



Main de l'hémiplégique

The spastic Hand

Y. Allieu (Professeur de chirurgie orthopédique et traumatologie à la faculté de médecine de Montpellier) ^{a,*}, P. Denormandie (Chirurgien, neuro-orthopédiste) ^b, J.-N. Goubier (Chirurgien de la main et du membre supérieur, attaché à l'hôpital Saint Antoine) ^c

^a Institut de chirurgie de la main de Montpellier, 1133, rue des Bouisses, 34070 Montpellier, France

^b Service de chirurgie orthopédique du professeur T. Judet, hôpital Raymond Poincaré, 104, rue Raymond-Poincaré, 92380 Garches, France

^c Service de chirurgie de la main, clinique La Francilienne, 16, avenue de l'Hôtel-de-Ville, 77340 Pontault-Combault, France

MOTS CLÉS

Hémiplégie ;
Main spastique ;
Transfert tendineux ;
Chirurgie de la main ;
Main neurologique ;
Neurotomies

Résumé La main de l'hémiplégie est une main spastique et paralytique par atteinte neurologique centrale. Il faut différencier deux tableaux tout à fait différents : la main de l'hémiplégie cérébrale infantile souvent « chirurgicale » et qui a fait l'objet de la quasi-totalité des travaux sur la chirurgie de la main hémiplégique et la main du cérébrolésé adulte (après hémiplégie vasculaire ou traumatisme crânien). Dans ce second tableau, les indications à visée fonctionnelle sont beaucoup plus rares, du fait des troubles cérébraux des fonctions supérieures associés. Cependant, les indications dans un but d'hygiène et esthétique y sont fréquentes et font de cette chirurgie, souvent mal connue et qui cependant peut améliorer grandement la fonction globale de ces malades, une chirurgie gagnante. Les indications chirurgicales sont fondées sur une étude clinique précise de la main complétée par l'utilisation de blocs anesthésiques, une étude électromyographique et l'utilisation de la toxine botulique. Outre ce bilan lésionnel, elles doivent tenir compte d'un bilan général et cognitif. Il est ainsi possible de distinguer deux types de main : une main potentiellement fonctionnelle pouvant récupérer après traitement des possibilités fonctionnelles qui ne sont jamais totales mais permettent de retrouver une « main d'appoint » ; une main potentiellement non fonctionnelle, qui reste fonctionnellement inutilisable. Le but de la chirurgie est de corriger des déséquilibres musculaires entre agonistes et antagonistes et les déformations ostéoarticulaires qu'ils engendrent. Pour ce faire, on peut agir sur le nerf (hyponeurotisation, neurectomie, intervention neurochirurgicale) ou sur le muscle, en relâchant les muscles agonistes (désinsertion musculaire, allongement tendineux) ou en renforçant l'action des muscles antagonistes par transferts tendineux. La stabilisation articulaire du poignet, des chaînes digitales et du pouce en bonne position fait appel aux arthrodèses ou aux ténodèses.

© 2004 Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : yves.allieu@wanadoo.fr (Y. Allieu).

KEYWORDS

Hemiplegia;
Spastic Hand;
Tendon Transfer;
Hand Surgery;
Neurologic Hand;
Neurotomies

Abstract The hemiplegic hand is a spastic and paralytic hand due to central neurological lesions. Two completely different types must be distinguished: the hand of the child with cerebral palsy which is the subject of almost all the studies on surgery of the hemiplegic hand, and the hand of the brain damaged adult (after vascular hemiplegia or brain traumatism). In this second type, the indications in a functional aim are very rare, due to the associated cerebral disorders. However, the indications in a hygienic or aesthetic aim are common and make this surgery, which is not very well known and which can greatly improve the global functions of these patients, a winning surgery. The surgical indications are based on a specific clinical study of the hand completed by the use of anaesthetic blocks, electromyographic studies and use of botox. Apart from this lesional study, they must take into consideration general and cognitive conditions. It is thus possible to distinguish two types of hands: the "Potentially Functional Hand" which can recover after treatment its functional possibilities which will never be total but will be useful, and the "Potentially Non Functional Hand" which will remain functionally unusable. The aim of this surgery is to correct muscular disorders between agonist and antagonist and the osteo-articular deformations that they bring about. For this, the nerve can be treated (hyponeurotisation, neurectomy, neuro-surgery) or on the muscle by relaxing the agonist muscles (muscular disinsertion, tendon lengthening...) or by strengthening the action of the antagonist muscles by tendon transfers. The articular stabilisation of the wrist, of the digital chains and of the thumb in a good position can be performed by arthrodesis or tenodesis.

© 2004 Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Introduction

La main de l'hémiplégique est une main spastique et paralytique par atteinte neurologique centrale.

Il faut différencier deux tableaux tout à fait différents :

- la main de l'hémiplégie cérébrale infantile souvent « chirurgicale »^{5,13,15,17,23,24,27,37,41,42,45} et qui a fait l'objet de la quasi-totalité des travaux sur la chirurgie de la main hémiplégique ;
- la main du cérébrolésé adulte^{11,18,20,31} (après hémiplégie vasculaire ou traumatisme crânien). Dans ce second tableau, les indications à visée fonctionnelle sont beaucoup plus rares, du fait des troubles cérébraux des fonctions supérieures associés. Cependant, les indications dans un but d'hygiène et esthétique y sont fréquentes et font de cette chirurgie, souvent mal connue et qui cependant peut améliorer grandement la fonction globale de ces malades, une chirurgie gagnante.

Bases et principes du traitement chirurgical

Évaluation d'une main spastique

L'examen de la main est indissociable de celui du membre supérieur, sur le plan fonctionnel ; c'est ce dernier qui permet l'orientation de la main dans l'espace : épaule, coude, pronosupination.¹³

Le bilan de la main hémiplégique doit intégrer l'évaluation neuro-orthopédique sur le plan lésionnel au niveau de la main (commande motrice, sensibilité, spasticité) mais aussi l'évaluation cognitive globale du patient. L'attitude en pronation, en particulier, doit être préalablement traitée (transferts tendineux, ostéotomie, arthrodèse radio-ulnaire distale). Nous ne traitons pas ici la correction de l'épaule et du coude hémiplégiques, dont l'attitude est en adduction-rotation interne de l'épaule et en pronation de l'avant-bras.

Le bilan lésionnel, qui peut guider le geste chirurgical si celui-ci est indiqué après bilan général du patient, ne peut être intégré, chez l'adulte cérébrolésé, dans une des classifications utilisées dans l'hémiplégie cérébrale infantile (classifications de Zancolli,^{42,43} de House¹⁵ et de Tonkin^{38,40}). Il n'est pas possible d'envisager une classification unique qui prenne en compte tous les paramètres, surtout chez l'adulte cérébrolésé, après hémiplégie vasculaire ou traumatisme crânien. Les tableaux sont extrêmement complexes et varient d'un sujet à l'autre. Seul un bilan précis débouchant sur un *arbre décisionnel* peut guider l'intervention thérapeutique.

On peut différencier *la main spastique extrinsèque* portant sur les pronateurs, les fléchisseurs des doigts et du poignet, le long fléchisseur propre du pouce (flexor pollicis longus : FPL) et *la main spastique intrinsèque*, soit des doigts longs (muscles interosseux), soit du pouce (adducteur du pouce et 1^{er} interosseux dorsal mais aussi thénariens exter-

nes). Outre la main spastique extrinsèque et la main spastique intrinsèque, le problème se complique, chez l'adulte cérébréolé, par l'existence de *mains mixtes*, spastiques extrinsèques et intrinsèques.

Cet arbre décisionnel doit faire la part de la spasticité et de la rétraction musculaire. Pour cela, l'intérêt des blocs anesthésiques nerveux préopératoires est primordial et doit faire partie de l'examen clinique. Il est donc fondé sur :

- l'examen clinique, en tenant compte de :
 - la possibilité ou non d'extension active des doigts, le poignet étant à moins de 20° de flexion ;
 - la possibilité ou non d'abduction active du pouce ;
 - l'état fonctionnel des muscles interosseux digitaux (spastiques ou rétractés) ;
- les blocs nerveux anesthésiques, qui permettent de différencier spasticité et rétraction.

L'examen peut être aussi complété par une électromyographie dynamique pour préciser les muscles à transférer.

Par ailleurs, un traitement par toxine botulique préopératoire peut être indiqué de manière à renforcer ou à révéler les muscles antagonistes et permettre de se rendre compte de l'effet du traitement ultérieur.

Arbre décisionnel

Si l'extension active des doigts est possible, le poignet étant à moins de 20° de flexion, ou impossible, on se tourne vers l'extension active du poignet qui est soit possible soit impossible. On peut alors différencier une spasticité (ou une rétraction) des fléchisseurs des doigts, une spasticité (ou une rétraction) des fléchisseurs du poignet, une paralysie ou non-fonction des extenseurs du poignet.

Si elle est impossible, on apprécie le caractère réductible (poignet étendu ou fléchi) ou irréductible du flessum des doigts et l'on peut alors différencier les tableaux de spasticité de fléchisseurs des doigts, de rétraction des fléchisseurs des doigts, de déficit d'extension des doigts.

L'étude de l'*abduction active du pouce*, possible ou impossible, se fait le poignet en flexion ou en extension, et étudie la possibilité de réduction ou non, permettant de différencier la spasticité de la rétraction du FPL, la faiblesse des extenseurs du pouce, la spasticité ou la rétraction de l'adducteur du pouce.

Le bilan est complété par une étude analytique des muscles thénariens externes.

On recherche par ailleurs l'atteinte (spasticité ou rétraction) des *muscles intrinsèques digitaux*.

Les « *mains mixtes* », chez le cérébréolé, associent une atteinte (spasticité ± rétraction) des muscles extrinsèques et intrinsèques. Le diagnostic n'est alors possible, en préopératoire, que par les blocs nerveux anesthésiques ou en peropératoire après libération des extrinsèques. Le traitement de la spasticité extrinsèque démasque ainsi souvent une main intrinsèque, qui n'est visible qu'en postopératoire, lorsque les extrinsèques ont été corrigés.

Résultat

Ce bilan lésionnel doit être intégré dans le bilan général et cognitif permettant de distinguer deux types de mains :^{20,30}

- *une main potentiellement fonctionnelle* pouvant récupérer après traitement des possibilités fonctionnelles qui ne sont jamais totales mais permettent de retrouver une « main d'appoint » ;
- *une main potentiellement non fonctionnelle*, qui reste fonctionnellement inutilisable.

Lorsque l'orientation de la main est impossible vu l'état du membre supérieur proximal, en cas de syndrome associé (cérébelleux et extrapyramidal), en cas de troubles cognitifs importants, la main est potentiellement non fonctionnelle. Il n'en demeure pas moins que l'indication chirurgicale peut être proposée pour améliorer l'aspect esthétique et hygiénique de cette main. Souvent, les patients désirent une amélioration esthétique, surtout les femmes, en raison de l'attitude en hyperflexion des doigts et en flexion-pronation du poignet ; par ailleurs, si l'attitude en flexion des doigts est importante, elle entraîne une macération et des difficultés hygiéniques, qui font que l'intervention améliore grandement ces patients.

But de la chirurgie

Le but de la chirurgie est de corriger les déséquilibres musculaires et les déformations ostéoarticulaires qu'ils engendrent.

Correction des déséquilibres musculaires

Pour corriger les déséquilibres musculaires, il faut :

- avant tout, affaiblir les muscles spastiques (ou corriger leur rétraction, secondaire à la spasticité) ;
- secondairement, augmenter l'action de leurs antagonistes dont la force est insuffisante car ils sont détendus ou paralysés.

Déformation spastique

Quand la déformation est purement spastique, pour affaiblir le muscle spastique, on privilégie une in-

tervention sur le nerf. La prise en charge est, dans une première étape, médicale par l'utilisation de la toxine botulique au niveau des muscles spastiques, associée à de la rééducation qui vise en particulier le renforcement des antagonistes. Les gestes chirurgicaux sur le nerf sont soit des hyponeurotisations sélectives, soit des neurectomies.

Déformation par rétraction

Quand la déformation est essentiellement en rapport avec une rétraction du complexe musculotendineux, on pratique un raccourcissement du muscle ou du tendon.

Déformation mixte

Quand la déformation est mixte, à la fois spastique et par rétraction, la priorité est donnée à l'intervention sur le muscle ou le tendon, d'autant que cette intervention, en diminuant le réflexe d'étirement, modifie la spasticité du muscle.

Correction des déformations articulaires

La correction des déformations articulaires fait appel à des ténodèses ou à des arthrodèses stabilisant l'articulation en bonne position.

Intervention sur le nerf

Muscles extrinsèques spastiques : hyponeurotisation sélective (Fig. 1)³

Le nerf médian est repéré au coude. Le corps musculaire du rond pronateur (pronator teres : PT) est récliné afin d'observer ses différentes branches motrices. Celles-ci sont identifiées par stimulations répétées. L'hyponeurotisation est réalisée au microscope, elle consiste à réséquer - sur 1 cm, afin d'éviter une cicatrisation spontanée - les deux tiers ou les trois quarts du volume du nerf, soit par résection d'un certain nombre des branches quand

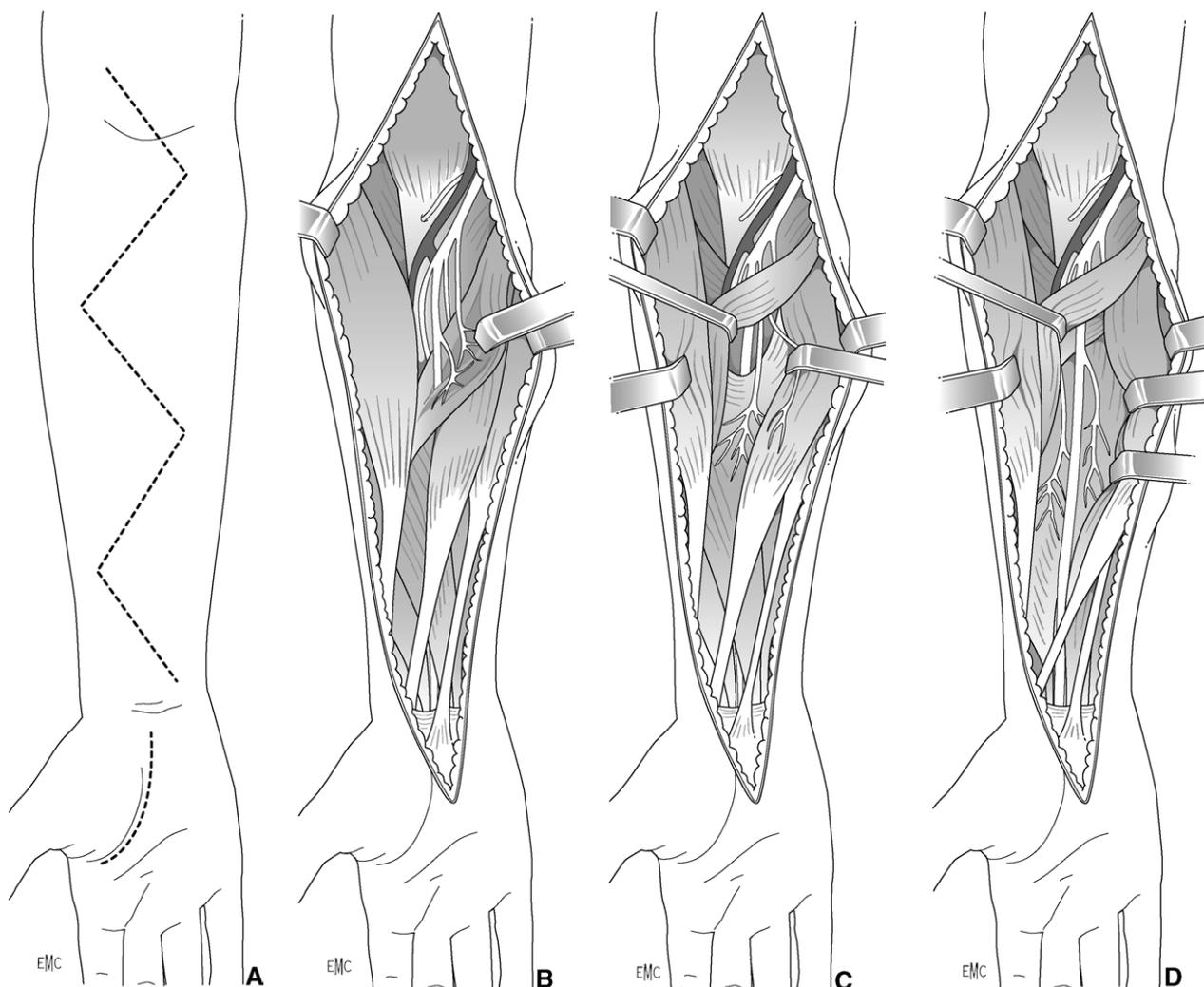


Figure 1 Hyponeurotisation sélective : G. Brunelli.

il en existe plusieurs, soit par résection de certains fascicules après dissection intrafasciculaire lorsqu'il n'existe qu'une branche. La dénervation doit alors intéresser un ou deux tiers des fascicules.

Puis, le PT est récliné en haut et en dehors pendant que le fléchisseur radial du carpe (flexor carpi radialis : FCR) est récliné en bas et en dedans, afin de voir apparaître les branches motrices du FCR et du fléchisseur superficiel des doigts (flexor digitorum superficialis : FDS) qui peuvent être alors dénervées.

Le FDS est alors écarté en dedans, permettant de découvrir les rameaux pour le fléchisseur commun profond des doigts (flexor digitorum profundus : FDP), le long fléchisseur du pouce (flexor pollicis longus : FPL) ou nerf interosseux antérieur. Puis, le FDP est écarté en dedans afin de montrer le nerf destiné au muscle carré pronateur (pronator quadratus : PQ). S'il existe une spasticité associée, intéressant les fléchisseurs profonds des 4^e et 5^e doigts, on peut associer une hyponeurotisation de la branche motrice issue du nerf ulnaire. On repère la branche motrice en exposant le nerf ulnaire au tiers supérieur de l'avant-bras en passant entre les FDS et le cubital antérieur (flexor carpi ulnaris : FCU). La branche est repérée au bord externe du nerf ulnaire, 3 à 4 cm en dessous de la gouttière épitrochléo-olécranienne.

Muscles intrinsèques spastiques

Neurectomie du nerf de l'adducteur du pouce (adductor pollicis)

L'incision est pratiquée dans le pli d'opposition du pouce. Les tendons fléchisseurs et les pédicules artérioveineux sont écartés en dehors, de façon à laisser apparaître le muscle adductor pollicis (AP) et son rameau nerveux. La branche destinée à l'adducteur peut être sectionnée lorsqu'elle est visible. Cependant, le rameau nerveux présente parfois une situation intramusculaire qui est difficilement repérable. Dans ce cas, une myoectomie peut être réalisée.

Hyponeurotisation ou neurectomie de la branche profonde du nerf ulnaire¹⁹

Incision au niveau de la loge de Guyon et se prolongeant dans la paume sur 2 cm pour exposer les différentes branches du nerf ulnaire. On expose successivement en dedans la branche motrice destinée aux hypothénariens, la branche sensitive puis la branche profonde destinée aux intrinsèques, interosseux et thénariens. Le repérage des branches est facilité par la stimulation. Suivant le cas, on

peut envisager une hyponeurotisation des trois quarts ou des quatre-cinquièmes sous microscope.

Dans le cadre de correction à visée purement hygiénique, une neurectomie simple de la branche motrice peut être réalisée.

Neurectomie des branches thénariennes du nerf médian

Lorsqu'une neurectomie des branches thénariennes du nerf médian doit être associée, l'abord permet l'ouverture du réticulum des fléchisseurs, afin de visualiser le nerf médian et son rameau thénarien.

Interventions neurochirurgicales⁴

Elles ont peu de place dans le traitement du membre supérieur spastique, si ce n'est la DREZtomie cervicale unilatérale proposée dans certaines formes sévères et douloureuses.

Elles découlent de la radiculotomie postérieure. Cette intervention, initialement proposée par Forster, est affinée en France par Gros puis Sindou, qui introduit le terme de radicellotomie et décrit la technique d'interruption des radicelles à leur pénétration médullaire, technique qui deviendra la DREZtomie, selon la terminologie anglo-saxonne (section de la zone d'entrée radicellaire dorsale).

Corriger les muscles rétractés

Muscles extrinsèques

Relâchement proximal

Aponévrotomie proximale des muscles épitrochléens^{42,43}

Cette intervention est menée par une voie transversale 5 à 6 cm au-dessous de l'épitrochlée. L'aponévrose des épitrochléens et ses cloisons sagittales sont excisées sur 2 cm. Elle permet un relâchement suffisant des fléchisseurs du carpe et des doigts dans les formes modérées chez l'enfant (Fig. 2).

Désinsertion proximale des muscles épitrochléens^{1,7,16,29,34}

Elle s'adresse aux formes plus sévères, pour lesquelles l'aponévrotomie proximale simple est insuffisante.

L'incision cutanée est antéromédiale, longitudinale, s'étendant du tiers moyen du bras jusqu'au tiers distal de l'avant-bras. Puis l'incision des apo-

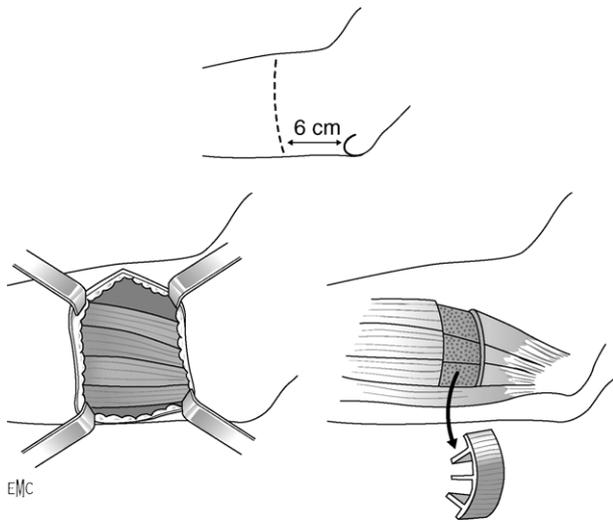


Figure 2 Aponévrotomie des épitrochléens (Zancolli).

névroses brachiale et antibrachiale est réalisée, plus en dehors que l'incision cutanée, avec un décroché horizontal au niveau du pli de flexion. Le nerf ulnaire est repéré après ouverture de la gouttière épitrochléo-olécranienne ainsi que le nerf médian dans la gouttière bicipitale médiale. Puis, les muscles épitrochléens sont progressivement libérés au bistouri et à la rugine de l'épitrochlée, du radius de l'ulna et de la membrane interosseuse où il faudra se méfier du tronc commun des artères interosseuses. L'ensemble des muscles épitrochléens est désinséré et repoussé vers la partie distale de l'avant-bras, de 4 à 5 cm. Il peut être suturé au périoste de l'ulna. Il faut vérifier que l'ouverture de la gouttière épitrochléo-olécranienne n'entraîne pas d'instabilité lors de la flexion du coude. Si c'est le cas, une transposition antérieure du nerf ulnaire est nécessaire. Une immobi-

lisation plâtrée est réalisée pour une durée de 1 mois.

En cas de rétraction isolée des fléchisseurs des doigts, la voie d'abord est la même, il convient de repérer en distal le plan entre le FDS et le FCR. On désinsère progressivement l'aponévrose interne musculaire, les fibres du FDS jusqu'à l'insertion épitrochléenne. On peut ne pas désinsérer le FCU qui est alors sectionné distalement et transposé dorsalement sur l'ECR. La désinsertion peut être associée à une section de l'insertion distale du pronator teres (PT), afin de compléter la correction de l'attitude en pronation (Fig. 3).

En cas de flessum du coude associé par rétraction, on peut traiter dans le même temps et par la même voie d'abord le flessum du coude. L'insertion distale du brachial antérieur (brachialis) est exposée, après avoir relevé les muscles épitrochléens. Une ténotomie des fibres blanches périphériques du brachial antérieur (brachialis) peut être pratiquée de même qu'un allongement en Z du tendon terminal du biceps. Seul le flessum du coude par rétraction du brachioradialis (BR) ne peut être traité par cette voie d'abord.

Allongement distal²⁴

Jonction musculotendineuse (Fig. 4A,B,C)

L'allongement des muscles fléchisseurs se fait principalement à la jonction musculotendineuse afin d'éviter les adhérences tendineuses postopératoires. Le segment intramusculaire du tendon est repéré puis celui-ci est réséqué uniquement dans la zone musculaire en conservant une continuité. Lorsque le tendon intramusculaire est réséqué, une

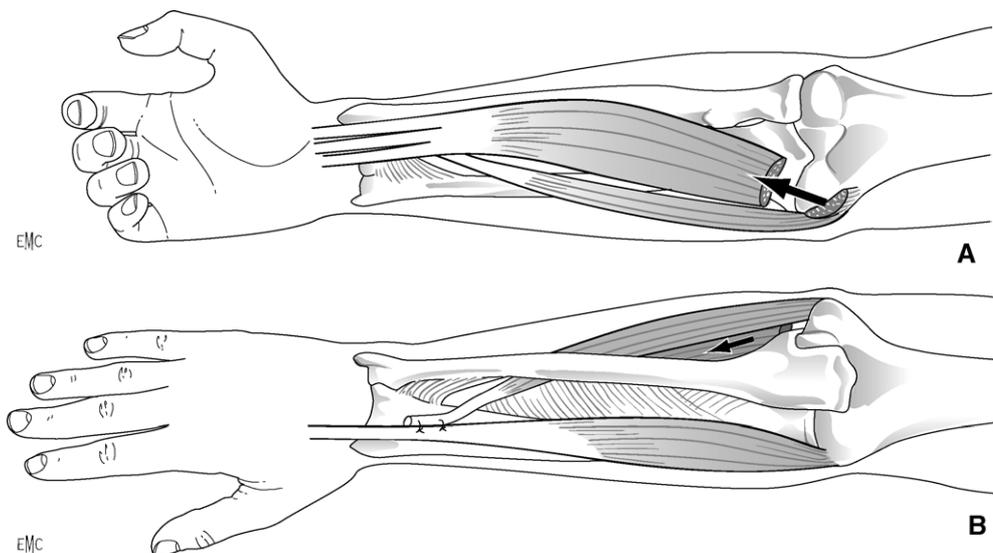


Figure 3 Intervention de Page et Green avec désinsertion des épitrochléens à l'exception du cubital antérieur (flexor carpi ulnaris [FCU]) (A) qui est transféré sur le 2^e radial (extensor carpi radialis brevis [ECRB]) à travers la membrane interosseuse (B).

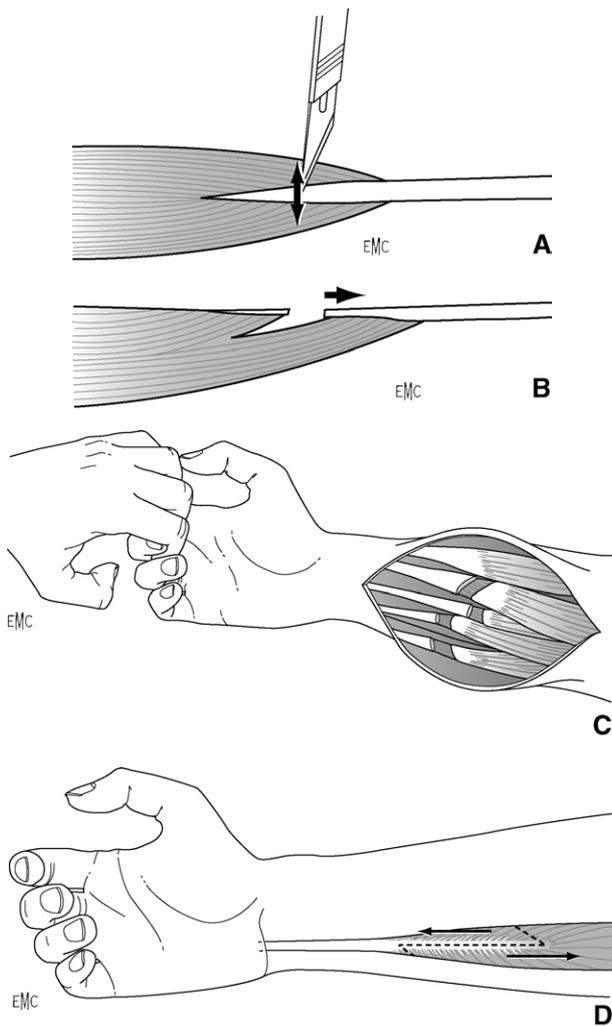


Figure 4 A,B,C. Allongement tendineux à la jonction musculotendineuse par ténotomie. D. Allongement tendineux, par plasticité en Z.

extension passive des doigts est pratiquée, afin de réaliser l'allongement intramusculaire.

Allongement intratendineux (Fig. 4D)

Lorsque la rétraction est trop importante (supérieure à 50 mm), et que ne peut être pratiqué un allongement à la jonction musculotendineuse ou une intervention de désinsertion proximale, on peut pratiquer un allongement en Z intratendineux. Les tendons rétractés sont repérés successivement, un allongement est réalisé par une ténotomie en Z. La suture se fait par un point en cadre, complété d'un surjet, le poignet et les doigts en rectitude.

Transfert flexor digitorum superficialis sur flexor digitorum profundus : intervention de Braun² (Fig. 5)

L'allongement tendineux peut aussi être réalisé en transférant les tendons des muscles fléchisseurs

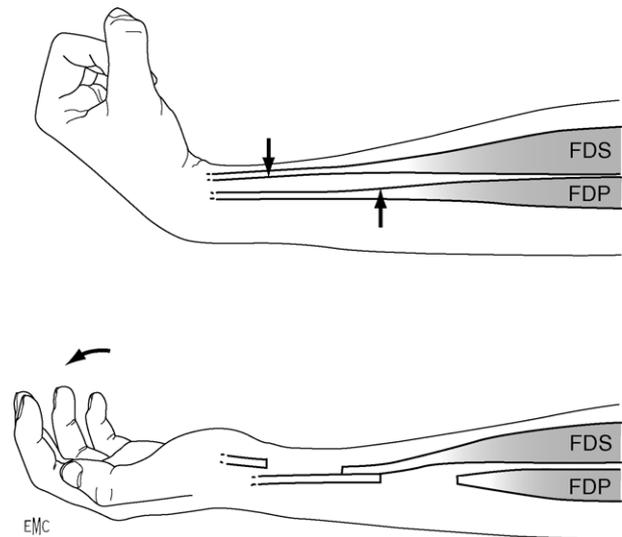


Figure 5 Intervention de Braun : transfert du flexor digitorum superficialis (FDS) (A) sur le flexor digitorum profundus (FDP) (B).

superficiels sur les fléchisseurs profonds des doigts. Les tendons des fléchisseurs profonds sont sectionnés au niveau de la partie moyenne de l'avant-bras, puis les superficiels sont sectionnés plus distalement. Une extension passive des doigts est réalisée en mobilisant les superficiels par rapport aux tendons des fléchisseurs profonds. L'extrémité proximale des tendons des FDS est alors suturée à l'extrémité distale des tendons du FDP.

Muscles intrinsèques

Chaînes digitales

Relâchement proximal des intrinsèques^{42-44,46} (cols de cygnes intrinsèques avec flexion des métacarpophalangiennes)

L'incision est longitudinale dans les vallées des métacarpiens, permettant d'accéder aux interosseux radiaux et ulnaires des articulations adjacentes. Une dissection simple permet de mettre en évidence la dossière des interosseux avec la réunion des tendons interosseux palmaires et dorsaux qui doivent être libérés jusqu'à visualiser la terminaison des corps musculaires. Ceux-ci sont sectionnés et réséqués en aval de la dossière qui doit être conservée afin de ne pas déstabiliser l'appareil extenseur. La mobilisation des doigts doit être immédiate afin d'éviter une cicatrisation tendineuse précoce (Fig. 6).

Relâchement distal des intrinsèques^{21,22}

Isolée, cette intervention s'adresse aux formes légères avec hyperextension réductible de l'interphalangienne proximale (IPP) et sans déformation

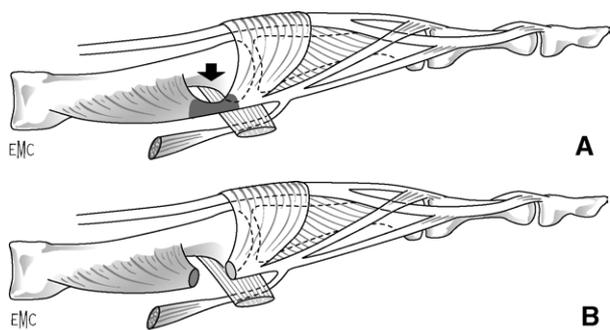


Figure 6 A,B. Relâchement des intrinsèques au niveau proximal (Zancolli) (in Revol).

en flexion de la MP. Elle est conduite par voie latérale digitale. Un brochage provisoire de l'IPP ou une orthèse limitant son extension à -20° est mise en place pour 4 semaines en postopératoire (Fig. 7).

Section distale des bandelettes des interosseux (hyperextension de l'interphalangienne distale) par rétraction des bandelettes distales)

La correction de l'hyperextension de l'interphalangienne distale (IPD), après section sur P2 du système extenseur, doit être complétée par un brochage de l'IPD durant 4 semaines.

Pouce

On effectue la désinsertion proximale des thénariens et du 1^{er} dorsal :²⁵

- le court fléchisseur, opposant, court adducteur ;
- l'adducteur et l'interosseux du 1^{er} dorsal (Fig. 8).

La désinsertion des muscles thénariens est réalisée par voie palmaire, l'incision se trouvant dans le pli d'opposition du pouce. Après avoir ouvert l'aponévrose palmaire, les tendons fléchisseurs et l'arcade palmaire sont réclinés en dedans de façon à laisser apparaître l'AP, le court fléchisseur (flexor pollicis brevis : FPB) et le court abducteur (abductor pollicis brevis : APB). Ceux-ci sont désinsérés du ligament annulaire antérieur (retinaculum flexorum : RF), du 2^e et 3^e métacarpien et des os du carpe. Il

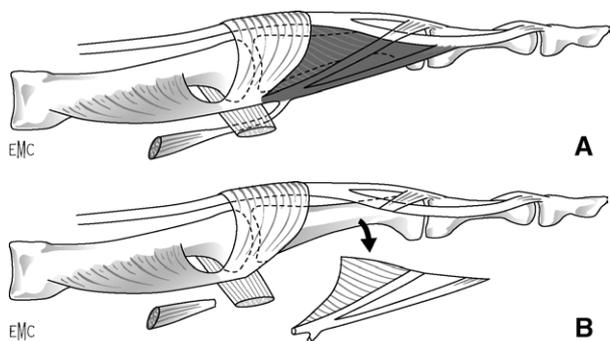


Figure 7 A,B. Relâchement des intrinsèques au niveau distal d'après Zancolli (in Revol).

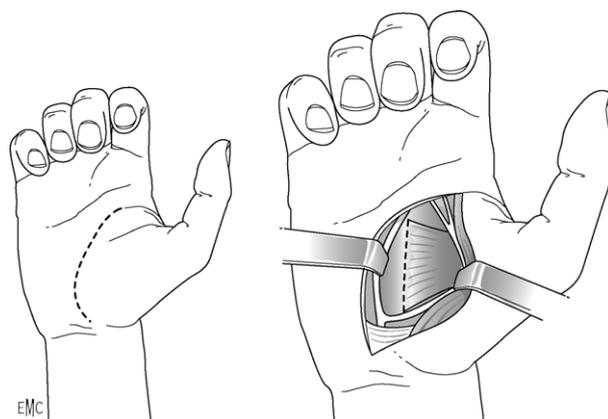


Figure 8 Pouce spastique intrinsèque. Opération de Matev : désinsertion de l'adducteur du pouce du 3^e métacarpien par voie palmaire.

faut se méfier de la branche profonde du nerf ulnaire qui ne doit pas être lésé lors de la désinsertion de l'adducteur. L'ouverture distale du RF est possible, afin de diminuer la traction des muscles thénariens.

Enfin, par ce même abord, la désinsertion du 1^{er} interosseux dorsal sur le 1^{er} métacarpien est possible.

Renforcer ou suppléer l'action des muscles antagonistes : transferts tendineux

Le relâchement des agonistes spastiques doit être complété, pour être pérennisé, par le rétablissement des antagonistes.

Antagonistes présents

Les antagonistes peuvent être présents mais ils sont détendus ou « masqués » ; ils peuvent être révélés et renforcés par la rééducation après traitement de la spasticité. Dans certains cas, les déformations les empêchaient de s'exprimer (luxation des extenseurs dans les vallées intermétacarpiennes, par exemple).

Transferts tendineux

Lorsque les antagonistes sont paralysés, il faut faire appel aux transferts tendineux.⁵

Dans le cadre des mains déficitaires d'origine centrale, on peut réaliser des transferts tendineux, les muscles transférables devant avoir une force musculaire cotée au moins à 4 mais surtout devant se contracter lors des mouvements recherchés. L'évaluation, difficile cliniquement, peut être complétée par l'électromyogramme dynamique.

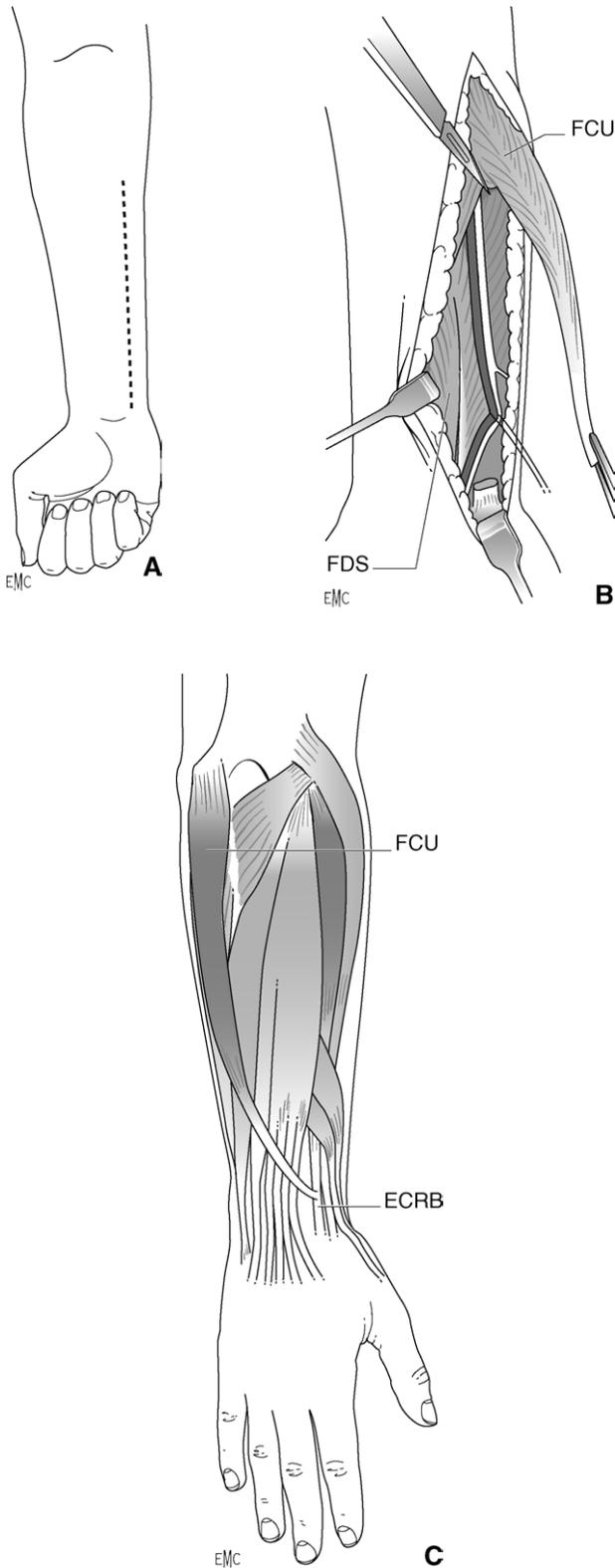


Figure 9 A,B,C. Transfert du flexor carpi ulnaris (FCU) sur l'extensor carpi radialis brevis - (ECRB) (Green).

Transfert du flexor carpi ulnaris sur l'extensor carpi radialis brevis (Fig. 9)^{9,10}

Indications

Les radiaux doivent être totalement paralysés et non pas masqués, pour éviter un risque d'hypercorrection. Le relâchement des agonistes spastiques doit être complet. La radiocarpienne doit être stable. Le FCU doit être coté au moins à 4 et synergique de l'extension du poignet. Le flexor carpi ulnaris, transféré autour du cubitus, et non à travers la membrane interosseuse, a une action supinatrice.

L'incision est réalisée sur la face antérieure et médiale de l'avant-bras s'étendant sur les deux tiers distaux. Le nerf ulnaire et sa branche dorsale sont protégés et le fléchisseur ulnaire du carpe est sectionné à son insertion sur le pisiforme puis isolé jusqu'au tiers supérieur de l'avant-bras. Une incision dorsale, longitudinale, est réalisée, permettant de récupérer le fléchisseur ulnaire du carpe. Le tendon est transféré soit à travers la membrane interosseuse lorsque seul un mouvement de réanimation de la flexion dorsale est recherché, soit transféré au bord interne du cubitus en sous-cutané, lorsqu'un mouvement de flexion dorsale et de supination est recherché. Puis, le tendon est suturé en amont du rétinaculum des extenseurs sur le tendon de l'ECRB. La tension du transfert doit permettre d'obtenir une extension de 20° du poignet.

Une attelle brachio-antibrachio-palmaire est réalisée coude fléchi à 90°, poignet en supination, en extension de 20° pour une durée de 1 mois en permanence. Puis la rééducation est entreprise, le membre supérieur est remis en attelle en dehors des séances jusqu'à une forte contraction du transfert (en moyenne 2 semaines supplémentaires). Enfin, une attelle d'extension du poignet est portée, pendant environ 3 mois, selon la rapidité d'installation de la fonction du transfert.

Transfert du flexor carpi ulnaris sur l'extenseur commun des doigts (extensor digitorum communis) (Fig. 10)^{13,14}

Le FCU peut aussi être transposé sur l'extenseur commun des doigts (extensor digitorum communis [EDC]). La technique de prélèvement est identique au transfert sur le court extenseur du carpe. Le trajet du tendon contourne le bord ulnaire de l'avant-bras ou traverse la membrane interosseuse. Cependant, ce dernier trajet est source d'adhérences importantes et ne permet pas de donner une action supinatrice au transfert. L'anastomose se fait en amont du rétinaculum des extenseurs, le tendon du fléchisseur ulnaire étant passé au travers des tendons des extenseurs des doigts. Enfin, la suture est pratiquée en supination de l'avant-bras.

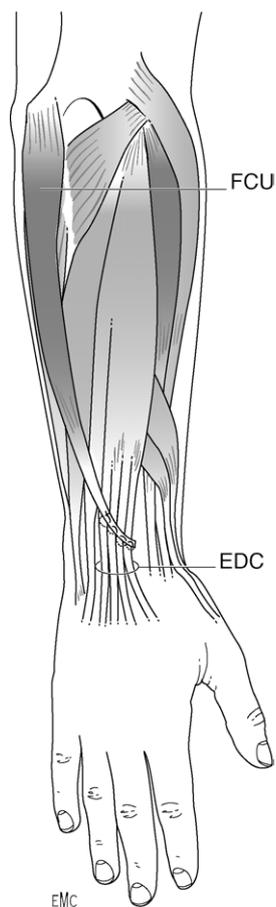


Figure 10 Transfert du flexor carpi ulnaris (FCU) sur l'extensor digitorum communis (Hoffer).

Transfert « abducteur » du long fléchisseur propre du pouce (flexor pollicis longus)³²

Une incision latérale sur le bord radial du pouce est pratiquée, permettant d'exposer l'articulation interphalangienne et l'insertion du tendon du flexor pollicis longus (FPL). Une seconde incision est pratiquée le long du tendon du FCR, permettant de récupérer le tendon du FPL. Le tendon est alors sectionné à la partie moyenne de la 1^{re} phalange, de façon à pouvoir réaliser une ténodèse du moignon distal (chez l'enfant) ou une arthrodèse (chez l'adulte). L'extrémité distale est récupérée au poignet et passée en sous-cutané puis réinsérée sur la face latérale de la 1^{re} phalange. Le tendon du FPL a ainsi un trajet abducteur.

Transfert du brachioradialis sur l'abductor pollicis longus²⁶

L'incision est longitudinale, centrée sur le 1^{er} compartiment et s'étendant jusqu'à la partie proximale de l'avant-bras. Les branches superficielles du nerf radial sont repérées, puis les tendons de l'abductor pollicis longus (APL) et du court extenseur du pouce (extensor pollicis brevis : EPB) sont identifiés. Le

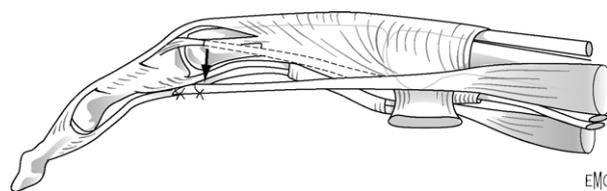


Figure 11 Traitement de la déformation en « col de cygne » de la main spastique par transfert des muscles intrinsèques sur le flexor communis superficialis (FCS) (J. Gousheh).

tendon du brachioradialis (BR) est alors détaché de la styloïde radiale au ras de l'os afin de conserver le maximum de longueur puis il est détaché par sa face profonde en remontant jusqu'à son insertion proximale afin d'augmenter sa course de glissement. Son tendon est alors faufile dans les tendons des muscles APL et EPB. La tension doit être telle qu'il existe une abduction spontanée du pouce, car la course du muscle BR est faible et qu'il ne faut pas compter sur une grande amplitude lors de sa contraction. L'immobilisation se fait pouce en abduction pour une durée de 1 mois dans une attelle brachio-antibrachio palmaire.

Transfert des muscles interosseux (interossei palmaires et dorsales) (Fig. 11)¹⁸

Pour corriger la déformation en « col de cygne » due à la spasticité des muscles interosseux, on aura recours au transfert des muscles interosseux sur le FDS (correction par extension de l'IPP).⁸

L'incision est latérale, sur la face radiale des doigts III, IV et V, et sur la face ulnaire du II, étendue jusqu'à la commissure afin de repérer la dossière des interosseux. Les tendons interosseux et lombricaux sont disséqués en proximal jusqu'à visualiser le corps musculaire afin de le libérer. Puis, le tendon est sectionné à son insertion distale sur l'appareil extenseur, il est alors transféré et fixé solidement sur la bandelette du fléchisseur superficiel. La tension doit être suffisante afin d'obtenir une flexion de 15° de l'interphalangienne proximale (IPP). Si le patient contrôle correctement sa main, une rééducation précoce peut être débutée, dans le cas contraire, une attelle en flexion de 15° de l'interphalangienne proximale est placée pour 3 semaines.

Stabilisation articulaire

Poignet

Réssection de la première rangée^{28,39}

Indications

Elle est indiquée en cas de flexion fixée importante du poignet non corrigée par le relâchement des

fléchisseurs. La radiocarpienne doit être stable, sans déformations des os de la première rangée (séquelles de l'hémiplégie cérébrale infantile vues à l'âge adulte où il existe une déformation des os lors de la croissance).

L'incision est dorsale, elle se fait légèrement en dehors du tubercule de Lister, avec un décroché au niveau du pli de flexion du poignet. Puis, on isole les bords supérieur et inférieur du rétinaculum dorsal des extenseurs. Celui-ci est ouvert longitudinalement entre le 4^e et le 5^e compartiment. Les extenseurs des doigts longs sont alors réclinés en dedans. Le nerf interosseux postérieur est réséqué de principe en amont de la branche destinée à l'articulation radio-ulnaire distale. Puis, la capsule radiocarpienne est ouverte longitudinalement et décollée de part et d'autre, de façon à obtenir deux lambeaux capsulaires. L'aspect du cartilage de la surface articulaire du radius et du carpe est alors apprécié. Dans le cadre de l'étiologie neurologique, la résection peut débuter par le lunatum, après traction et flexion du poignet. Le lunatum est scindé en deux prudemment à l'aide de ciseaux à frapper afin de faciliter son extraction. Puis les fragments sont réséqués en sectionnant les attaches caspuloligamentaires au bistouri. L'utilisation d'une pince à champs peut s'avérer utile pour permettre une traction des os à réséquer. Après l'extraction du lunatum, le triquetrum et le sca-phoïde sont réséqués. Ce dernier est souvent plus difficile à retirer et une fragmentation est souvent nécessaire. Après un lavage destiné à éliminer les débris osseux et hémostase, un drain est placé dans l'articulation puis la capsule et le rétinaculum dorsal sont refermés soigneusement. Une attelle antalgique est posée pour 10 jours, suivie d'une rééducation active.

Arthrodèse du poignet^{12,33}

Préférée par certains auteurs, elle a l'avantage d'obtenir une correction définitive sans risque de récurrence. Elle nécessite un relâchement important des agonistes.

La voie d'abord de l'arthrodèse est similaire à celle d'une résection de la 1^{re} rangée des os du carpe. Les différents interlignes radiocarpiaux et médiocarpiaux sont avivés, la tête ulnaire est réséquée juste au niveau du col afin d'éviter une instabilité du moignon ulnaire et est utilisée pour combler les interlignes. La synthèse est confiée à une plaque postérieure suffisamment épaisse, chantournée à 10° d'extension, s'étendant du 3^e métacarpien jusqu'à la partie moyenne du radius. D'autres techniques peuvent être utilisées, comme

l'utilisation d'un greffon corticospongieux apposé et fixé par vis.

Résection de la 1^{re} rangée et arthrodèse raccourcissante du poignet par enchevillement du grand os et du radius (Fig. 12)

Indications

Elle permet le relâchement des agonistes et complète celui de leur désinsertion. Elle peut être utilisée en cas de récurrence de la déformation après résection simple de la première rangée des os du carpe.

La surface articulaire inférieure du radius est creusée d'une loge où est impactée en force la tête du grand os, qui est aussi avivé sur son revêtement cartilagineux. L'os spongieux recueilli lors du creusement de la loge radiale et de la tête ulnaire réséquée est tassé dans les interstices. Une ostéosynthèse stable par broches et hauban ou plaque fixe le poignet à 15-20° d'extension. Le montage, très solide, permet de réduire l'immobilisation du poignet à 5 semaines maximum.

Ténodèse des radiaux sur le radius

Indications

Elle nécessite une articulation radiocarpienne stable et est préférée par certains auteurs²⁰ à l'arthrodèse car elle stabilise le poignet en bonne position tout en permettant une mobilité passive. Son risque est la récurrence de la déformation en flexion.

Pour la voie d'abord dorsale au quart inférieur de l'avant-bras avec incision médiane longitudinale, on isole les radiaux (extensor carpi radialis longus

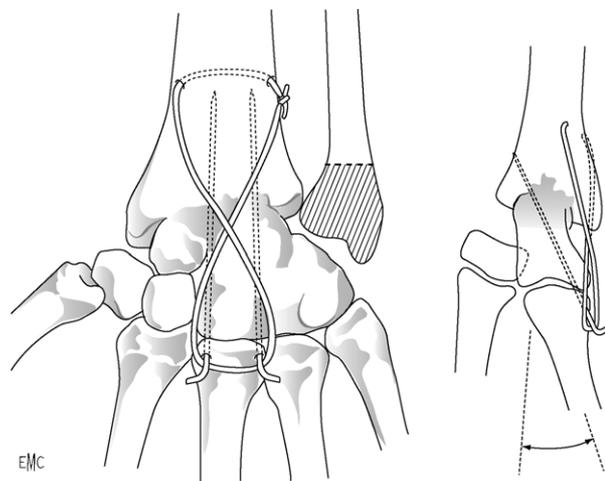


Figure 12 Arthrodèse raccourcissante du poignet par enchevillement grand os-radius après résection de la première rangée des os du carpe.

et brevis [ECRL et ECRB]) au bord externe de l'incision sous le long extenseur du pouce (EPL). Puis on pratique une ouverture large de la gaine du 2^e radial pour faciliter sa translation interne, puis une ténotomie proximale du tendon du 2^e radial, 2 cm après la jonction musculotendineuse. Ensuite on réalise un tunnel transosseux à la face postérieure du radius, les deux points étant séparés d'environ 1,5 cm, afin de conserver un pont osseux suffisant. On assure le passage du tendon de bas en haut dans le tunnel transosseux. On place le poignet en flexion dorsale à 15°.

Chaînes digitales

Correction de la déformation en « col de cygne »

Elle est effectuée par ténodèse d'une bandelette du FCS sur la phalange proximale, limitant l'extension de l'IPP et la fixant en légère flexion (15 à 20°) (Fig. 13).^{35,36}

La fixation de la bandelette du FCS peut être facilitée pour sa fixation transosseuse grâce à une ancre Mitek.

Ténodèse des extenseurs des doigts (extensor digitorum)

Pour éviter la chute de chaînes digitales en cas de paralysie des extenseurs, on peut fixer l'extrémité

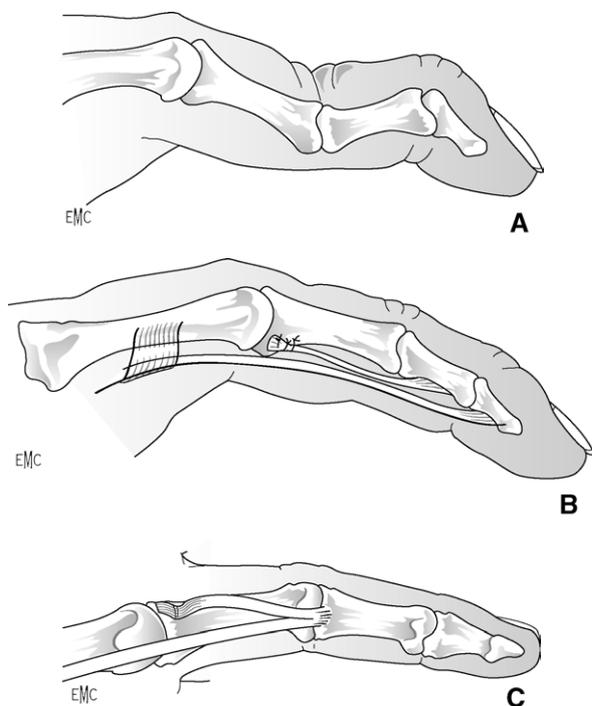


Figure 13A,B Déformation des doigts en « col de cygne ». Ténodèse d'une bandelette FDS sur la phalange proximale (A. Swanson). C. Déformation des doigts en col de cygne. La fixation d'une bandelette du FCS sur la phalange proximale peut utiliser une ancre Mitek.

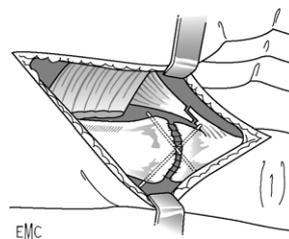


Figure 14 Arthrodesè de la métacarpophalangienne (MCP).

proximale des extenseurs sectionnés sur le ligament annulaire dorsal du carpe.

Pouce

Arthrodesè métacarpophalangienne du pouce⁶

La voie d'abord est dorsale, longitudinale, centrée sur l'articulation métacarpophalangienne. Cet abord permet la libération des rétractions musculotendineuses par la désinsertion métacarpienne du muscle 1^{er} interosseux dorsal et la section ou l'allongement du tendon de l'adducteur du pouce. Puis, le tendon court extenseur est ouvert longitudinalement ou transversalement. La résection osseuse doit être minimale pour ne pas raccourcir la colonne du pouce de façon trop importante. Lorsque les surfaces sont avivées, deux broches en croix sont placées en va-et-vient. La position de l'arthrodèse doit être en flexion de 10 à 20°, en pronation de 10°. Ensuite, on immobilise par attelle commissurale durant 6 à 8 semaines (Fig. 14).

Arthrodesè de l'interphalangienne

L'arthrodèse de l'interphalangienne peut être réalisée avec la même technique. Cependant, une voie d'abord cutanée en H peut être réalisée afin de ne pas léser la matrice unguéale. De plus, la position de l'arthrodèse doit être axée, sans rotation ni flexion ni varus ou valgus. L'ostéosynthèse par une broche axiale et une broche oblique est plus facilement réalisable.

Ouverture de la 1^{re} commissure par plicature de l'abductor pollicis longus^{24,25}

La fermeture de la 1^{re} commissure due à la spasticité ou rétraction des adducteurs du pouce doit être préalablement corrigée par désinsertion de ceux-ci. Elle doit ensuite être maintenue ouverte par transferts tendineux sur l'APL ou, plus simplement, par plicature de l'APL (Fig. 15).

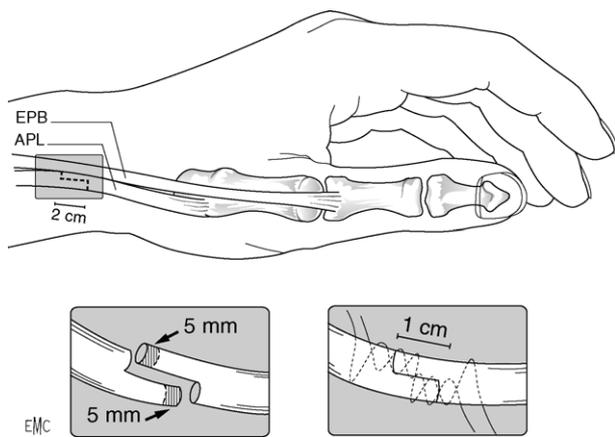


Figure 15 Plicature de l'abductor pollicis longus (Matev).

Regroupement des différentes techniques chirurgicales

L'affaiblissement des agonistes et le renforcement des antagonistes peuvent être effectués en deux (ou plusieurs temps) ou en un temps lors de la même opération. La conduite chirurgicale est choisie de façon éclectique après un examen analytique précis, chaque cas étant un cas particulier.

Nous donnons deux exemples de traitement en un temps.

- chirurgie en un temps associant affaiblissement des muscles spastiques par aponévrotomie et renforcement des antagonistes par transferts tendineux, d'après Zancolli (Fig. 16) ;
- traitement du pouce spastique extrinsèque par :
 - allongement du FPC ;
 - transfert du brachioradialis sur le FPC ;
 - translocation de l'EPL du 3^e compartiment au 1^{er} compartiment ;

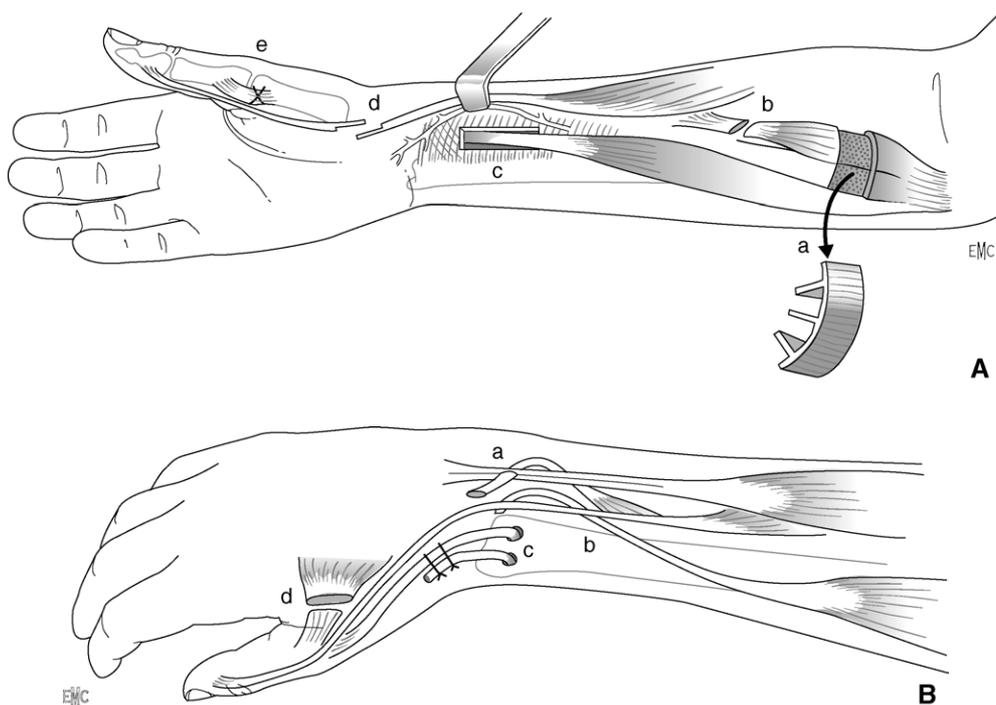


Figure 16 Chirurgie en 1 temps associant affaiblissement des muscles spastiques par aponévrotomie et ténotomie et renforcement des antagonistes par transferts tendineux (Zancolli). A. a. Libération aponévrotique au niveau des muscles épicondyliens. La continuité de la plupart des fibres musculaires est respectée. Les septa sont excisés en totalité. Cette technique est utilisée dans les cas où la spasticité est modérée. b. Ténotomie du tendon terminal du rond pronateur, indiquée quand il existe plus de 20° de rétraction en pronation. c. Transfert du cubital antérieur (FCU) sur le 2^e radial, à travers la membrane interosseuse, au bord proximal du muscle carré pronateur. d. Allongement du tendon du long fléchisseur du pouce (FPL) à la partie distale de l'avant-bras dans les déformations du pouce en flexus-adductus. e. Capsuloplastie métacarpophalangienne dans les cas d'hyper-extension passive supérieure à 20°. Ce geste chirurgical améliore la pince. B. a. Fixation du tendon du cubital antérieur au 2^e radial. Il faut éviter une tension excessive. Le poignet doit rester à 20° de flexion dorsale après la suture tendineuse. b. Déroutage du long extenseur du pouce au bord radial du poignet et transfert du long supinateur (b) dans les déformations du pouce en flexus-adductus et dans les cas où l'évaluation préopératoire montre un long extenseur totalement paralysé. c. Ténodèse d'abduction à l'aide d'une bandelette du long abducteur du pouce (APL). d. Ténotomie de l'insertion distale de l'abducteur du pouce dans les rétractions en adductus et en flexus-adductus du pouce.

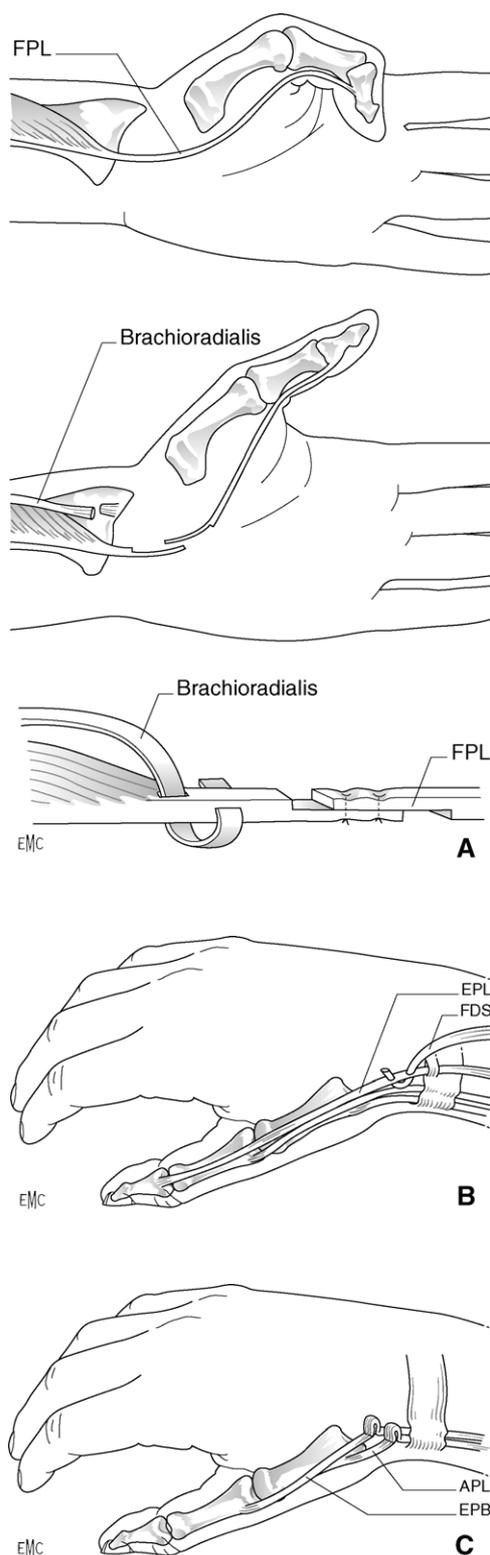


Figure 17 Traitement du pouce spastique extrinsèque. A. Allongement du flexor pollicis ploncus (FPL) et transfert du brachioradialis. B. Translocation de l'extensor pollicis longus (EPL) dans le 1^{er} compartiment : transfert du flexor digitorum superficialis (FDS) sur EPL. C. Ténodèse de l'extensor pollicis brevis (EPB) et de l'abductor pollicis longus (APL).

- transfert du FPS sur l'EPL ;
- ténodèse de l'APL ; et de l'EPL (Fig. 17).

Références

1. Braun RM, Mooney V, Nickel V. Flexor origin release for pronation-flexion deformity of the forearm and hand in the stroke patient. *J Bone Joint Surg Am* 1970;52:907-20.
2. Braun RM, Vise GT, Roper B. Preliminary experience with superficialis to profundus tendon transfers in the hemiplegic upper extremity. *J Bone Joint Surg Am* 1974;56:466-72.
3. Brunelli G, Brunelli F. Hyponeurotisation sélective microchirurgicale dans les paralysies spastiques. *Ann Chir Main* 1983;2:277-80.
4. Frèrebeau P. Traitement neurochirurgical. Neurochirurgie et spasticité. *La spasticité*. Paris: Masson; 2001. p. 158-63.
5. Goldner J. Upper extremity tendon transfers in cerebral palsy. *Orthop Clin North Am* 1974;5:389-414.
6. Goldner J, Koman L, Gelberman R, Levin S, Goldner R. Arthrodesis of the metacarpophalangeal joint of the thumb in children and adults. *Clin Orthop* 1990;253:75-89.
7. Gosset J. La désinsertion chirurgicale des muscles de la loge antérieure de l'avant-bras dans le traitement des contractures et rétractions ischémiques. *Sem Hop Paris* 1956;32:509-15.
8. Gousheh J, Mafi P. A new active transfer for the treatment of spastic swan-neck finger deformity. *La Main* 1997;2:19-24.
9. Green WT, Banks H. Flexor carpi ulnaris transplant and its use in cerebral palsy. *J Bone Joint Surg Am* 1962;44:1343-52.
10. Green WT. Tendon transplant of the flexor carpi ulnaris for pronation flexion deformity of the wrist. *Surg Gynecol Obstet* 1942;75:337-42.
11. Gschwind C, Tonkin M. Surgery for cerebral palsy: Part 1. Classification and operative procedures for pronation deformity. *J Hand Surg [Br]* 1992;17:391-5.
12. Hargreaves D, Warwick D, Tonkin M. Changes in hand function following wrist arthrodesis in cerebral palsy. *J Hand Surg [Br]* 2000;25:193-4.
13. Hoffer MM. Cerebral palsy. in: Green DP editor, *Operative hand surgery*. New York: Churchill Livingstone; 1993. p. 215-23.
14. Hoffer MM, Lehman M, Mitani M. Long term follow-up on tendon transfers to the extensors of the wrist and fingers in patients with cerebral palsy. *J Hand Surg [Am]* 1986;11:836-40.
15. House JH, Gwathmey FW, Fidler MO. A dynamic approach to the thumb-in-palm deformity in cerebral palsy. *J Bone Joint Surg Am* 1981;63:216-25.
16. Inglis AE, Cooper W. Release of the flexor-pronator origin for flexion deformities of the hand and wrist in spastic paralysis. A study of eighteen cases. *J Bone Joint Surg Am* 1966;48:847-57.
17. Iselin F. Indications chirurgicales dans le traitement de la main spastique. *Ann Chir Main* 1986;5:74-84.
18. Keenan MA, Kauffman DL, Garland DE, Smith CW. Ulnar neuropathy in the brain injured adult. *J Hand Surg [Am]* 1988;13:120-4.
19. Keenan MA, Todderud EP, Henderson R, Botte MJ. Management of intrinsic spasticity in the hand with phenol injection or neurectomy of the motor branch of the ulnar nerve. *J Hand Surg [Am]* 1987;12:734-9.

20. Kiefer C, Denormandie P, Laffont I, Denys P, Judet T, Bussel B. Traitement orthopédique et membre supérieur du cérébro-lésé. *La spasticité*. Paris: Masson; 2001. p. 175-83.
21. Littler JW. Principles of reconstructive surgery of the hand. in: Converse JM editor, *Reconstructive plastic surgery*. Philadelphia: WB Saunders; 1964. p. 1624-30.
22. Littler JW. The finger extensor mechanism. *Surg Clin North Am* 1967;47:415-32.
23. Manske PR. Cerebral palsy of the upper extremity. *Hand Clin* 1990;6:697-709.
24. Matev I. Chirurgie de la main spastique. *Chirurgie de la main*. Paris: Masson; 1991.
25. Matev I. Surgery of the spastic thumb-in-palm deformity. *J Hand Surg [Br]* 1991;16:127-32.
26. McCue F, Honner R, Chapman W. Transfer of the brachioradialis for hand deformed by cerebral palsy. *J Bone Joint Surg Am* 1970;52:1171-80.
27. Nylander G, Carlström C, Adolfsson L. 4.5 year follow-up after surgical correction of upper extremity deformities in spastic cerebral palsy. *J Hand Surg [Br]* 1999;24:719-23.
28. Omer G, Capen D. Proximal bone carpectomy with muscle transfers for spastic paralysis. *J Hand Surg [Am]* 1976;1:197-204.
29. Page C. An operation for the relief of flexion-contracture in the forearm. *J Bone Joint Hand Surg* 1923;5:233-4.
30. Pomerance JF, Keenan MA. Correction of severe spastic flexion contractures in the non-functional hand. *J Hand Surg [Am]* 1996;21:828-33.
31. Romain M, Benaim C, Allieu Y, Pelissier J, Chammas M. Assessment of hand after brain damage with the aim of functional surgery. *Ann Chir Main* 1999;18:28-37.
32. Smith RJ. Flexor pollicis longus abductor-plasty for spastic thumb-in-palm deformity. *J Hand Surg [Am]* 1982;7:327-34.
33. Sorial R, Tonkin M, Gschwind C. Wrist arthrodesis using a sliding radial graft and plate fixation. *J Hand Surg [Br]* 1994;19:217-20.
34. Swanson A. Surgery of the hand in cerebral palsy and muscle origin release procedures. *Surg Clin North Am* 1968;48:1129-38.
35. Swanson A. Treatment of the swan neck deformity in cerebral palsied hand. *J Bone Joint Surg Am* 1966;48:167-71.
36. Swanson A. Surgery of the hand in cerebral palsy and the swan neck deformity. *J Bone Joint Surg Am* 1960;42:951-64.
37. Tachdjian M, Minear W. Sensory disturbances in the hands of children with cerebral palsy. *J Bone Joint Surg Am* 1958;40:85-6.
38. Tonkin M. Thumb deformity in the spastic hand: classification and surgical techniques. *Tech Hand Upper Extrem Surg* 2003;7:18-25.
39. Tonkin M, Gschwind C. Surgery for cerebral palsy. Part 2: flexion deformity of the wrist and fingers. *J Hand Surg [Br]* 1992;17:396-400.
40. Tonkin M, Hatrick NC, Eckersley JR, Couzens G. Surgery for cerebral palsy Part 3: classification and operative procedures for thumb deformity. *J Hand Surg [Br]* 2001;26:465-70.
41. Van Heest AE, House JH, Cariello C. Upper extremity surgical treatment of cerebral palsy. *J Hand Surg [Am]* 1999;24:323-30.
42. Zancolli EA, Zancolli Jr. ER. Surgical management of the hemiplegic spastic hand in cerebral palsy. *Surg Clin North Am* 1981;61:395-406.
43. Zancolli EA, Zancolli Jr. ER. Indications opératoires et traitement de la main spastique infantile. *Ann Chir Main* 1984;3:66-75.
44. Zancolli EA. *Structural and dynamic bases of hand surgery*. Philadelphia: JB Lippincott; 1979. p. 262-83.
45. Zancolli EA, Goldner LJ, Swanson AB. Surgery of the spastic hand in cerebral palsy: report of the committee on spastic hand evaluation. *J Hand Surg [Am]* 1983;8(5Pt2):766-72.
46. Zancolli EA, Zancolli Jr ER. *The paralysed hand*. Edinburgh: Churchill Livingstone; 1987. p. 163-5.

Available online at www.sciencedirect.com

