrenic nerve transfer. *Aust N Z J Surg* 2000;70(11):783-5.
- [239] Leechavengvongs S, Witoonchart K, Uerpairojkit C, Thuvasethakul P. Nerve transfer to deltoid muscle using the nerve to the long head of the triceps, part II: a report of 7 cases. *Journal of Hand Surgery* 2003;28(4):633-8.
- [240] Codsí MJ, Hennigan S, Herzog R, Kella S, Kelley M, Leggin B, Williams GR, Iannotti JP. Latissimus dorsi tendon transfer for irreparable posterosuperior rotator cuff tears. *Surgical technique. J Bone Joint Surg Am* 2007;89 Suppl 2 Pt.1:1-9.
- [241] Kim DH, Cho YJ, Tiel RL, Kline DG. Outcomes of surgery in 1019 brachial plexus lesions treated at Louisiana State University Health Sciences Center. *J Neurosurg* 2003;98(5):1005-16.
- [242] Bertelli JA, Ghizoni MF. Reconstruction of C5 and C6 brachial plexus avulsion injury by multiple nerve transfers: spinal accessory to suprascapular, ulnar fascicles to biceps branch, and triceps long or lateral head branch to axillary nerve. *J Hand Surg Am* 2004;29(1):131-9.
- [243] Malunpaishrope K, Leechavengvongs S, Uerpairojkit C, Witoonchart K, Jitprapaikulsarn S, Chongthammakun S. Nerve transfer to deltoid muscle using the intercostal nerves through the posterior approach: an anatomic study and two case reports. *J Hand Surg Am* 2007;32(2):218-24.
- [244] Kline D, Hudson A, Kim D. atlas of peripheral nerve surgery. philadelphia: Saunders, 2001.
- [245] Narakas A, Herzberg G. Neuro-neural intraplexal transfers in traumatic radicular avulsions of the brachial plexus. Report on fifteen cases. *Ann Chir Main* 1985;4(3):211-8.

NOM: LOUPPE

PRENOM: JEAN-MARIE

Titre de thèse: Les neurotisations dans la réanimation du plexus brachial traumatique: résultats au CHU de Nantes (2000-2010).

RESUME

Une revue rétrospective des 67 patients opérés du plexus brachial au CHU de Nantes entre 2000 et 2010 a été réalisée. 18 neurotisations supra-scapulaires ont été retenues, obtenant 72% d'abduction de bons résultats. 18 neurotisations intercosto-musculocutanées ont correspondu aux critères de sélection, dont un tiers a permis d'atteindre un résultat utile. 3 neurotisations ulno-musculocutanées selon Oberlin ont conduit à 100% de bons résultats. 27% des patients présentent une douleur neuropathique. Le résultat moteur est lié principalement au délai opératoire.

La valeur diagnostique des indices cliniques et paracliniques est revue, ainsi que les résultats des différentes options de neurotisation.

MOTS-CLES

plexus brachial traumatique, neurotisation, douleur plexique