

Mémoire présenté pour l'obtention du

Diplôme Inter-Universitaire Européen de

Rééducation et d'Appareillage en Chirurgie de la Main

Université Grenoble Alpes

Session 2019-2021



Le Dart Throwing Motion et sa place dans la rééducation de la main

Illustration **Léonard De Vinci**

Membres du Jury :

Professeur CAMUS Emmanuel

Docteur FORLI Alexandra

Monsieur GERLAC Denis

Professeur MOUTET François

Monsieur THOMAS Dominique

Cyrielle Deruy

Masseur-kinésithérapeute
Valleiry -Haute Savoie-

Remerciements

Je tiens à remercier le Docteur Alexandra Forli, Monsieur Denis Gerlac et le Professeur François Moutet et tous les intervenants de ce DIU pour leur enseignement riche, passionnant et passionné. Merci d'avoir adapté et organisé au mieux cette formation lors de cette année si particulière.

Merci à tous les maitres de stage pour leur accueil chaleureux et leur partage des connaissances. Leur compagnonnage au quotidien est précieux.

Merci à Claude Lelardic pour ses précieux conseils.

Merci à Florence pour ses bonnes ondes encourageantes, son écoute bienveillante et son regard extérieur, curieux de néophyte.

Merci à Caro pour son regard d'experte et le temps passé à comprendre une pratique bien éloignée de la sienne.

Merci à ma famille et mes collègues qui me soutiennent au quotidien.

Et surtout, merci à Luc, Alexie et Lise mes rayons de soleil.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Remerciements | 2 |
| Table des illustrations..... | 5 |
| Tableaux | 6 |
| Liste des abréviations | 7 |
| Introduction | 8 |
| A. Description anatomique..... | 9 |
| 1.Arthrologie..... | 9 |
| 2.Système ligamentaire..... | 11 |
| 2.1 Les ligaments extrinsèques | 11 |
| 2.2 Les ligaments intrinsèques | 13 |
| 2.3 Les ligaments interosseux | 14 |
| 3.Anatomie fonctionnelle | 15 |
| 3.1 Amplitudes..... | 15 |
| 3.2 La stabilité du poignet..... | 18 |
| 3.3 Dynamique du carpe | 19 |
| B. Le Dart Throwing Motion | 25 |
| 1.Le mouvement | 25 |
| 2. Axe et plan du mouvement..... | 26 |
| 3.Cinématique des rangées du carpe lors du DTM..... | 28 |

| | |
|---|----|
| 4.Evaluation clinique | 29 |
| 5.Muscles moteurs du DTM | 30 |
| 6.Discussion autour du ligament scapho lunaire | 31 |
| C. Rééducation avec et dans le DTM | 33 |
| 1.La mobilité avec le DTM..... | 33 |
| 1.1. Mobilisation manuelle | 33 |
| 1.2. Mobilisation mécanique..... | 34 |
| 1.3. Autorééducation par la mobilisation active | 35 |
| 2.La stabilité dans le DTM | 36 |
| 2.1. Stabilité statique..... | 37 |
| 2.2. Stabilité dynamique | 39 |
| 3.Pratique en rééducation | 44 |
| Discussion | 50 |
| Conclusion..... | 51 |
| Références bibliographiques | 52 |
| Annexe 1 : SLAC wrist | 57 |
| Annexe 2 : Schémas du membre supérieur en PNF | 57 |
| Annexe 2 : La thérapie miroir | 59 |

Table des illustrations

| | |
|--|----|
| Figure 1 : le carpe..... | 9 |
| Figure 2 : le système ligamentaire extrinsèque | 12 |
| Figure 3 : le ligament scapho lunaire | 14 |
| Figure 4 : les mouvements du poignet..... | 15 |
| Figure 5 : cohérences fonctionnelles du carpe transversale et longitudinale..... | 17 |
| Figure 6 : stabilité plan sagittal | 18 |
| Figure 7 : stabilité plan frontal | 18 |
| Figure 8 : variation de la distance utile selon la position du scaphoïde | 19 |
| Figure 9 : position du trapèze lors du mouvement | 20 |
| Figure 10 : position du lunatum lors du mouvement..... | 20 |
| Figure 11 : position du lunatum | 21 |
| Figure 12 : mouvements relatifs du scaphoïde et du lunatum | 21 |
| Figure 13 : position DISI..... | 22 |
| Figure 14 : position du lunatum si rupture ligamentaire | 22 |
| Figure 15 : mouvement des rangées proximale et distale lors des inclinaisons | 23 |
| Figure 16 : les axes obliques selon Henke..... | 24 |
| Figure 17 : le DTM et ses composantes | 25 |
| Figure 18 : orientation de l'axe du DTM..... | 27 |
| Figure 19 : plan moyen du DTM fonctionnel | 27 |
| Figure 20 : appareil de mesure du DTM | 30 |
| Figure 21 : axe du DTM sur l'axe des muscles moteurs..... | 31 |
| Figure 22 : axe des muscles du poignet..... | 31 |
| Figure 23 : évaluation des forces tendineuses lors des mouvements..... | 31 |
| Figure 24 : mouvement du scaphoïde..... | 34 |
| Figure 25 : orthèse DT | 35 |

| | |
|--|----|
| Figure 26 : le poignet proprioceptif..... | 36 |
| Figure 27 : distribution des mécanorecepteurs..... | 37 |
| Figure 28 : tension du ligament arqué..... | 38 |
| Figure 29 : tensions ligamentaires lors du mouvement | 39 |
| Figure 30 : la diagonale D2 du DTM en PNF | 41 |
| Figure 31 : contraction du FUC sur le pisiforme..... | 42 |
| Figure 32 : protocole de rééducation proprioceptive du poignet | 44 |
| Figure 33 : mobilisation du poignet..... | 45 |
| Figure 34 : auto mobilisation..... | 45 |
| Figure 35 : mobilisation en PNF..... | 45 |
| Figure 36 : thérapie miroir..... | 45 |
| Figure 37 : placement articulaire..... | 46 |
| Figure 38 : exercices avec pointeur laser..... | 46 |

Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I : complexe ligamentaire antérieur..... | 11 |
| Tableau II : complexe ligamentaire postérieur..... | 11 |
| Tableau III : ligaments latéraux..... | 12 |
| Tableau IV : disque articulaire radio ulnaire..... | 12 |
| Tableau V : ligaments palmaires..... | 13 |
| Tableau VI : ligaments dorsaux..... | 14 |
| Tableau VII : physiologie du poignet..... | 16 |

Liste des abréviations

AVQ : activités de la vie quotidienne

CERC : court extenseur radial du carpe

CLUD : complexe ligamentaire ulnaire distal

DISI : dorsal intercalated segment instability

DT : Dart Throw

DTM : Dart Throwing Motion

EBP : Evidence based practice

EUC : extenseur ulnaire du carpe

FRC : fléchisseur radial du carpe

FUC : fléchisseur ulnaire du carpe

ICD : inter carpien dorsal

LCR : ligament collatéral radial

LCU : ligament collatéral ulnaire

LERC : long extenseur radial du carpe

LSL : ligament scapholunaire

PNF : proprioceptive neuromusculaire facilitation

RCD : radio carpien dorsal

SC : scaphocapitatum

SLAC : scapholunate advanced collapse

STT : scapho trapézo- trapézoïde

TqCH : triquetro capitatum hamatum

VISI : volar intercalated segment instability

Introduction

Le poignet est un complexe articulaire permettant à la main les mouvements multidirectionnels. Il assure les fonctions de préhension et d'appui, essentielles dans la vie quotidienne. Bien qu'elles soient encore discutées, les connaissances acquises dans la littérature scientifique de la dernière décennie ont permis de mieux comprendre la cinématique des os du carpe entre eux, mais aussi l'équilibre des charges sur le poignet et son contrôle neuromusculaire permettant sa stabilité.

La littérature a également mis en évidence que la plupart des activités fonctionnelles du poignet se déroulent selon un mouvement bien particulier correspondant au « mouvement de lanceur de fléchettes ». Ce mouvement est en anglais le Dart Throwing Motion (**DTM**), terme communément utilisé dans la littérature. Il a été popularisé par les travaux de Palmer *et al.* [1] en 1985, qui décrit alors les mouvements fonctionnels du poignet. Selon P.Campbell [2], ce mouvement DT a une importance anthropologique. Il aurait joué un rôle dans l'évolution de l'espèce humaine pour permettre le lancer de pierres ou l'armement face aux prédateurs, puis la fabrication et l'utilisation d'outils, en permettant à la main de tenir fermement un objet cylindrique [3-4]. Il est unique à l'homo sapiens comme l'est l'opposition du pouce [5].

Plusieurs auteurs tels que Moritomo ou Garcia-Elias [5], affirment que le DTM est le mouvement du poignet le plus fonctionnel et le plus utilisé dans les gestes de la vie quotidienne. Pourtant, peu de protocoles de rééducation le décrivent. En effet, beaucoup n'utilisent le mouvement que dans les plans de description anatomique, pourtant moins fonctionnels. Ces preuves scientifiques doivent faire évoluer nos pratiques de rééducation et notre vision « orthogonale » correspondant aux plans anatomiques. Duchenne de Boulogne en 1867 l'a compris : « le mouvement analytique n'est pas dans la nature » [6].

L'objectif de ce mémoire est de penser au poignet autrement que confiné dans les axes orthogonaux des plans anatomiques. Après un rappel anatomique des structures importantes impliquées dans la description et la compréhension du DTM, il sera proposé une analyse de ce mouvement particulier. Cela permettra de comprendre comment l'intégrer dans la rééducation des pathologies du poignet, notamment dans la recherche du **contrôle neuromusculaire** pour la **stabilité** fonctionnelle. La discussion portera sur l'intérêt de ce mouvement dans la pratique rééducative quotidienne, mais également sur les difficultés rencontrées dans une rééducation qu'on recherche maintenant basée sur des données probantes (evidence based practice -EBP-).

Mots clefs : DTM, contrôle neuro musculaire, stabilité

A. Description anatomique

Selon Kapandji [7], le poignet est un complexe articulaire constitué des articulations radio carpienne et medio carpienne permettant 2 degrés de liberté, avec un 3ème permis par la pronosupination de l'avant-bras. Il inclut donc l'articulation radio ulnaire inférieure dans cet ensemble fonctionnel. On retrouve des mouvements de torsion possibles dans la radio carpienne et également dans la medio carpienne mais de plus faible amplitude. Ces 3 degrés permettent tous les mouvements au poignet.

Pour être fonctionnel, le poignet doit être mobile mais surtout stable. Cette stabilité repose sur un vaste système ligamentaire.

1.Arthrologie

Le poignet est constitué des 8 os du carpe réunis en 2 rangées sous la radius et l'ulna.

Du latéral vers le médial, on observe sur la Figure 1 issue de Netter [8] :

- rangée proximale : os scaphoïde-lunatum-triquetrum.
- rangée distale : os trapèze-trapézoïde-capitatum-hamatum

Le pisiforme vient se poser sur le triquetrum comme une rotule mais n'appartient pas à la première rangée du carpe.

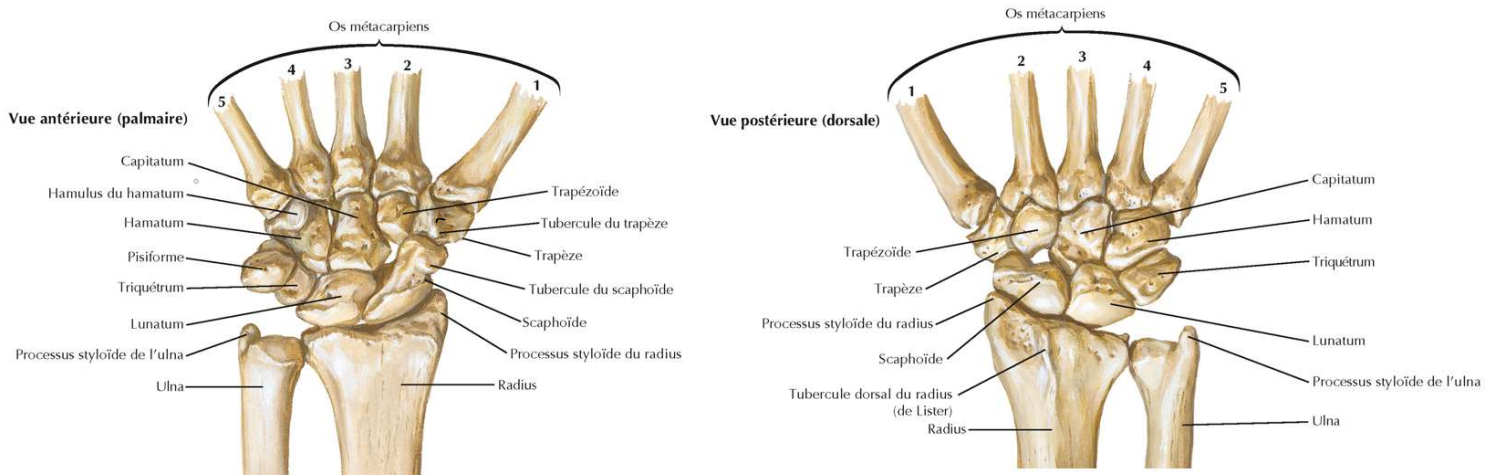


FIGURE 1 : LE CARPE D'APRES NETTER

RADIO CARPIENNE : type ellipsoïde, articulation entre les faces inférieures du radius et de l'ulna et la face proximale des os de la première rangée du carpe.

Les faces proximales du scaphoïde, lunatum et triquetrum et leur ligament interosseux sont recouvert de cartilage. Ils forment une surface articulaire continue, celle du condyle carpien. La capsule est plus épaisse et résistante en avant.

MEDIO CARPIENNE : articulation entre les 2 rangées du carpe, considérées comme 2 blocs.

L'interligne est en forme de "S italique couché" : concave en haut en latéral et inversement en médial. Selon Kapandji [7], la partie latérale, entre scaphoïde et trapèze-trapézoïde, est de type arthrodie tandis que la partie médiale, entre capitatum-hamatum et scaphoïde-lunatum-triquetrum est condylienne. Selon Kamina [9], elle est bicondylaire.

ARTICULATIONS INTERCARPIENNES :

Proximales : scapholunaire et luno triquétrale

Elles sont synoviales planes.

Unies par 2 ligaments primordiaux dans la stabilité du carpe : les ligaments scapho lunaire et luno-triquetral -décrits plus loin-

Articulation avec l'os pisiforme

Elle est synoviale ellipsoïde.

Distales : trapézo-trapézoïdienne, trapézoïdo-capitale et capito-hamatale

Elles sont synoviales planes.

Leurs ligaments sont nombreux en palmaire, dorsal et interosseux. Ils sont très résistants et contribuent à la formation de ce bloc carpien distal monolithique.

RADIO ULNAIRE DISTALE : type trochoïde, elle fait partie du cadre radio ulnaire et permet la prono-supination.

DISQUE ARTICULAIRE RADIO ULNAIRE OU COMPLEXE LIGAMENTAIRE ULNAIRE DISTAL (CLUD) :

Il unit les 2 os de l'avant-bras et sépare les articulations radio ulnaire distale et radio carpienne. C'est le stabilisateur principal de l'articulation radio ulnaire distale, aidé par 2 renforts capsulaires antérieur et postérieur.

2. Système ligamentaire

Le système ligamentaire est vaste et inconstant dans sa description. Il est choisi de décrire de manière **non exhaustive** les ligaments les plus fonctionnels dans la dynamique du carpe.

2.1 Les ligaments extrinsèques

Ils relient le radius et l'ulna au carpe et sont décrits dans les tableaux I à IV et visibles sur la Figure 2 issue de Kamina [9].

TABLEAU I: COMPLEXE LIGAMENTAIRE ANTERIEUR

| Ligaments | De | À | Particularité |
|-------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Radio carpien palmaire | Bord antérieur de la glène radiale | Scaphoïde, lunatum, triquetrum et capitatum | Très résistant Son faisceau moyen est surnommé " ligament supinateur " car il transmet la supination au carpe [10] |
| Ulnocarpien palmaire | CLUD | Lunatum, triquetrum, capitatum et hamatum | Il s'étale en éventail |

TABLEAU II: COMPLEXE LIGAMENTAIRE POSTERIEUR

| | | | |
|---|---|---|--|
| Radio carpien dorsal RCD | Extrémité distale du radius | Scaphoïde, lunatum, triquetrum et capitatum | Son faisceau moyen est surnommé " ligament pronateur " car il transmet la pronation au carpe [10] |
| Retinaculaire postérieur du carpe | Tendon du fléchisseur ulnaire du carpe (FUC) et pisiforme | Bord latéral du radius | Sert de poulie de réflexion des extenseurs |

TABLEAU III: LIGAMENTS LATÉRAUX

| | | | |
|--|----------------------------|-------------------------|---|
| Collatéral radial du carpe (LCR) | Styloïde radiale | Scaphoïde | Renforcé par le long abducteur du pouce |
| Collatéral ulnaire du carpe (LCU) | Processus styloïde ulnaire | Triquetrum et pisiforme | Renforcé par le FUC |

TABLEAU IV: DISQUE ARTICULAIRE RADIO ULNAIRE

| | | | |
|---|---|--|---|
| Disque articulaire radio ulnaire | Face latérale du processus styloïde ulnaire | Bord inférieur de l'incisure ulnaire du radius | Assure le maintien de la radio ulnaire inférieure |
|---|---|--|---|

Selon Dufour [10], les 2 faisceaux moyens des ligaments radio-carpiens forment l'unité fonctionnelle et non anatomique appelée « ligament frondiforme du carpe ».

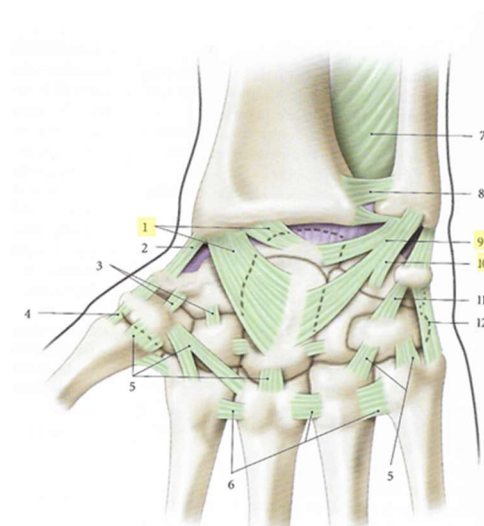


FIG. 9.77. Articulation radio-carpienne (vue antérieure)

1. lig. radio-carpien palmaire
2. lig. collatéral radial du carpe
3. ligg. intercarpiens palmaires
4. lig. carpo-métacarpien latéral
5. ligg. carpo-métacarpiens palmaires
6. ligg. intermétacarpiens
7. membrane interosseuse antébrachiale
8. lig. radio-ulnaire ant.

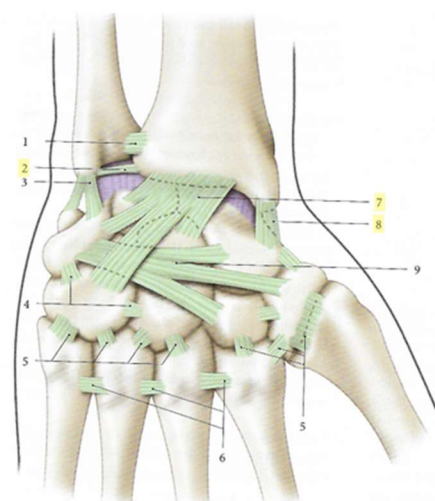


FIG. 9.78. Ligaments du carpe (vue dorsale)

1. lig. radio-ulnaire post.
2. disque articulaire radio-ulnaire
3. lig. collatéral ulnaire du carpe
4. ligg. intercarpiens dorsaux
5. ligg. carpo-métacarpiens dorsaux
6. ligg. métacarpiens dorsaux
7. lig. radio-carpien dorsal
8. lig. collatéral radial du carpe
9. lig. scapho-triquetrum

FIGURE 2 : LE SYSTEME LIGAMENTAIRE EXTRINSEQUE D'APRES DUFOUR

2.2 Les ligaments intrinsèques

Ils sont nombreux en palmaire, dorsal [tableaux V - VI] et interosseux. Ils sont très résistants et contribuent à la formation de ce bloc carpien distal monolithique. Ils renforcent la capsule en palmaire et les ligaments dorsaux ont un important rôle proprioceptif.

TABLEAU V: LIGAMENTS PALMAIRES

| Ligaments | De | À | Particularité |
|---|--|--|---|
| Radié du carpe | Capitatum | En étoile vers tous les os voisins, excepté le lunatum | |
| Scapho triquetral | Scaphoïde | Triquetrum | Passe en pont par-dessus le lunatum et pallie le risque de luxation |
| Lunaro capital | Corne antérieure du lunatum | Col du capitatum | Vertical, il prolonge le ligament radio lunarien |
| Triquetro capital | Triquetrum | Col du capitatum | Stabilisateur du triquetrum sur l'hamatum |
| Scapho trapézien | Tubercule du scaphoïde | Trapèze | Court, large et résistant ; stabilisateur du couple scapho lunaire sur le socle trapèze/trapézoïde |
| Triquetro-hamatal | Triquetrum | Hamatum | Sert de ligament collatéral médial à la medio carpienne |
| Rétinaculaire antérieur du carpe | Tubercule du scaphoïde et crête du trapèze | Pisiforme et uncus de l'hamatum | Stabilisateur des tendons fléchisseurs Délimite le canal carpien |

TABLEAU VI: LIGAMENTS DORSAUX

| Ligaments | De | A | Particularité |
|--|------------|----------------------------------|---|
| Inter carpien dorsal ICD | Triquetrum | Scaphoïde, trapèze et trapézoïde | Transversal, passe sous le ligament radio carpien dorsal |
| Scapho trapézo-trapézoïde STT | Scaphoïde | Trapèze et trapézoïde | Stabilisateur du couple scapho-lunaire sur le socle trapèze/trapézoïde |

2.3 Les ligaments interosseux

LE LIGAMENT SCAPHO LUNAIRE [11-12]

Ligament essentiel à la stabilité du poignet : il s'insère dans l'espace interosseux des 2 os. Il est en forme de C et est composé de 3 parties mécaniquement distinctes [Figure 3]. Sa partie dorsale est la plus résistante aux contraintes. Elle s'oppose à des forces de distraction et de translation de plus de 300N. Sa partie palmaire est moins résistante (150 N) et s'oppose à la rotation. La résistance mécanique de la partie supérieure du ligament est minime.

Ce ligament supporte 80% des contraintes axiales du poignet et est donc essentiel à la bonne cinématique et stabilité du carpe.

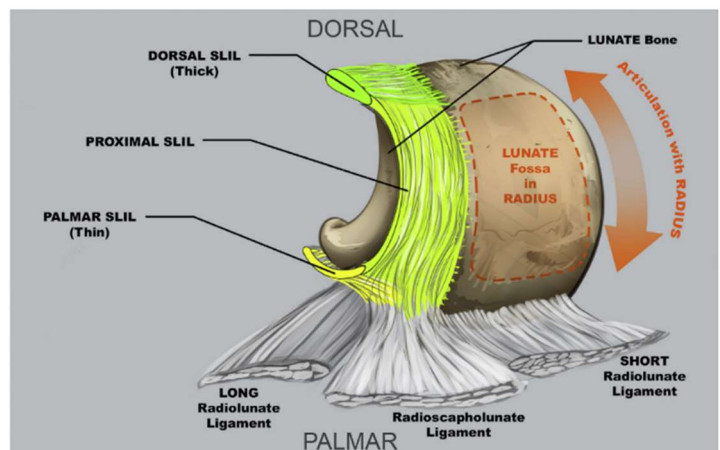


FIGURE 3 : LE LIGAMENT SCAPHO LUNAIRE D'APRES WOLFF

LE LIGAMENT LUNO TRIQUETRAL

Ligament essentiel également à la stabilité du poignet : il s'insère dans l'espace interosseux des 2 os.

Une lésion d'un de ces 2 ligaments perturbe tout l'équilibre de la cinématique du carpe par une mauvaise transmission des forces. A terme et sans réparation, on observe une instabilité du poignet puis des lésions dégénératives arthrosiques secondaires, radioscapoïdienne puis médiocarpienne.

3. Anatomie fonctionnelle

3.1 Amplitudes

Selon Kapandji [7] et partant de la position anatomique, les mouvements du poignet se font dans deux plans selon deux axes, visibles sur la Figure 4 :

- plan sagittal selon un axe transversal pour les mouvements de flexion/extension
- plan frontal selon un axe antéro-postérieur pour les mouvements d'abduction/adduction appelés aussi inclinaison radiale/ulnaire

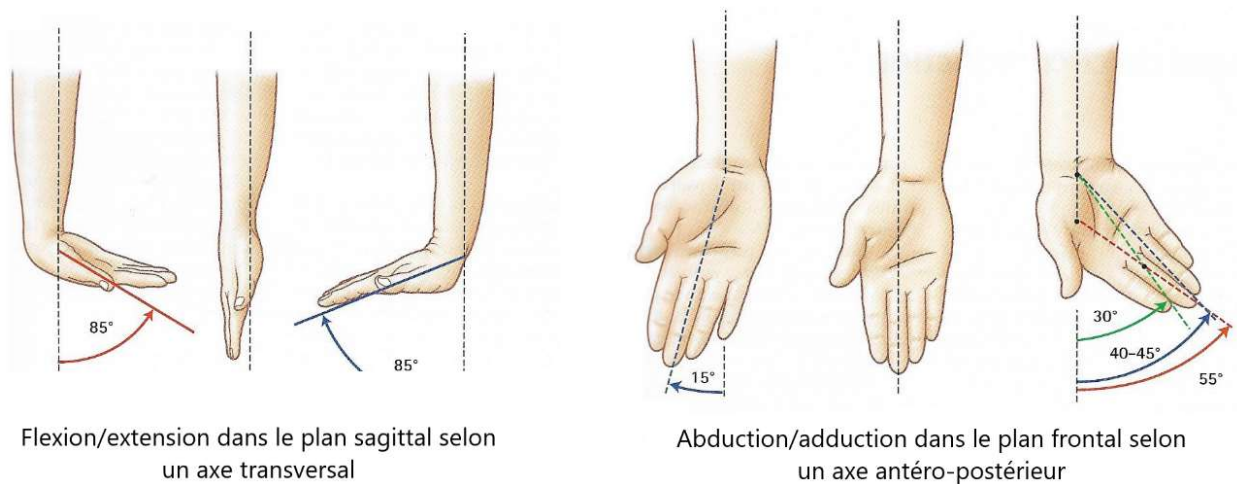


FIGURE 4 : LES MOUVEMENTS DU POIGNET D'APRES KAPANDJI

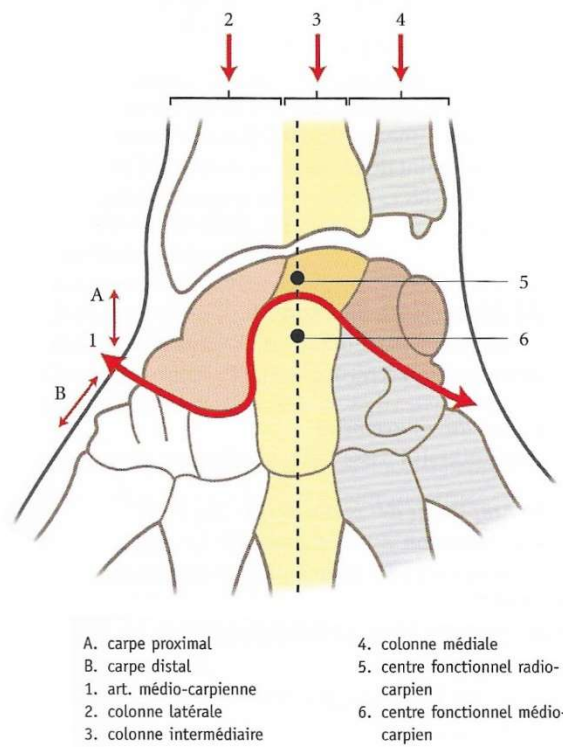
Une description non exhaustive de la physiologie du poignet est choisie, sous forme de tableau VII récapitulatif des éléments importants concernant le sujet de ce travail écrit.

TABLEAU VII: PHYSIOLOGIE DU POIGNET

| Mouvements | Amplitude passive | Amplitude active | Muscles moteurs principaux | Muscles moteurs accessoires | Freins au mouvement |
|---------------|---|------------------|--|---|---|
| Flexion | 100° | 85° | Fléchisseur radial du carpe (FRC) Fléchisseur ulnaire du carpe (FUC) Long palmaire | Fléchisseur superficiel des doigts Fléchisseur profond des doigts Long abducteur du pouce | Muscles extenseurs du poignet Muscles extenseurs des doigts Ligaments et capsules postérieurs |
| Extension | 95° | 85° | Long et courts extenseurs radiaux du carpe (LERC et CERC) Extenseur ulnaire du carpe | Extenseur des doigts Extenseur du V Extenseur du II Long extenseur du pouce | Bord postérieur du radius Muscles fléchisseurs du poignet Muscles fléchisseurs des doigts Ligaments et capsules antérieurs |
| Abduction | 15° | 15° | Fléchisseur radial du carpe Long et court extenseurs radiaux du carpe | Long abducteur du pouce Court extenseur du pouce | Butée du scaphoïde sur la styloïde radiale Ligament collatéral ulnaire |
| Adduction | 45° | 45° | Fléchisseur ulnaire du carpe Extenseur ulnaire du carpe | | Ligament collatéral radial |
| Pronation | 80° | 80° | Rond et carré pronateurs | Fléchisseur radial du carpe, Anconé | |
| Supination | 85° | 85° | Supinateur Biceps brachial | Brachio- radial | Membrane interosseuse Corde oblique Ligament carré CLUD |
| Circumduction | Combinaison des mouvements avec la prono-supination de l'avant-bras, décrit un cône elliptique dont l'angle d'ouverture est de 160° à 170°. | | | | |

Selon Kamina et représenté sur la Figure 5 [9], le poignet est un ensemble articulaire qui devient fonctionnel grâce à 2 cohérences articulaires :

- une cohérence transversale, dite dynamique : carpe proximal et distal sont les mobiles du mouvement
- une cohérence longitudinale, dite statique : 3 colonnes latérale, intermédiaire et médiale assurent la transmission des contraintes musculaires.



**FIGURE 5 : COHERENCES FONCTIONNELLES DU CARPE
TRANSVERSALE ET LONGITUDINALE D'APRES KAMINA**

Cette cohérence articulaire est indispensable à la bonne fonction de la main et à la stabilité du poignet.

3.2 La stabilité du poignet

Elle est assurée principalement par le système ligamentaire mais aussi par l'orientation du condyle carpien sous la glène.

PLAN FRONTAL

La glène radiale est orientée en bas et en dedans : le centrage du condyle carpien sous la glène s'obtient avec une inclinaison ulnaire d'environ 30° comme le montre la Figure 6 issue et modifiée de Kapandji. Dans cette position, la force longitudinale exercée par le système musculaire est perpendiculaire à la surface articulaire : le carpe est en position de stabilité maximale.

En inclinaison radiale, le carpe est donc à l'inverse, en position d'instabilité. Les 2 ligaments radio triquetraux antérieur et postérieur permettent le centrage de radio carpienne dans cette position. Kuhlmann les décrit comme une fronde ligamentaire ramenant le triquetrum en haut et dedans [Figure 6].

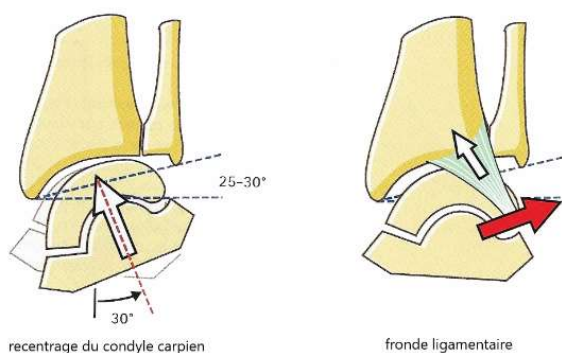


FIGURE 6 : STABILITE PLAN FRONTAL D'APRES KAPANDJI

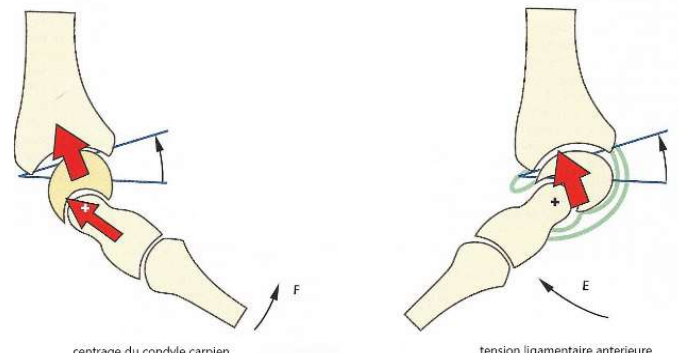


FIGURE 7 : STABILITE PLAN SAGITTAL D'APRES KAPANDJI

PLAN SAGITTAL

La glène radiale est orientée en bas et en avant : le centrage du condyle carpien sous la glène s'obtient avec une flexion d'environ 30° .

En extension, le carpe est donc à l'inverse en position d'instabilité. Les tensions des ligaments antérieurs plaquent le lunatum et le capitatum en haut et en arrière pour recentrer et stabiliser le condyle carpien sous la glène radiale [Figure 7] [7].

3.3 Dynamique du carpe

Sous les contraintes intrinsèques ligamentaires et de pression, les 8 os du carpe se mobilisent : c'est la notion de carpe à géométrie variable.

Kuhlmann a décrit ces mouvements et a été repris par Kapandji.

3.3.1 Flexion/extension :

DYNAMIQUE DE LA COLONNE DU SCAPHOÏDE

Le scaphoïde est en forme de « barque », allongé à concavité antérieure (grec *scaphè* = nacelle/barque et *eidos* = apparence). Il présente 2 pôles : un proximal qui s'articule avec la glène radiale, et un distal qui s'articule avec le couple trapèze/trapézoïde.

La Figure 8 [7] schématise la variabilité de la distance utile (*du*) entre radius et trapèze/trapézoïde selon l'orientation du scaphoïde :

- Flexion : le scaphoïde « se couche », la distance utile est minimale
- Rectitude : le scaphoïde est dit « debout », la distance utile est maximale
- Extension : le scaphoïde bascule en postérieur en réduisant la distance utile

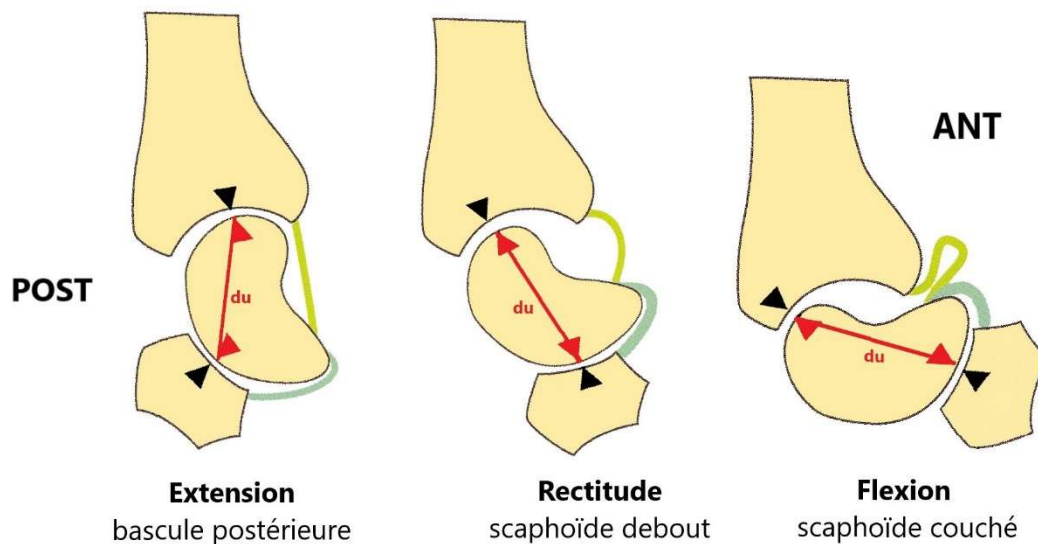


FIGURE 8 : VARIATION DE LA DISTANCE UTILE SELON LA POSITION DU SCAPHOÏDE D'APRES KAPANDJI

Grâce à cela, le trapèze reste à égale distance du centre de rotation lors du mouvement selon un arc de cercle antero postérieur [Figure 9] [7].

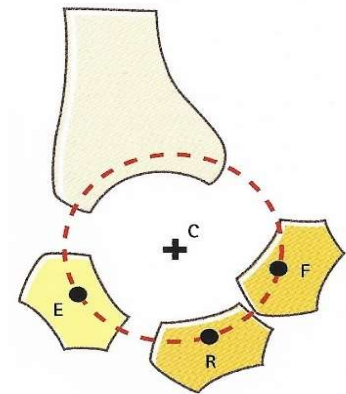


FIGURE 9 : POSITION DU TRAPEZE LORS DU MOUVEMENT D'APRES KAPANDJI

DYNAMIQUE DE LA COLONNE DU LUNATUM

La forme asymétrique du lunatum, plus épais en avant qu'en arrière, fait varier la distance utile entre la tête du capitatum et la glène radiale lors du mouvement : en flexion, le capitatum est plus éloigné de la glène de par l'épaisseur de la corne antérieure du lunatum.

L'obliquité de la glène radiale, qui descend plus bas en postérieur qu'en antérieur, fait également varier cette même distance utile mais de façon opposée : en flexion, le capitatum a une plus grande course grâce à la remontée du bord antérieur de la glène.

La Figure 10 [7] schématise ces 2 variations qui se combinent et donnent des répartitions différentes dans les amplitudes des radio carpienne et medio carpienne en fin de mouvement :

- Flexion : 50° dans la radiocarpienne + 35° dans la medio carpienne
- Extension : 35 ° dans la radio carpienne + 50° dans la medio carpienne

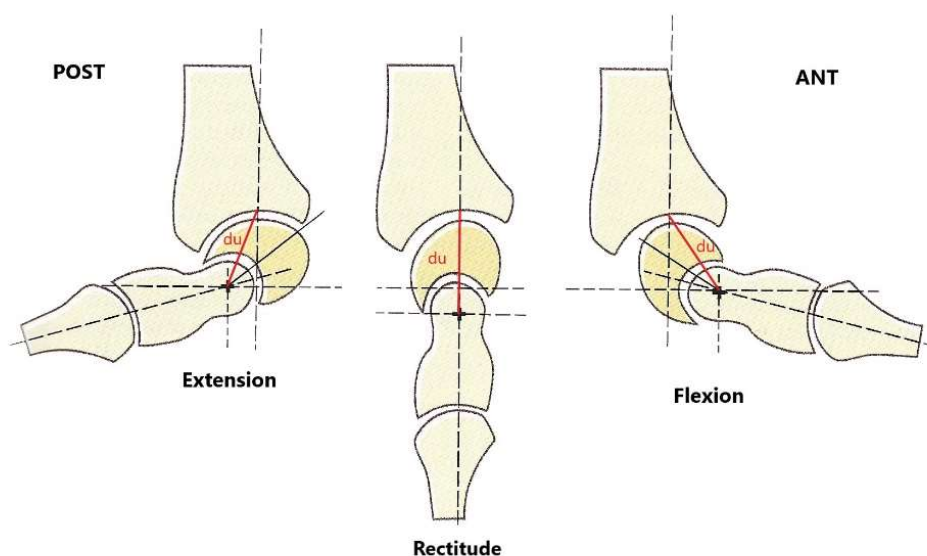


FIGURE 10 : POSITION DU LUNATUM LORS DU MOUVEMENT D'APRES KAPANDJI

DYNAMIQUE DU COUPLE SCAPHOÏDE/LUNATUM

Le scaphoïde et le lunatum sont unis par un puissant ligament interosseux : le ligament scapho lunaire décrit plus haut.

La face proximale du ligament est recouverte de cartilage et participe au condyle carpien. Le ligament est plus épais et plus solide en postérieur qu'en antérieur. Il est compliant et permet des mouvements relatifs physiologiques entre les 2 os de 30° environ. La Figure 11 issue de Kapandji et modifiée, montre la variation possible de l'angle scapho-lunaire mesuré entre la ligne scaphoïdienne et la ligne bicorne lunarienne.

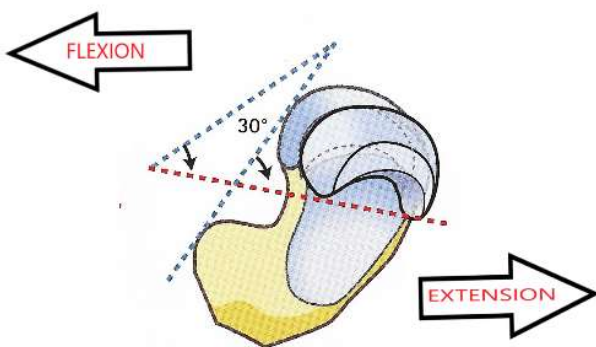


FIGURE 11 : MOUVEMENTS RELATIFS DU SCAPHOÏDE ET DU LUNATUM D'APRES KAPANDJI

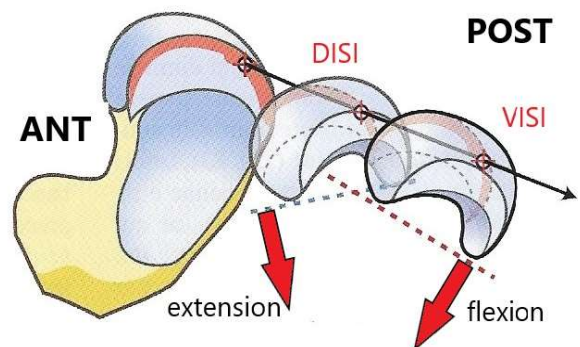


FIGURE 12 : POSITION DU LUNATUM LORS DES MOUVEMENTS D'APRES KAPANDJI

Le lunatum bascule [7][Figure 12] :

- vers l'avant: il se met en extension par rapport au radius, on parle de **DISI** -Dorsal Intercalated Segment Instability- sa face distale regarde vers l'arrière
- vers l'arrière: il se met en flexion sous le radius , on parle de **VISI** - Volar Intercalated Segment Instability- sa face distale regarde vers l'avant

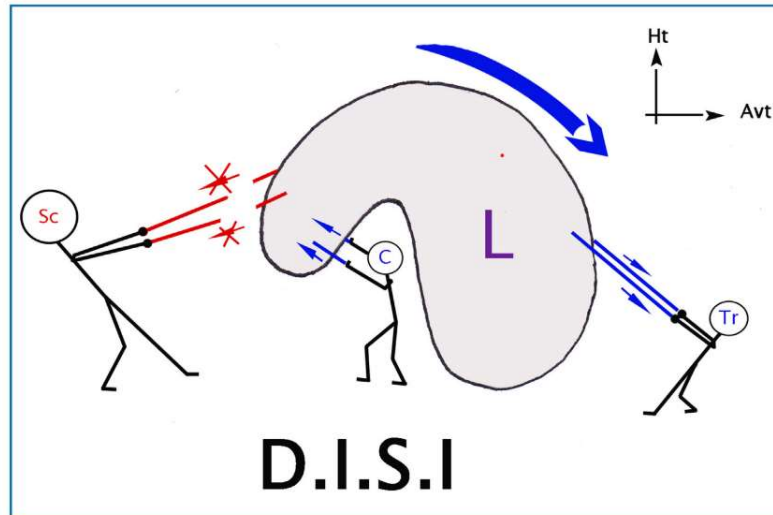
PHYSIOLOGIE LORS DE LA FLEXION/EXTENSION DU POIGNET

Lors de la flexion du poignet : le scaphoïde se couche, le lunatum part en flexion par une bascule postérieure [Figure 11].

Lors de l'extension du poignet : le scaphoïde se redresse suivi par la bascule antérieure du lunatum. Le scaphoïde est arrêté plus tôt -tension ligamentaire- que le lunatum qui continue sa bascule antérieure pendant 30°.

SI LESION DU LIGAMENT SCAPHO LUNAIRE

Lors de la flexion, le scaphoïde se couche mais le lunatum ne peut pas le suivre sans ligament SL, il reste en extension par rapport au radius : position DISI schématisée par la Figure 13 de Mesplié [13] et la Figure 14 issue de Kapandji et modifiée.



En présence d'une instabilité dissociative avec un DISI, la lésion du ligament scapho-lunaire crée un déséquilibre en faveur de la composante en extension appliquée par le triquetrum et le capitatum sur le lunatum, qui se place donc en extension.

FIGURE 13 : POSITION DISI D'APRES MESPLIE

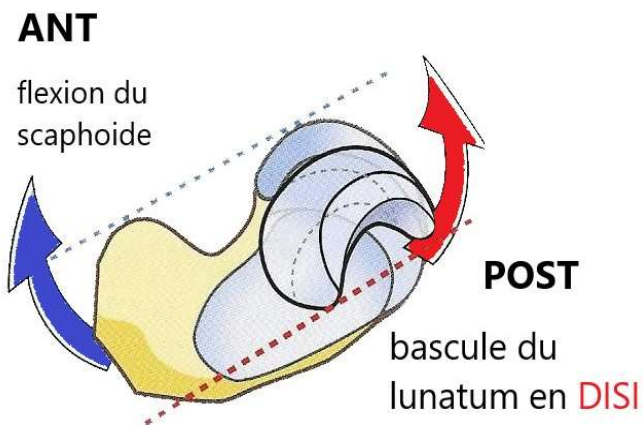


FIGURE 14 : POSITION DU LUNATUM SI RUPTURE LIGAMENTAIRE D'APRES KAPANDJI

Une lésion de ce ligament entraîne une dysharmonie importante de la biomécanique du carpe aboutissant à long terme à une arthrose pancarpienne ou poignet SLAC (scapholunate advanced collapse) (annexe 1). De ce fait, elle est primordiale à rechercher lors de traumatisme du poignet suite à chute en extension et inclinaison radiale.

3.3.2 Inclinaison radiale/inclinaison ulnaire

INCLINAISON RADIALE

Le carpe tourne sous la glène radiale avec des déplacements spécifiques :

- bascule en flexion du scaphoïde qui « se couche »
- le lunatum se place à moitié sous la tête ulnaire
- écartement du triquetrum et de la styloïde ulnaire
- la rangée proximale tourne en pronation-flexion par pression du couple trapèze/trapézoïde [14]
- et la rangée distale en supination-extension

Globalement le carpe se déplace en inclinaison radiale et la butée du scaphoïde sur la styloïde radiale arrête le mouvement.

INCLINAISON ULNAIRE

La colonne lunatum/capitatum se centre sous la glène radiale :

- extension du scaphoïde
- le lunatum se place sous le radius
- écartement du couple trapèze/trapézoïde et de la styloïde radiale
- la rangée proximale tourne en supination-extension (SE) et la distale en pronation-flexion (PF) [14]

La Figure 15 [7] schématise ces mouvements des 2 rangées du carpe représentées comme 2 unités.

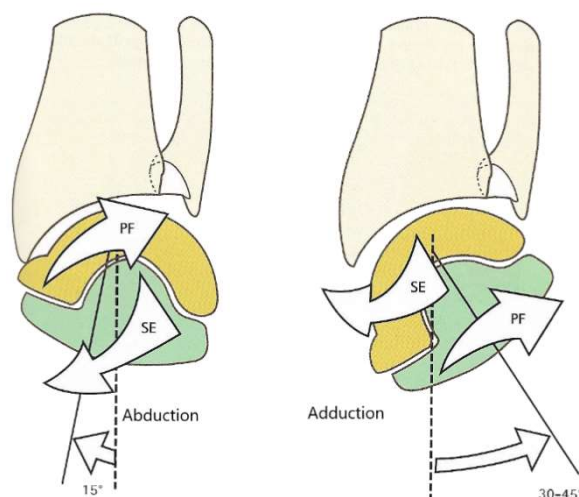


FIGURE 15 : MOUVEMENT DES RANGEES PROXIMALE ET DISTALE LORS DES INCLINAISONS D'APRES KAPANDJI

3.3.3. Prono-supination

Le poignet n'effectue pas de pronosupination pure au niveau de ses articulations mais reçoit et subit la pronosupination issue des articulations sus-jacentes. Kapandji parle de "transmission à la main du couple de rotation développé dans l'avant-bras" [7]. De ce fait, la description de ce mouvement dans ce travail écrit n'est pas choisie.

Cette transmission est possible grâce au puissant système ligamentaire, extrinsèque et intrinsèque qui verrouille le carpe ; mais aussi grâce au système musculaire, en particulier fléchisseur.

On observe donc que les mouvements décrits par Kuhlmann et Kapandji sont basés sur les axes de description anatomique - sagittal, frontal et longitudinal - correspondant aux plans de référence.

A la fin du 19^{ème} siècle, l'anatomiste allemand Henke a proposé une description de ces mouvements selon des axes évolutifs, à savoir 2 axes obliques correspondant aux articulations radio-carpiennes et medio-carpienne et représentés sur la Figure 16 [7].

- axe proximal 1 : oblique de dorsal en palmaire et de radial en ulnaire
- axe distal 2 : oblique de dorsal en palmaire et de ulnaire en radial

Selon lui, les mouvements de flexion extension sont toujours combinés à des composantes d'inclinaison et de rotation [3][7].

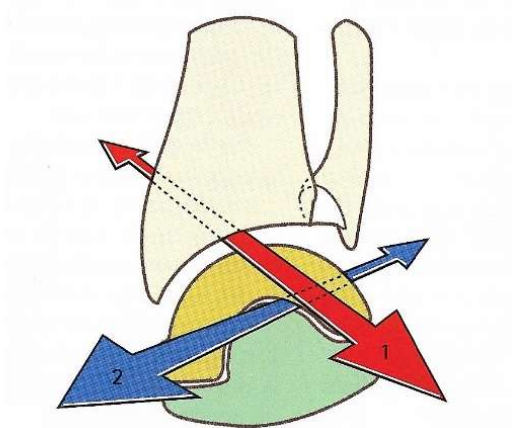


FIGURE 16 : LES AXES OBLIQUES SELON HENKE D'APRES
KAPANDJI

Le mouvement dit « lancer de fléchettes » ou en anglais "Dart Throwing Motion" (DTM), réunit ces composantes.

B. Le Dart Throwing Motion

L'intérêt biomécanique et clinique de ce mouvement est évoqué dès 1949 par O.J. Vaughan-Jackson, repris ensuite par D.Thomas [6]. Par la suite, la Mayo Clinic a créé une commission sur ce mouvement.

1. Le mouvement

Le « Dart Throwing Motion » correspond littéralement au mouvement du poignet lors du lancer de fléchettes.

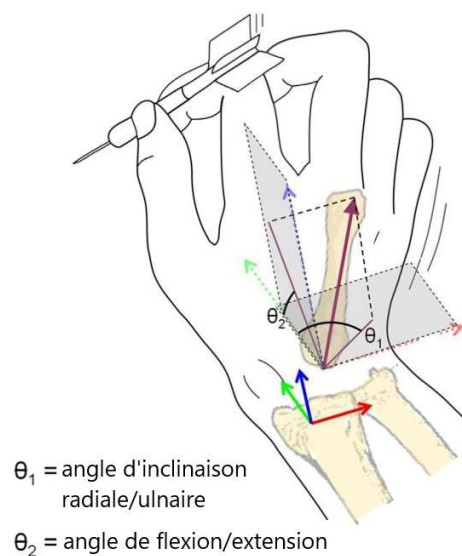


FIGURE 17 : LE DTM ET SES COMPOSANTES D'APRES GARG ET AL.

Le DTM ou mouvement DT est un mouvement carpien combiné amenant le poignet de l'extension et inclinaison radiale vers la flexion et inclinaison ulnaire représenté sur la Figure 17 [15].

La Fédération internationale des sociétés pour la chirurgie de la main (International Federation of Society for Surgery of the Hand -IFSSH) préconise dans son rapport de 2007 l'utilisation du terme **extension radiale** et **flexion ulnaire** pour les amplitudes extrêmes du DTM [3].

Elle définit le DTM dans un plan dans lequel le mouvement fonctionnel du poignet se produit de l'extension radiale vers la flexion ulnaire. Elle rappelle que ce mouvement commence à être

évoqué et étudié dès la fin du 19^{ième} siècle avec la radiographie dynamique dans la recherche sur la biomécanique du carpe.

Dans son rapport de 2013, elle explique que le DTM correspond au plan de mouvement de diverses activités de la vie quotidienne comme verser, boire un verre, lancer une balle ou encore le martelage [5]. Crisco *et al.* [16] l'évoque déjà en 2005.

L'étude *in vivo* de Brigstocke *et al.* [17] en 2014 confirme qu'aucune de ces activités ne s'effectue exclusivement dans les plans anatomiques orthogonaux, mais bien dans un plan oblique, défini d'emblée par une simulation de lancer de fléchette.

Il en ressort que **le mouvement DT est le mouvement global du poignet dans la plupart des activités de la vie quotidienne (AVQ)** mais également dans plusieurs activités sportives comme les sports de raquettes, le golf ou encore le lancer de javelot.

Pour Morimoto, le DTM est « une des rotations les plus naturelles pour le poignet », et « le mouvement le plus stable et fonctionnel pour les activités quotidiennes » [18-19].

Pour M.Garcia-Elias, il s'agit de « la rotation la plus courante dans les activités quotidiennes » [14].

Les études cadavériques ont démontré que l'axe mécanique du poignet est plus aligné avec celui du DTM qu'avec les axes anatomiques [15].

2. Axe et plan du mouvement

De nombreuses études ont tenté de définir un plan de ce mouvement.

Il en ressort que ce plan ne peut être défini précisément car il est propre à chaque individu du fait que le mouvement est composé et dépendant de l'anatomie osseuse de chacun comme représenté sur la Figure 18 [3][16][18][20-21].

Lors de son rapport en 2013, la fédération internationale de la chirurgie de la main rappelle qu'il existe donc une large plage d'axes et définit 2 DTM : un mouvement dit « pur » et un dit « fonctionnel » [5].

Le « pur » suit un plan oblique qui croise les plans sagittal et coronal à la position zéro en même temps. Le « fonctionnel » a lieu dans un plan parallèle à celui du « pur » avec un décalage en dorsal [Figure 19].

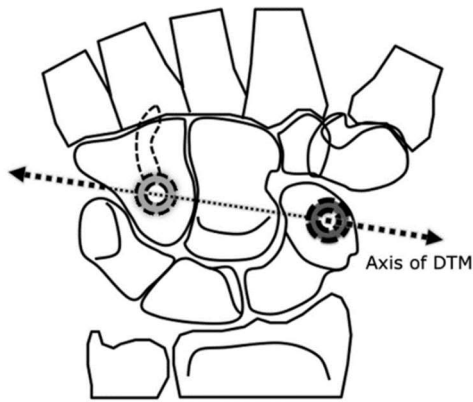


FIGURE18: ORIENTATION DE L'AXE DU DTM OBLIQUE DE LA TUBEROSITE DE SCAPHOIDE EN RADIO-PALMAIRE VERS L'HAMATUM EN DORSO-ULNAIRE
D'APRES BRAIDOTTI ET AL. [18]

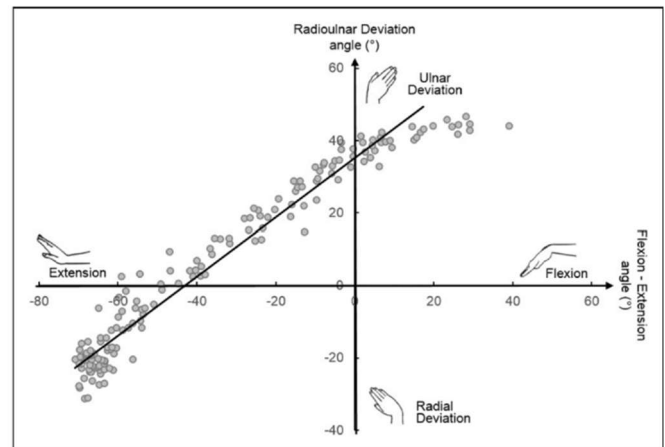


FIGURE19: PLAN MOYEN DU DTM FONCTIONNEL [27] D'APRES VARDAKASTANI ET AL.

Dans les 2 définitions, le mouvement passe par la position neutre du poignet, c'est à dire lorsque le 3ieme métacarpien est aligné avec l'axe de l'avant-bras [1][22].

Pour Morimoto *et al.* [3], on peut prendre un plan approximatif entre 30° et 45° du plan sagittal. On n'observe pas de différence du plan de DTM selon la prédominance de la main [23].

Le DTM **fonctionnel** est choisi pour ce travail écrit. Il correspond de façon unique à chaque patient et son axe varie selon les activités. Il est facilement reproductible cliniquement, contrairement au DTM pur qui ne peut être effectué correctement qu'avec des paramètres expérimentaux précis. C'est le plus adapté à la pratique rééducative.

Le DTM fonctionnel est retrouvé régulièrement dans les études en demandant au patient de tenir un stylo comme une fléchette et de simuler son lancer [24].

3. Cinématique des rangées du carpe lors du DTM

De nombreux auteurs reconnus tels que Moritomo ou encore Garcia-Elias s'accordent pour dire que le DTM est effectué le long d'un plan oblique, défini plus haut, et, en l'absence de lésion ligamentaire, se produit presque essentiellement dans l'articulation **medio carpienne**, la rangée proximale étant presque immobile[5][14-15][17-18][21].

Selon Edirisinghe *et al.* [21], c'est la rangée distale du carpe qui fléchit sur la proximale, avec un point de pivot entre le lunatum et le capitatum lors du mouvement DT.

En 2005, Crisco *et al.*[16] observent que le mouvement est minimal dans la radio-carpienne lors du DTM : le scaphoïde et le lunatum ne bougent que très peu autour de leur position zéro et il n'y a pas de translation entre eux. L'étude est effectuée *in vivo*, sur des poignets « sains ». Werner *et al.* [20] l'ont conclu également *in vitro*.

Moritomo *et al.* [3] comparent les mouvements de flexion/extension, inclinaisons pures avec le DTM : ils observent qu'il y a moins de mouvement entre le scaphoïde et le lunatum lors du DTM que lors des mouvements dans les plans anatomiques. Ils précisent qu'un mouvement dans un plan entre 30° et 45° du plan sagittal permet un mouvement fonctionnel sans sollicitation de la radio carpienne.

On observe également que suite à une arthrodèse de la radio carpienne, le mouvement résiduel global du poignet est proche du DTM. Calfee *et al.* [25] décrivent une diminution de 38% d'amplitude en flexion extension et de 41% d'inclinaison ulno-radiale après une arthrodèse radio-scapho lunaire. Ils ne notent pas de diminution notable d'amplitude lors du DTM. C'est pourquoi Moritomo *et al.* [3] recommandent l'arthrodèse radiocarpienne plutôt que médiocarpienne, qui permettrait de garder les mouvements fonctionnels grâce au DTM. Cette recommandation est suivie par Garcia-Elias qui préconise la conservation de la médiocarpienne au dépend de la radio scapho lunaire dans la chirurgie des instabilités du carpe [14].

A l'inverse, on observe que, suite à une arthrodèse de la medio carpienne, le mouvement résiduel est proche de la flexion extension du plan sagittal que du DTM. Cela confirme que le DTM se produit essentiellement dans la medio carpienne. De plus, Garg *et al.*[15] ont montré une diminution des performances de certaines activités quotidiennes suite à une arthrodèse médio carpienne. On observe également une corrélation entre l'amplitude du DTM et le score fonctionnel DASH [26] : plus l'amplitude est importante, meilleur est le score ; ceci implique qu'il est important de conserver au mieux la medio carpienne pour les AVQ [11].

4. Evaluation clinique

Le DTM étant reconnu comme un mouvement fonctionnel important, il paraît nécessaire de vouloir le quantifier cliniquement par des mesures précises et objectives. Les études citées ci-dessous ont décrit une recherche d'évaluation par goniométrie.

Le DTM est guidé par la crête séparant les 2 facettes articulaires de la face inférieure du scaphoïde : la facette radio dorsale s'articule avec le trapèze et la facette ulnopalmaire avec le trapézoïde. Le trapèze et le trapézoïde se comportent comme un bloc et glissent ensemble sur le scaphoïde en distal guidés par la crête inter facettaire [21]. Le capitatum et le lunatum ont un mouvement oblique sur le scaphoïde, selon l'axe du DTM. Le bloc trapèze/ trapézoïde et le capitatum n'ont que peu de mouvement entre eux et ces os se déplacent ensemble comme une unité relative sur le scaphoïde. Le capitatum et le troisième métacarpien ont un mouvement limité entre eux. Le mouvement est donc propre à l'anatomie de ces os et varie pour chaque individu.

En 2013 Bugden [4] prend le 3^{ième} métacarpien comme référence pour observer et mesurer le mouvement DT fonctionnel. Il conclue que la mesure goniométrique n'est pas fiable et donc non utilisable en clinique.

En 2018, l'étude de Vardakastani *et al.* [27] a pour objectif de quantifier le DTM fonctionnel par la goniométrie et de comparer les mesures avec celles enregistrées par capteurs de mouvement. L'étude par capteur de mouvement confirme bien le mouvement dans un plan et selon un axe : moyenne : 43°/ axe sagittal, 34°/ axe longitudinal.

Ici, les sujets tenaient un stylo pour exécuter le DTM : trois séries de cinq répétitions.

La mesure comparative avec la goniométrie montre des différences avec celle objective des capteurs, notamment dans les amplitudes extrêmes du mouvement.

L'étude corrige cette différence par une équation difficile à mettre en place dans la pratique clinique quotidienne.

En 2019, Mitsukane *et al.* [26] examinent la fiabilité d'une mesure goniométrique du DTM pur, plus simple pour eux à mesurer que le DTM fonctionnel dont l'axe est variable. Ils concluent également à un manque de fiabilité de la mesure sur sa reproductibilité.

Kasubuchi *et al.* [28] ont développé un appareil de mesure goniométrique spécifique pour ce mouvement, utilisé pour les suivis de rééducation [Figure 20]. Ce système de mesure, outre la possession de l'appareil, a également ses limites : axe prédéfini, pas de troubles de pronosupination, bon grasp, et paraît difficilement réalisable pour l'ensemble des patients.



FIGURE 20 : APPAREIL DE MESURE DU DTM D'APRES KASUBUCHI ET AL.

La mesure clinique du DTM fonctionnel est possible avec un goniomètre simple mais sa limite est qu'elle est peu précise et difficilement reproductible car l'axe du mouvement varie. La goniométrie de ce mouvement composé et propre à chaque individu ne semble donc pas pertinente car peu fiable.

5. Muscles moteurs du DTM

Les principaux muscles moteurs du mouvement sont les extenseurs radiaux du carpe - LERC et CERC- et le fléchisseur ulnaire du carpe -FUC-. On retrouve sur les Figures 21 et 22 [29] leur axe anatomique sur le même axe que celui du mouvement. Ils sont aidés par le fléchisseur radial du carpe (FRC) et l'extenseur ulnaire du carpe (EUC) à la fin du mouvement qui permettent d'équilibrer les tensions autour de l'axe de rotation du DTM [3-4][30]. Les forces tendineuses moyennes et maximales du FUC et du LERC sont les plus élevées lors du DTM que lors de tout autre mouvement analytique du poignet [Figure 23][5][31].

Garcias Elias *et al.* [24] démontre par son étude en 4 dimensions que le mouvement de l'articulation scapho lunaire n'est minime que lorsque le DTM est réalisé sur des poignets **sains** avec un LSL intact. Selon l'étude, il existe uniquement une petite plage de mouvement en extension radiale dans laquelle le ligament n'est pas contraint : c'est le seul mouvement qui pourrait être permis en post réparation du ligament. Il affirme que le DTM **complet** peut majorer un diastasis scapho lunaire si le ligament est déjà lésé. Pour lui, la cinématique du mouvement DT est dépendante de l'intégrité du LSL : ce mouvement est nocif dans les cas de lésion de ce ligament et trop contraignant sur des sutures en post-opératoire.

Anderson et Hoy [32] , se basant sur les travaux de Garcias Elias, utilisent le mouvement DT dans un protocole de rééducation des instabilités scapho-lunaire. Avec un mouvement précoce sous orthèse DT -détaillée plus loin- dans un secteur articulaire limité au milieu de course, ils introduisent des exercices actifs neuromusculaires à partir de 4 semaines. Les résultats à long terme sont concluants, tant sur la douleur que sur la fonction. Le protocole ne définit pas de plage d'amplitude ni d'axe de mouvement précis dans l'orthèse, mais de secteur protégé dans le DTM fonctionnel. Feehan et Fraser [33] qui obtiennent pourtant un bon résultat en l'utilisant précocement après fracture de l'extrémité inférieure du radius avec lésion du LSL recommandent d'autres études pour évaluer l'efficacité du traitement.

Plusieurs études scientifiques discutent et divergent sur l'utilisation ou non du DTM dans la rééducation des lésions du LSL[11][34]. L'objectif de ce mémoire est de proposer l'intérêt d'introduire le DTM dans la rééducation du poignet, pour diverses pathologies. Le choix est fait d'exclure la lésion ou réparation du LSL de ces pathologies : la possibilité d'effectuer le DTM dans les cas de lésion de ce ligament nécessite des études complémentaires afin de savoir s'il peut être indiqué selon le délai de cicatrisation ligamentaire.

Il apparait donc que le DTM est LE mouvement fonctionnel. Pourtant, on ne l'utilise que très peu dans les protocoles de rééducation du poignet. On sait maintenant que ce mouvement décharge l'articulation radio carpienne. Il pourrait donc être bénéfique en rhumatologie sur des poignets arthrosiques ; ou encore en traumatologie en mobilisation précoce, notamment des fractures fréquentes de l'extrémité inférieure du radius ou pour certaines instabilités du carpe. C'est également LE mouvement de poignet des activités de la vie quotidienne. Il semblerait donc important et nécessaire qu'il soit au cœur d'une rééducation proprioceptive efficace.

C. Rééducation avec et dans le DTM

Lors de la rééducation du poignet, on recherche la récupération d'un mouvement optimal et stable dans un but fonctionnel. Ceci est obtenu par la récupération des amplitudes physiologiques, par la récupération du système musculaire moteur et du système stabilisateur. La rééducation **avec** et **dans** le DTM pourrait permettre de répondre à ces objectifs.

1. La mobilité avec le DTM

Il est admis que la mobilisation précoce est nécessaire pour limiter les raideurs articulaires, les fibroses mais également pour favoriser une bonne proprioception cognitive consciente et inconsciente. La proprioception vient du latin *proprius*, personnel, et *ception*, la perception : il s'agit de la perception consciente ou inconsciente de son corps et de ses mouvements.

Il est aussi admis que l'immobilisation a pour conséquence la diminution des informations afférentes provenant des récepteurs extéroceptifs et proprioceptifs et de ce fait, affecte l'image corticale du membre immobilisé. Pour Hagert [35], il faut rapidement conscientiser cette proprioception pour minimiser les réorganisations corticales. Ce travail commence par une mobilisation précoce, qui maintient la représentation corticale du membre.

Lors de certains cas où la radio carpienne est fragilisée, la mobilisation précoce dans le DTM permet cette stimulation corticale et maintient le schéma moteur du mouvement medio carpien essentiel aux AVQ.

1.1. Mobilisation manuelle

Werner *et al.* [36] mettent en évidence le déplacement du tubercule du scaphoïde lors du DTM mais aussi lors des mouvements de flexion/extension et inclinaisons [Figure 24]. Ils en concluent que celui-ci n'a pas de mouvement lors du DTM, contrairement aux autres mouvements. De ce fait, il peut devenir le repère pour définir le plan du DTM du patient mais aussi pour la mobilisation globale du poignet.

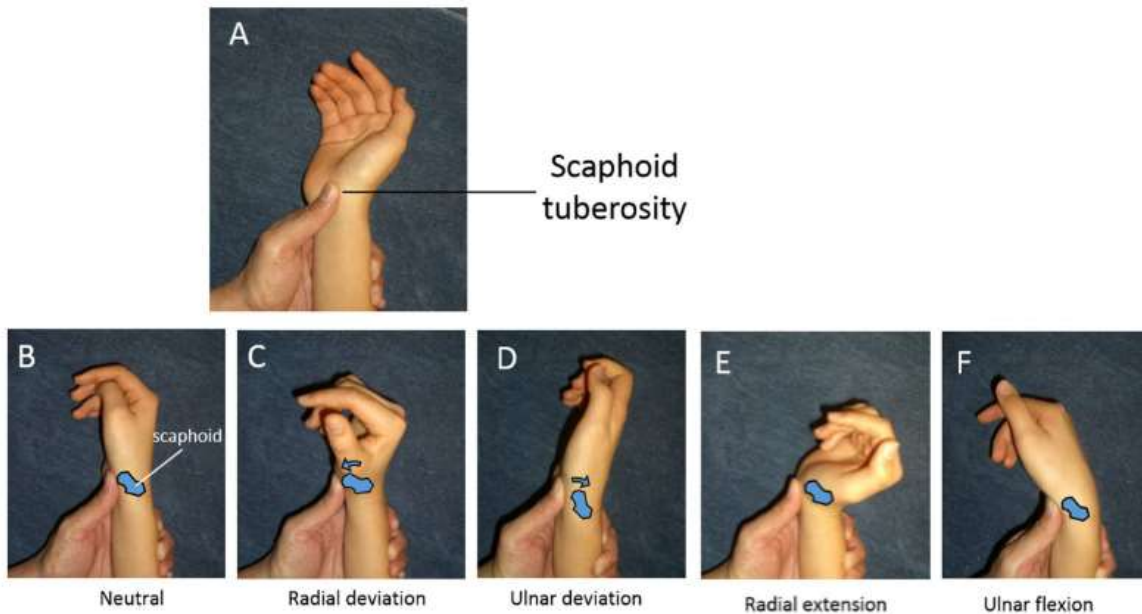


FIGURE 24 : MOUVEMENT DU SCAPHOIDE D'APRES WERNER

1.2. Mobilisation mécanique

La mobilisation peut être également mécanique grâce à l'utilisation d'orthèse dynamique telle que l'orthèse « dart splint » évoquée précédemment et représentée Figure 25 [18]. Selon le principe que le mouvement DT ne s'effectue que dans la medio carpienne, l'orthèse a été pensée pour être utilisée dans les protocoles de réhabilitations nécessitant une immobilisation radio carpienne. Elle permettrait alors une mobilisation précoce du poignet et de la main sans mettre de contraintes sur la radio carpienne par une mobilisation spécifique de la médiocarpienne.

Elle peut être donc utilisée en post chirurgie pour certaines reconstructions ligamentaires, ou encore pour les traitements conservateurs des instabilités radio carpiennes [18][33].

On peut y ajouter une légère résistance élastique pour un travail musculaire progressif [37] et favoriser donc l'autorééducation essentielle dans les réhabilitations de main.

Elle permettrait donc au thérapeute de commencer la rééducation plus précocement et de limiter les effets néfastes de l'immobilisation : raideur, perte du schéma moteur et de l'image corticale. Elle ne permet cependant pas un mouvement DT complet mais plutôt un guide dynamique le long du plan DT. Elle stimule le contrôle neuromusculaire qui améliore la stabilité dynamique du poignet.

Peu d'études prouvant son efficacité ont été effectuées mais elle est très discutée pour les suites de réparation du LSL comme vu précédemment [34-35] [37-38].

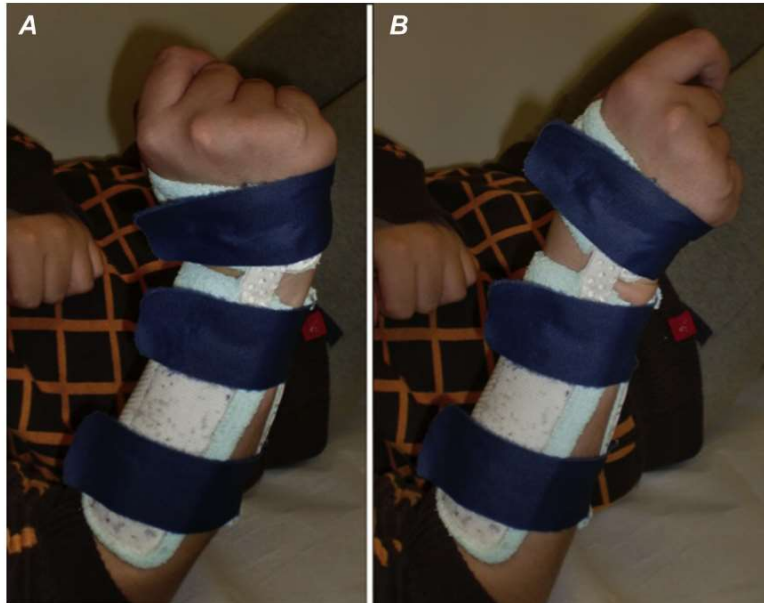


FIGURE 25 : ORTHESE DT EN EXTENSION RADIALE (A) ET EN FLEXION ULNAIRE (B) D'APRES BRAIDOTTI

1.3. Autorééducation par la mobilisation active

Le plan DTM produit la plus grande amplitude totale de mouvement au poignet car l'axe mécanique du poignet est orienté le long de ce plan. L'axe des insertions musculaires au niveau du poignet est orienté également dans le plan DTM, permettant au mouvement d'être exécuté avec une force minimale [3]. Par conséquent, les mouvements le long de ce plan nécessitent moins d'effort et peuvent aider à maintenir des amplitudes sans douleur. Il est de ce fait facile pour le patient de le reproduire seul en autorééducation pluriquotidienne à visée de rodage articulaire et gain d'amplitude.

Pour des activités quotidiennes performantes, un poignet doit être mobile, non douloureux mais surtout stable.

2. La stabilité dans le DTM

La stabilité selon l'IFSSH repris par Epgulas *et al.* est : « d'un point de vue cinétique, un poignet est considéré comme stable lorsqu'il est capable de maintenir des relations carpiennes normales, sous des charges physiologiques, sur toutes les plages de mouvement » [39] . Les prérequis nécessaires à cette stabilité sont :

- une bonne congruence articulaire
- des capsules et ligaments intacts et innervés : stabilisateurs statiques
- un système sensori moteur fonctionnel avec une bonne réactivité musculaire : stabilisateurs dynamiques

La plupart des exercices sont effectués dans les plans orthogonaux. Pourtant, les exercices dans le plan DTM apparaissent plus stables et contrôlés car le mouvement a lieu essentiellement dans la médio carpienne avec un carpe proximal stable. Le manque de proprioception et le manque de contrôle neuromusculaire sont l'origine de beaucoup d'instabilité de poignet [14] et sont donc essentiels à récupérer, tant statique que dynamique. On parlera de **fonction sensorimotrice** selon Hagert [35], résumée par la Figure 26.

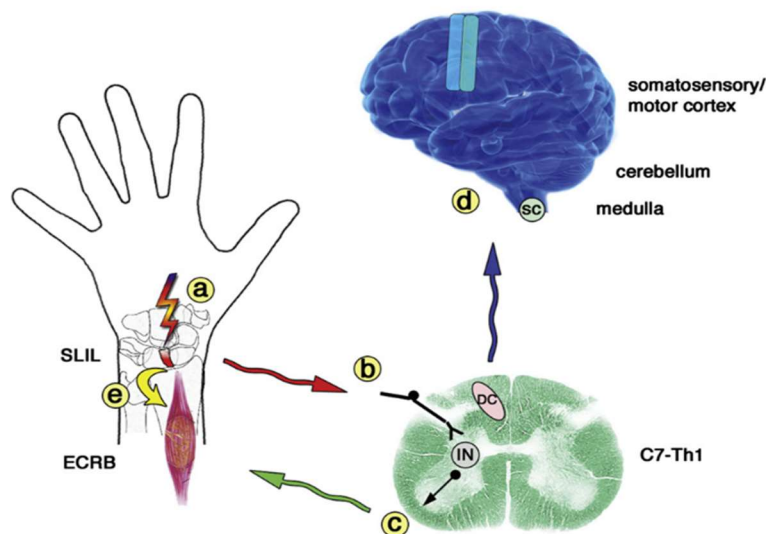


FIGURE 1. The principles of wrist proprioceptive pathways. Stimuli elicited by mechanoreceptors in intraarticular ligaments (A) convey afferent information to the dorsal horn of the spinal cord (B), where a fast monosynaptic affect on the alpha motoneuron takes place (C) for immediate control of the muscles around the wrist joint. The afferent information is, furthermore, conveyed to the cerebellum and cortex (D) for a higher supraspinal control of wrist stability. Some research also advocated the presence of local fusiform reflexes, where afferent information from mechanoreceptors is believed to stimulate the gamma motoneurons directly through local reflex arcs (E). SLIL = scapholunate interosseous ligament. ECRB = extensor carpi radialis brevis. DC = dorsal column of spinal cord. IN = interneuron. SC = spinocerebellar pathway.

Traduction : Principes des chemins proprioceptifs du poignet : les stimulus suscités par les mécanorécepteurs des ligaments intra-articulaires (a) envoient une information afférente vers la corne postérieure de la moelle épinière (b), où un message monosynaptique sur le motoneurone alpha (c) permet un contrôle immédiat des muscles du poignet. L'information afférente est aussi envoyée vers le cervelet et le cortex (d) pour contrôle supra spinal de la stabilité du poignet. Des recherches évoquent également la présence de réflexes fusiformes, où les informations afférentes provenant des mécanorécepteurs pourraient stimuler les motoneurons gamma directement à travers des arcs réflexes locaux (e). ECRB= CERC ; DC= corne postérieure de la moelle épinière ; IN=interneurone ; SC= chemin spinocérébral

FIGURE 26 : LE POIGNET PROPRIOCEPTIF D'APRES HAGERT

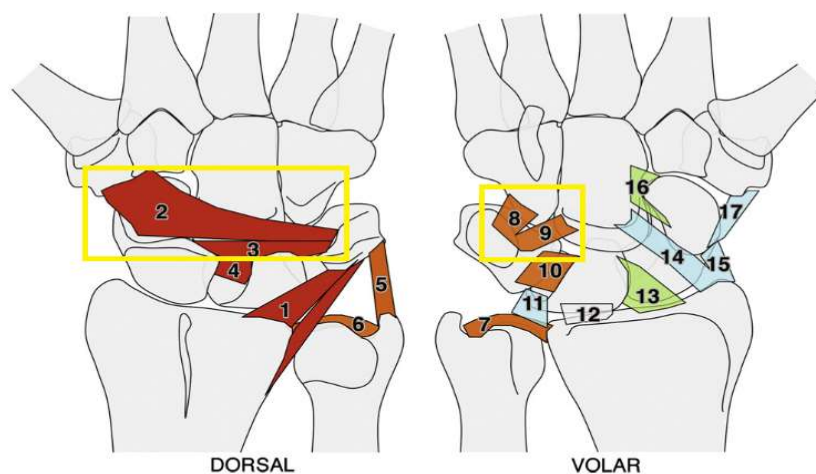
2.1. Stabilité statique

Les récepteurs mécaniques et nerveux régulent les contractions musculaires par inhibition ou stimulations réflexes.

Les récepteurs du poignet sont [35][40]:

- **Ruffini** : mécanorécepteurs les plus nombreux du poignet. Récepteurs à adaptation lente, réagissant à la traction axiale, ils sont constamment activés lors du mouvement articulaire et permettent la régulation de la tonicité et du contrôle musculaire.
- **Pacini** : mécanorécepteurs à adaptation rapide, sensible à la compression. Ils sont peu présents au niveau du poignet.
- **Fuseaux neurotendineux de Golgi** : sensibles à l'étirement, ils sont excités lors des amplitudes extrêmes du mouvement. On les retrouve dans les ligaments larges radiocarpien dorsal et intercarpien qui traversent et stabilisent la médiocarpienne.

E. Hagert les a répertoriés: leur répartition est inégale et inconstante comme le montre la Figure Figure 27 [35].



Ligaments: dorsal radiocarpal (1), dorsal intercarpal (2), scaphotriquetral (3), scapholunate interosseous (4), ulnar collateral (5), dorsal radioulnar (6), volar radioulnar (7), triquetrohamate (8), triquetrocapitate (9), palmar lunotriquetral (10), ulno-lunate (11), short radiolunate (12), long radiolunate (13), radioscapohcapitate (14), radioscapohoid (15), scaphocapitate (16), scaphotrapeziotrapezoid (17).

FIGURE 27 : DISTRIBUTION DES MECANORECEPTEURS D'APRES HAGERT

On observe plus de mécanorécepteurs dans les ligaments longs notamment les ligaments dorsaux radiocarpien et intercarpien (RCD et ICD), ainsi que dans les ligaments du complexe

triquetro-capitatum-hamatum (TqCH). Cette répartition permet une meilleure résistance aux contraintes axiales scaphoïde/radius.

Les ligaments scaphotrapezium-trapezoïde (STT) et scaphocapitatum (SC) sont considérés comme les ligaments collatéraux de l'articulation STT [5]. Moritomo *et al.* [3], précisent que ces ligaments possèdent peu de mécanorécepteurs et ont une fonction mécanique plus que proprioceptive. Ils stabilisent et contrôlent le mouvement DT [5]. Ils déclenchent donc peu de réponse musculaire réflexe. Ils stabilisent le pôle distal du scaphoïde et permettent de guider le DTM dont l'axe passe par ces ligaments [4]. C'est l'inverse pour le TqCH et le ligament ICD qui sont pourvus de nombreux récepteurs proprioceptifs. Leur stimulation aux extrémités du mouvement provoque la contraction musculaire réflexe des extenseurs radiaux du carpe ou du FUC selon le sens de l'action. Le ligament ICD est en position courte en position neutre du DTM et en contrainte lors de la flexion ulnaire [41]. Il stoppe le mouvement DT [5].

Les modifications de longueur ligamentaires sont très faibles dans le DTM : globalement, de l'extension radiale vers la flexion ulnaire, les ligaments palmaires se détendent et les ligaments dorsaux se tendent. Sur la Figure 28, on retrouve le ligament arqué tendu en extension radiale qui favorise la stabilité medio carpienne et détendu en flexion ulnaire [41]. La stabilité demandée au poignet est plus importante en extension radiale, au début du mouvement dynamique qu'en flexion ulnaire. Elle est permise par le système ligamentaire dorsal notamment des ligaments radio scaphocapitate, radiolunate, ulnocapitate et ulno triquetral. Ces 4 ligaments sont plus tendus en extension radiale et plus lâches en flexion ulnaire comme le montre la Figure 29 [41]. Ils ont des fonctions proprioceptives importantes et permettent l'arrêt du DTM. Ils permettent plus de stabilité au début qu'à la fin du mouvement [5].²



FIGURE 28 : TENSION DU LIGAMENT ARQUE LORS DU MOUVEMENT DT D'APRES TANG ET AL.

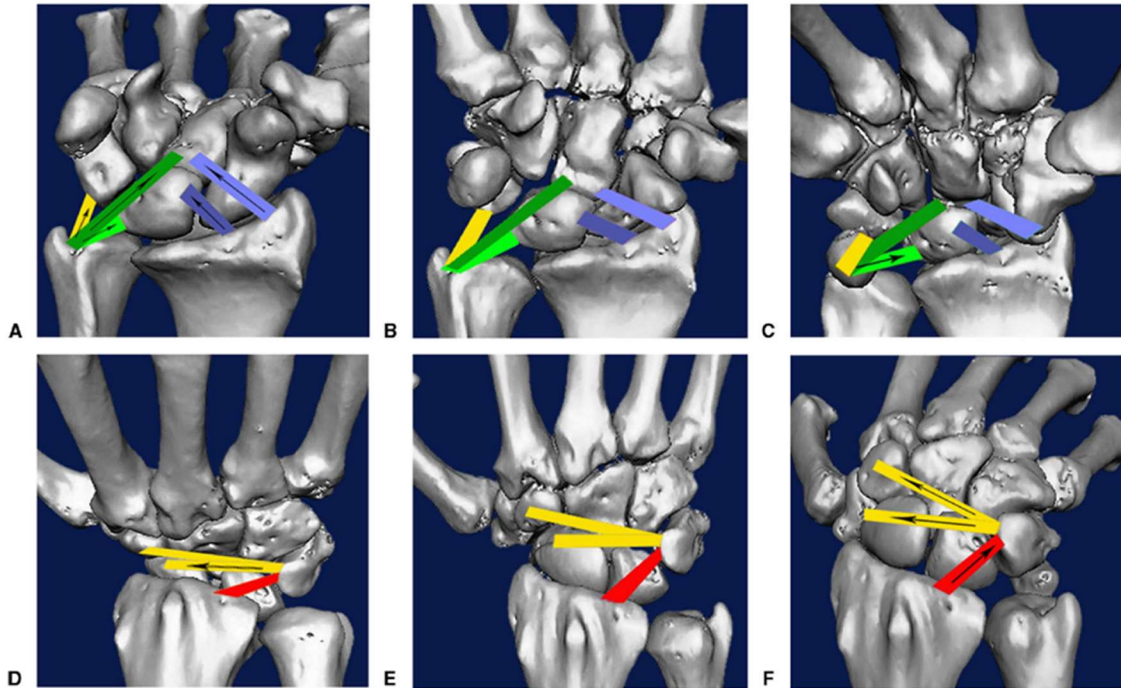


FIGURE 3: Elongation of carpal ligaments during the dart-throwing motion. **A-C** Three-dimensional bony images of palmar view of the carpus showing changes in the palmar ligaments: RSC, LRL, UC, UT, and UL. **A** Radial-deviated extension. **B** Neutral position. **C** Ulnar-deviated flexion. The ligaments with the arrows are tensed. **D-F** Three-dimensional bony images of dorsal view of the carpus showing dorsal ligaments: DIC and DRC. **D** Radial-deviated extension. **E** Neutral position. **F** Ulnar-deviated flexion. The ligaments with arrows are tensed.

Traduction : Etirements des ligaments carpiens pendant le DTM. A-C : image tridimensionnelle en vue palmaire du carpe montrant les modifications des ligaments palmaires : RSC = radioscapocapitate ; LRL : long radiolunate ; UC=ulnocapitate ; UT= ulnotriquétral ; UL= ulnolunate. A extension radiale B. Position neutre. C. Flexion ulnaire. Les ligaments avec des flèches sont tendus. D-F. image tridimensionnelle en vue dorsale du carpe montrant les modifications des ligaments dorsaux : ICD et RCD = radio carpien dorsal. D Extension radiale. E. position neutre. F. Flexion ulnaire. Les ligaments avec des flèches sont tendus

FIGURE 29 : TENSIONS LIGAMENTAIRES LORS DU MOUVEMENT D'APRES TANG ET AL.

La stabilité décroît donc avec le mouvement. Il est alors intéressant de débiter le travail proprioceptif dans la stabilité ligamentaire de l'extension radiale et en progression vers l'instabilité ligamentaire de la flexion ulnaire.

2.2. Stabilité dynamique

Dans un objectif de réhabilitation sensori motrice, il est important de rééduquer les 3 sens majeurs de la proprioception : la statesthésie et la kinesthésie en proprioception consciente et le contrôle neuromusculaire en proprioception inconsciente.

2.2.1. Kinesthésie

C'est la capacité de détecter le mouvement passif d'une articulation. La plage normale de perception de mouvement de flexion/extension du poignet correspond à une vitesse de 0.5-2°/s.

[35]. Elle est difficilement exploitable correctement en cabinet car demande un matériel particulier et onéreux type isocinétique.

Si elle est travaillée, elle doit se faire sans aide visuelle pour le patient, et à vitesse lente.

2.2.2. Statesthésie

C'est la capacité d'une articulation à reproduire une position donnée avec précision. Cela peut être passif ou actif : le rééducateur définit une position cible, soit le patient stoppe le mouvement quand la position est atteinte, soit il place lui-même son articulation dans la position cible. Ce travail est facilement réalisable en cabinet à l'aide d'un goniomètre. En progression, on diminue les informations visuelles et on augmente les variations d'amplitude entre 2 positions.

2.2.3. Contrôle neuromusculaire

Il comprend 2 phases, l'anticipation et la planification du mouvement (feed forward) puis son adaptation (feed back).

Les informations des récepteurs musculaires et articulaires sont transmises au cervelet par les fibres sensibles afférentes. Il les intègre puis adapte une réponse motrice adéquate. Ces messages de contrôle sont conscients et inconscients.

Selon E.Hagert [35], l'objectif d'une rééducation neuromusculaire est triple :

- restaurer un mouvement équilibré au poignet
- utiliser la compression musculaire pour compenser une faiblesse ligamentaire
- favoriser la contraction des muscles protecteurs de l'articulation

Ces objectifs sont à adapter en fonction de la lésion ou de la chirurgie réalisée.

On observe que les exercices isométriques réalisés unilatéralement permettent une augmentation de l'activité musculaire bilatérale. Ceci est due à la stimulation du cortex moteur et le contrôle neuromusculaire descendant. Ils sont à privilégier en post chirurgie dans des secteurs articulaires autorisés, afin de stimuler rapidement le contrôle neuromusculaire de l'articulation.

La **rééducation neuromusculaire inconsciente** est définie comme une « activation musculaire réactive » [35] et est essentielle pour maintenir la fonction du poignet en le protégeant. Elle peut se travailler en « feedforward » : le patient est prévenu des instabilités à

venir, cherchant à développer ses capacités d'anticipation. Elle peut aussi se travailler en rétroaction « feedback »: le patient subit les déstabilisations sans visuel, cherchant à développer ses capacités d'adaptation et de correction [13].

L'objectif étant de protéger le poignet, il paraît donc logique d'effectuer cette rééducation neuromusculaire selon un mouvement qui lui est le plus fonctionnel, à savoir le DTM. En effet, beaucoup de protocoles de travail proprioceptif proposent des exercices dans les plans orthogonaux. Pourtant, ces mêmes exercices seraient réalisables selon un autre axe.

La technique de facilitation neuromusculaire proprioceptive (Proprioceptive Neuromusculaire Facilitation -PNF-) en est l'exemple car elle se rapproche de la gestuelle fonctionnelle. C'est une technique de rééducation dont l'objectif est de faciliter le déclenchement des mécanismes neuro-musculaires en stimulant les propriocepteurs : intérocepteurs (récepteurs musculaire, tendineux, articulaire) et extérocepteurs (cutanés, visuels, auditifs, vestibulaires) [42]. Par la stimulation du système nerveux périphérique et central, la PNF recherche l'activité fonctionnelle du patient. A l'origine, elle est utilisée en neurologie mais la méthode rééducative s'étend à tout traitement rééducatif : récupération de mobilité articulaire, renforcement de groupes musculaires, apprentissage du contrôle du mouvement.

En 2019, Chen [43] décrit le premier protocole de rééducation intégrant le DTM et le travail sensori moteur en PNF, après lésion du CLUD. Il obtient des résultats satisfaisants tant sur la douleur que sur le fonctionnel, objectivé par le quick Dash. En effet, le DTM fait partie des schémas moteurs décrits par Kabat et utilisés dans la méthode PNF.

Il est utilisé dans la deuxième diagonale présentée par la Figure 30 de Thomas [6] et détaillée en annexe 2.



DTM et PNF : D2F poignet en extension + inclinaison radiale

FIGURE 30 : LA DIAGONALE D2 DU DTM EN PNF D'APRES THOMAS

Cette méthode permet d'intégrer tout le membre supérieur dans une chaîne cinétique fonctionnelle. Elle permet d'améliorer la stabilité de tout le membre supérieur dans les AVQ par un recrutement optimal des chaînes musculaires et des informations proprioceptives [42].

Le contrôle neuro musculaire conscient est recherché par le travail musculaire. L'objectif du renforcement musculaire du poignet est d'augmenter le tonus de base du muscle, nécessaire à une bonne réponse motrice adaptative au geste effectué.

En effet, la stabilité dynamique du poignet est favorisée par des capacités musculaires précises et équilibrées : force, vigilance, réactivité et contrôle. Le mouvement du poignet est tributaire d'un équilibre entre les tensions musculaires agonistes et antagonistes au mouvement. Il nécessite une co activation musculaire permanente permise par un travail musculaire sur les 3 modes : excentrique, concentrique et isométrique [13][35]. La contraction de certains muscles moteurs du DTM a un rôle précis de stabilité :

- La contraction isométrique du FUC visible sur la Figure 31 comprime le pisiforme sur le triquetrum et permet la stabilité neuromusculaire dans le cas d'instabilité ulnaire de la médiocarpienne [35]. Sa contraction permet une meilleure extension de la première rangée du carpe lors de l'inclinaison ulnaire et favorise la stabilité du carpe [14].

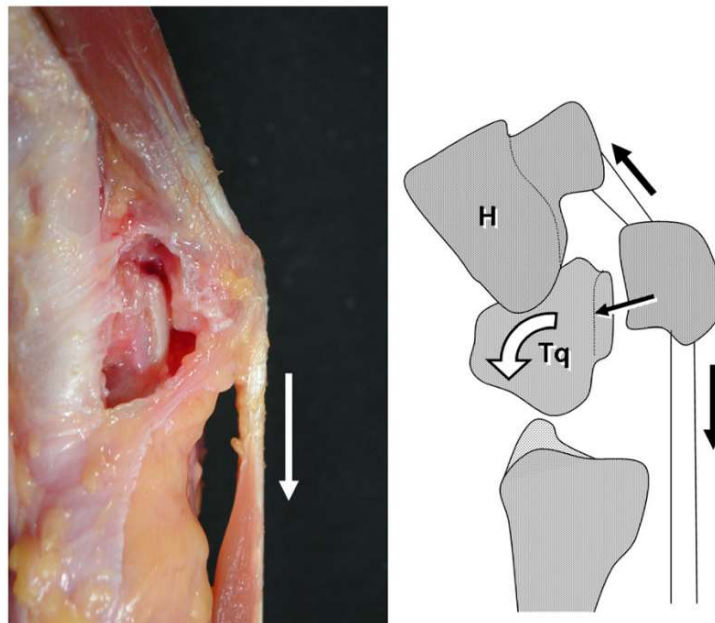


FIGURE 31 : CONTRACTION DU FUC SUR LE PISIFORME D'APRES GARCIA-ELIAS

- La contraction des LERC et CERC s'oppose à la bascule du pôle proximal du scaphoïde en le comprimant, améliorant également la stabilité carpienne [44] .
- Les muscles LERD, CERC et FUC sont les muscles les plus moteurs du mouvement DT. Leurs insertions musculaires sont orientées le long du plan DTM et ils ont la plus grande section transversale de l'avant-bras : ils guident le DTM.
- Les LERC, CERC et long abducteur du pouce sont considérés comme supinateurs de la médio carpienne. Sans lésion ligamentaire, la supination est transmise à la rangée proximale et donc au scaphoïde [11]. La supination du scaphoïde protège le LSL. L'étude de Salva-Coll *et al.* reprise dans le rapport de 2013 de la IFSHH [5], explique que l'exécution d'une tâche dans le plan DTM avec la contraction des muscles supinateurs de la médiocarpienne protège le ligament scapho lunaire.
- Inversement, le FRC et l'EUC amènent le scaphoïde en pronation et majorent le diastasis scapho lunaire si le ligament est lésé [11][39].

Effectuer un renforcement musculaire des muscles moteurs du DTM protège donc l'articulation scapho lunaire ce qui entretient la stabilité globale du poignet. La rééducation sensorimotrice dans le plan du DTM répond donc à l'objectif de recherche de stabilité du poignet.

3.Pratique en rééducation

Hagert [35] propose un protocole de rééducation proprioceptive adaptable à ce mouvement. Il est repris et traduit par Geoffroy et Mesplé sur la Figure 32 [13].

Tableau II. Étapes de la rééducation proprioceptive selon Hagert.

| Étape de rééducation proprioceptive | Plan rééducatif | Objectif | Techniques | Outils d'évaluation |
|-------------------------------------|--|--|---|---|
| 1 | Rééducation classique | Lutte contre la douleur, les troubles trophiques et la mobilité | Techniques classiques | EVA, goniomètres etc. |
| 2 | Conscience proprioceptive | Amélioration du contrôle articulaire conscient | Thérapie miroir | Idem |
| 3 | Sensibilité articulaire positionnelle | Capacité à reproduire une angulation articulaire prédéfinie | Reproduction passive et active d'un angle articulaire à l'aveugle | Goniomètre |
| 4 | Kinesthésie | Capacité à ressentir la mobilisation articulaire sans information visuelle ni sonore | Détection du mouvement avec un arthromoteur | Vitesse et déplacement à partir desquels le mouvement est perçu |
| 5 | Rééducation neuromusculaire consciente | Force des muscles spécifiques permettant d'améliorer la stabilité articulaire | Contractions auxotoniques – Co-contraction | Dynamomètres statiques et dynamiques |
| 6 | Rééducation neuromusculaire inconsciente | Réactivité des muscles (vitesse – qualité) | Exercices pliométriques – déstabilisants | EMG |

FIGURE 32 : PROTOCOLE DE REEDUCATION PROPRIOCEPTIVE DU POIGNET D'APRES GEOFFROY ET MESPLIE

Voici une proposition de pratique, suivant ce protocole et reprenant l'analyse effectuée sur l'intérêt du DTM. Les exercices proposés sont choisis pour rester dans le plan du DTM fonctionnel et sont complémentaires d'autres techniques plus classiques non décrites ici.

Étape 1 : rééducation classique *photos personnelles*

- Mobilisation globale du poignet par le thérapeute dans le DTM avec repère sur le tubercule du scaphoïde selon la description de Werner *et al.* [Figure 33] [36].
- Auto mobilisation du patient en simulant le lancer avec un stylo avec et sans visuel [Figure 34]
- PNF [Figure 35][6]



FIGURE 33 : MOBILISATION DU POIGNET



FIGURE 34 : AUTO MOBILISATION



FIGURE 35 : MOBILISATION EN PNF D'APRES THOMAS

Etape 2 : Conscience proprioceptive

- Thérapie miroir avec le mouvement DT : elle favorise le remaniement cortical. Elle est décrite en annexe 3 [Figure 36]. On peut utiliser le geste acquis du maintien d'un stylo pour l'écriture notamment.



FIGURE 36 : THERAPIE MIROIR

Etapes 3 et 4 : Sensibilité articulaire positionnelle et kinesthésie *photos personnelles*

- Mouvement effectué manuellement par le thérapeute dans le plan DT avec reconnaissance positionnelle du patient [Figure 37]
- Exercices avec pointeur laser et objectif de visée, avec puis sans visuel dans différentes positions du poignet le long du plan DT [Figure 38]



FIGURE 37 : PLACEMENT ARTICULAIRE



FIGURE 38 : EXERCICES AVEC POINTEUR LASER

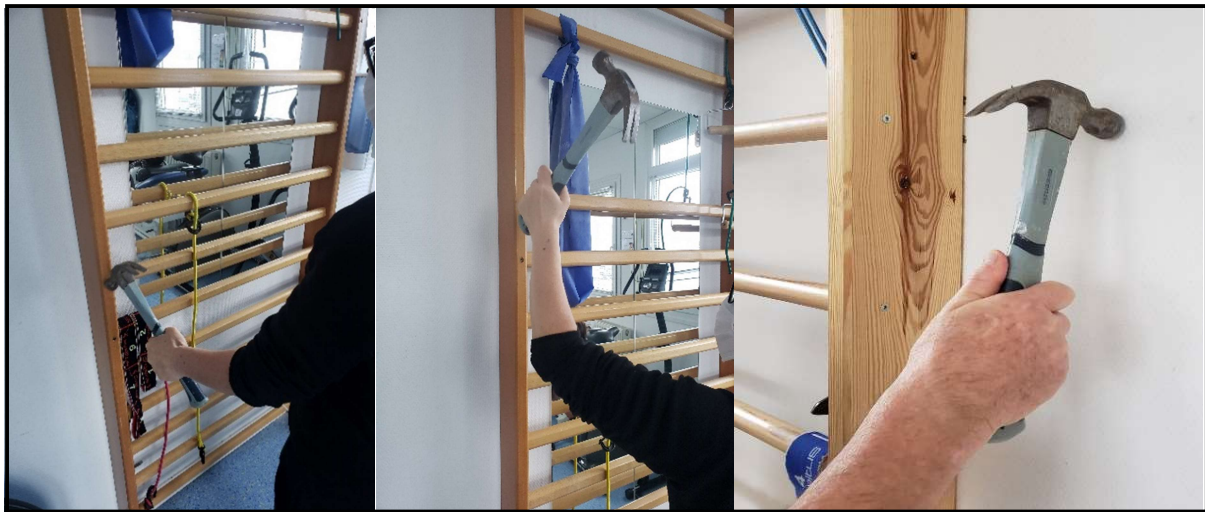
Etapes 5 et 6 : Rééducation neuromusculaire consciente et inconsciente

La proposition d'exercices est vaste, facilement réalisable et reproductible pour le patient puisque qu'il définit lui-même son DTM par une simulation du « lancer de fléchettes » avec un stylo pour comprendre le mouvement. Cela demande peu de matériel et permet donc une autorééducation au domicile et une mise en place aisée au cabinet.

Le martelage est connu comme la référence de nombreuses activités professionnelles impliquant le DTM [1][5][22][24]. Nous pouvons l'utiliser comme exercice de base de renforcement avec progression sur la charge, le bras de levier, travail proprioceptif avec et sans la vue, dans les différents modes de travail.

Kaufman-Cohen *et al.* [23] montrent la variation d'angle de plan du DTM selon la hauteur et le poids des taches effectuées. Il est important de varier ces paramètres lors de la rééducation neuromotrice afin d'exploiter au maximum les informations sensibles.

En autorééducation, l'utilisation d'élastiques et de poids permet un travail simple à mettre en place pour le patient à domicile et un travail qualitatif dans les différents modes de contraction musculaire.

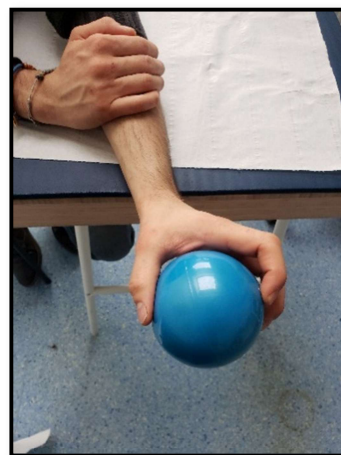
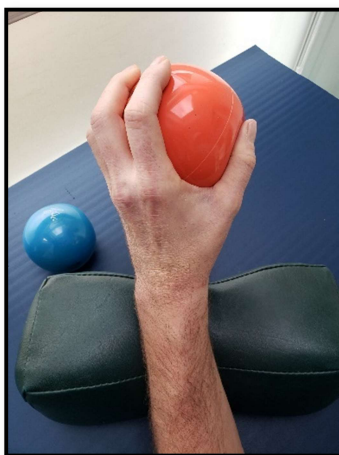


Martelage :

→ Progression sur bras de levier, charge du marteau, variation de hauteur de l'objectif

Renforcement musculaire :

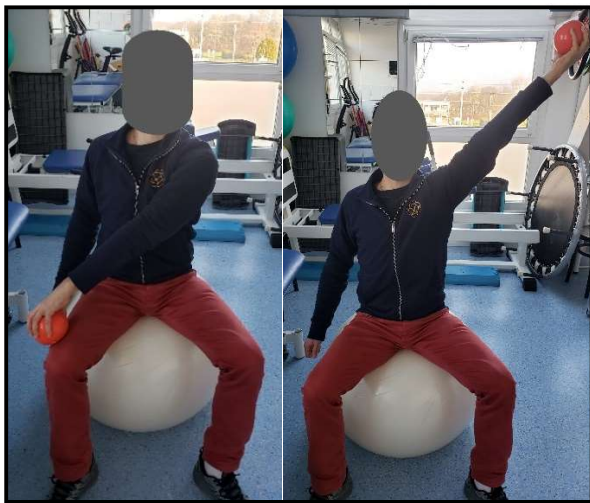
→ Progression sur le mode de travail, poids et type de charge, amplitude du mouvement





Autorééducation avec élastique :

Mobilisation, renforcement musculaire,
 Progression sur la position articulaire de tout le membre,
 résistance, course musculaire et mode de contraction

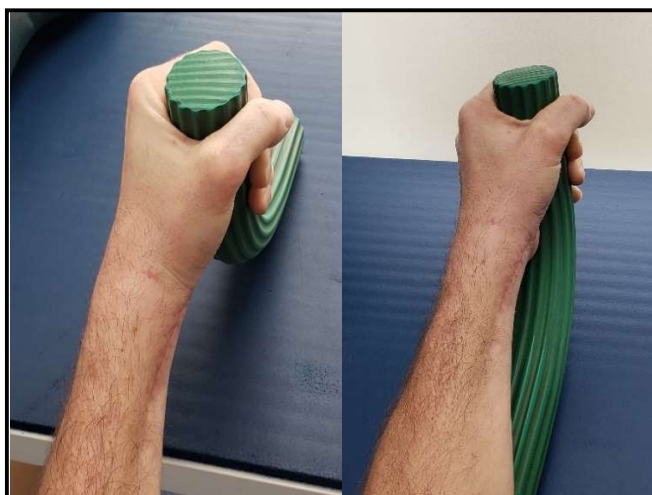


Renforcement musculaire dans la diagonale de PNF

→ Progression sur la position du patient, bras de levier, charge ...

Renforcement musculaire

→ Progression sur le mode de contraction, la course musculaire, inversion des points fixes, charge, ...



Travail neuromusculaire inconscient *photos personnelles*

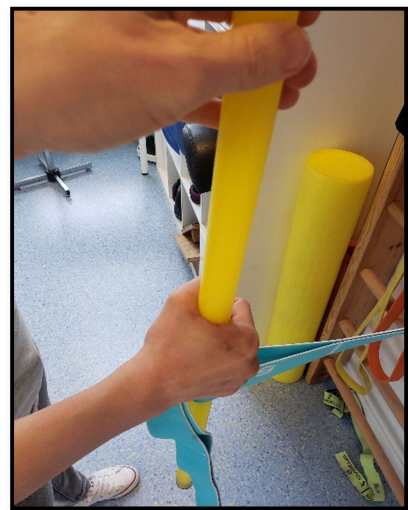


Lancer, réception et stabilisation de balle lestée :

→ Progression sur la charge, la vitesse, l'amplitude du mouvement, pliométrie

Co contractions en feed forward et feedback :

→ Progression sur le bras de levier, la position articulaire, informations visuelles, l'intensité des sollicitations



Contrôle excentrique avec double flux

→ Progression sur la position du coude, la charge, bras de levier



Contrôle de la stabilité

→ Progression sur l'endurance, la position articulaire, la charge, statique ou dynamique

Discussion

La proposition d'exercices décrits ici concerne la rééducation proprioceptive du poignet. Elle n'est pas exhaustive et est soumise à l'imagination des thérapeutes qui doivent choisir et adapter les exercices et leur progression en fonction du patient et des objectifs souhaités selon la pathologie traitée et le délai de prise en charge post lésionnel. La mise en place précoce de l'orthèse DTM dans certains traitements peut être utile mais difficile à mettre à exécution de par la difficulté de conception de cette orthèse. Bien que non décrite ici, l'électromyostimulation a également sa place dans le mouvement DT et peut être utilisée selon les protocoles habituels. Le travail en ergothérapie reste nécessaire et peut également s'effectuer dans le plan DT avec notamment le travail d'approche des prises ou de l'écriture.

Travailler la fonction dans le DTM est complémentaire des techniques analytiques et ne peut s'y suffire. En effet, la problématique liée à sa reproductibilité quantifiable se pose. En clinique, la goniométrie du DTM ne peut être faite aisément, c'est donc un mouvement qu'on ne peut pas bilancer et suivre objectivement. De plus, l'axe et les plans du mouvements sont variables ce qui ne lui permet pas d'être utilisé et reproduit en inter opérateurs et en inter patients. Ceci freine l'élaboration de protocoles de rééducation basés sur l'EBP.

Conclusion

L'objectif de ce mémoire est de proposer une autre vision de la mobilité du poignet et donc de sa rééducation, mais également de sortir des habitudes de pratiques restant exclusivement dans les axes orthogonaux.

Comme le rappelle Kaufman-Cohen *et al.* en 2018 [37], les angles du plan DTM varient entre les différentes activités et les sujets, avec une variation d'angle de 25° : ce mouvement est unique à chaque patient et en fait donc sa spécificité. Il devient alors un axe de contrôle neuro-musculaire de choix qui correspond à la réalité et la stabilité du poignet de chaque patient. Déjà en 2012, lors du congrès annuel de la Société française de chirurgie de la main, pour Thomas, le DTM est « un mouvement thérapeutique à privilégier dans toute rééducation du poignet » [45]. Il serait alors intéressant de développer son enseignement dans les techniques rééducatives proprioceptives.

Il s'agit donc d'un mouvement global, fonctionnel et stable pour le poignet mais difficilement quantifiable. Il offre des exercices de rééducation variés pour le patient qui s'implique activement dans sa réhabilitation. Il permet au thérapeute de développer son panel d'exercices et de sortir de sa zone de confort thérapeutique.

Pour reprendre l'idée de « la diapo du lundi » au congrès du GEMMSOR qui propose du pratico pratique : lundi, on lance des fléchettes ?

Références bibliographiques

1. Palmer AK, Werner FW, Murphy D, Glisson R. Functional wrist motion: A biomechanical study. *J Hand Surg Am* [Internet]. 1985;10(1):39–46. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S0363-5023\(85\)80246-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0363-5023(85)80246-X)
2. Campbell PJ. The Dart-Throwing Motion of the Wrist. Is It Unique to Humans? *J Hand Surg Am*. 2007;32(5):747–8.
3. Moritomo H, Apergis EP, Herzberg G, Werner FW, Wolfe SW, Garcia-Elias M. 2007 IFSSH Committee Report of Wrist Biomechanics Committee: Biomechanics of the So-Called Dart-Throwing Motion of the Wrist. *J Hand Surg Am*. 2007;32(9):1447–53.
4. Bugden B. A proposed method of goniometric measurement of the dart-throwers motion. *J Hand Ther* [Internet]. 2013;26(1):77–80. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jht.2012.08.003>
5. Moritomo H, Apergis EP, Garcia-Elias M, Werner FW, Wolfe SW. International federation of societies for surgery of the hand 2013 committee’s report on wrist dart-throwing motion. *J Hand Surg Am* [Internet]. 2014;39(7):1433–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2014.02.035>
6. Thomas D. (2020) *DIU cours de PNF*.
7. Kapandji AI.(2018) *Anatomie fonctionnelle*.Maloine
8. Netter FH. Atlas d’anatomie humaine 7th edition [Internet]. ElsevierMasson, editor. Available from: vbk://978229475712920190618
9. Kamina P.(2017) *Anatomie clinique*. Maloine
10. Dufour M. (2005) *Anatomie de l’appareil locomoteur*.Masson
11. Wolff AL, Wolfe SW. Rehabilitation for scapholunate injury: Application of scientific and clinical evidence to practice. *J Hand Ther*. 2016;29(2):146–53.

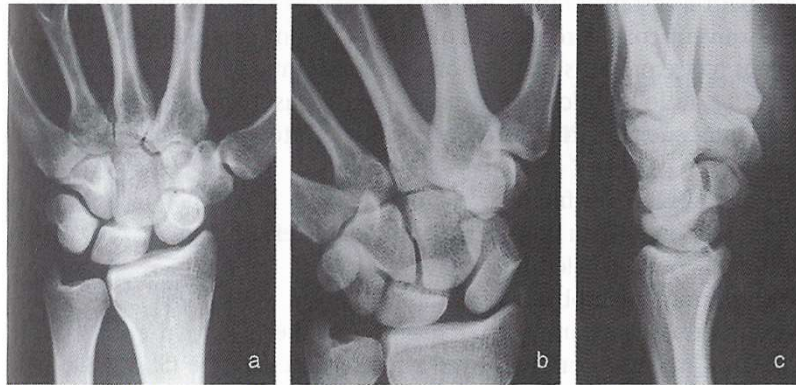
12. Papaloizos M. Lésions et instabilités scapho-lunaires: Les reconnaître et les traiter. *Rev Med Suisse*. 2015;11(477):1251–6.
13. Geoffroy C, Mesplié G. Rehabilitation of scapholunate instability. *Kinesithérapie* [Internet]. 2018;18(198):29–36. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.kine.2018.02.013>
14. Garcia-Elias M. The non-dissociative clunking wrist: A personal view. *J Hand Surg Eur Vol*. 2008;33(6):698–711.
15. Garg R, Kraszewski AP, Stoecklein HH, Syrkin G, Hillstrom HJ, Backus S, et al. Wrist kinematic coupling and performance during functional tasks: Effects of constrained motion. *J Hand Surg Am* [Internet]. 2014;39(4):634-642.e1. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2013.12.031>
16. Crisco JJ, Coburn JC, Moore DC, Akelman E, Weiss APC, Wolfe SW. In vivo radiocarpal kinematics and the dart thrower's motion. *J Bone Jt Surg - Ser A*. 2005;87(12 D):2729–40.
17. Brigstocke GHO, Hearnden A, Holt C, Whatling G. In-vivo confirmation of the use of the dart thrower's motion during activities of daily living. *J Hand Surg Eur Vol*. 2014;39(4):373–8.
18. Braidotti F, Atzei A, Fairplay T. Dart-Splint: An innovative orthosis that can be integrated into a scapho-lunate and palmar midcarpal instability re-education protocol. *J Hand Ther* [Internet]. 2015;28(3):329–35. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jht.2015.01.007>
19. Nguyen N, Pham TH, Pathirana PN, Babazadeh S, Page R, Seneviratne A. Qualification of Wrist Functional Performance During Dart Thrower's Movement. *Conf Proc . Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Conf*. 2018;2018:5790–3.
20. Werner FW, Green JK, Short WH, Masaoka S. Scaphoid and lunate motion during a wrist dart throw motion. *J Hand Surg Am*. 2004;29(3):418–22.

21. Edirisinghe Y, Troupis JM, Patel M, Smith J, Crossett M. Dynamic motion analysis of dart throwers motion visualized through computerized tomography and calculation of the axis of rotation. *J Hand Surg Eur* Vol. 2014;39(4):364–72.
22. Leventhal EL, Moore DC, Akelman E, Wolfe SW, Crisco JJ. Carpal and Forearm Kinematics During a Simulated Hammering Task. *J Hand Surg Am* [Internet]. 2010;35(7):1097–104. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2010.04.021>
23. Kaufman-Cohen Y, Portnoy S, Levanon Y, Friedman J. Does Object Height Affect the Dart Throwing Motion Angle during Seated Activities of Daily Living? *J Mot Behav* [Internet]. 2020;52(4):456–65. Available from: <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1645638>
24. M. Garcia-Elias¹ XAS and JMS. Dart-throwing motion in patients with scapholunate instability: a dynamic fourdimensional computed tomography studyo Title. *JHS*. 2014;
25. Calfee R, Leventhal E, Wilkerson J, Moore D, Akelman E, Crisco J. Simulated Radioscapholunate Fusion Alters Carpal Kinematics While Preserving Dart Thrower ' s Motion Ryan Calfee , Evan Leventhal , Jim Wilkerson , Douglas Moore , Edward Akelman , Crisco Joseph Paper No . 366 • 54th Annual Meeting of the Orthopaedic Rese. In: meeting of the Orthopaedic reserch society. 2005. p. 53648.
26. Mitsukane M, Tanabe H, Sugama K, Suzuki Y, Tsurumi T. Test-retest reliability of goniometric measurements of the range of dart-throwing motion. *J Phys Ther Sci*. 2019;31(3):236–41.
27. Vardakastani V, Bell H, Mee S, Brigstocke G, Kedgley AE. Clinical measurement of the dart throwing motion of the wrist: variability, accuracy and correction. *J Hand Surg Eur* Vol. 2018;43(7):723–31.
28. Kasubuchi K, Dohi Y, Fujita H, Fukumoto T. Reliability and responsiveness of a goniometric device for measuring the range of motion in the dart-throwing motion plane. *Physiother Theory Pract* [Internet]. 2019;35(3):298–304. Available from: <https://doi.org/10.1080/09593985.2018.1442537>

29. Thomas D, Zanin D. Rééducation du poignet traumatique. In: EMC - Kinésithérapie - Médecine physique - Réadaptation 2016. 2020. p. 1-16 article 26-220-A.
30. Tran BN, Yano S, Kondo T. Muscle synergy analysis in dart throwing. Proc Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc EMBS. 2017;2534–7.
31. Werner FW, Short WH, Palmer AK, Sutton LG. Wrist Tendon Forces During Various Dynamic Wrist Motions. J Hand Surg Am [Internet]. 2010;35(4):628–32. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2010.01.006>
32. Anderson H, Hoy G. Orthotic intervention incorporating the dart-thrower's motion as part of conservative management guidelines for treatment of scapholunate injury. J Hand Ther [Internet]. 2016;29(2):199–204. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jht.2016.02.007>
33. Feehan L, Fraser T. Early controlled mobilization using dart-throwing motion with a twist for the conservative management of an intra-articular distal radius fracture and scapholunate ligament injury: A case report. J Hand Ther [Internet]. 2016;29(2):191–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jht.2016.02.012>
34. Bergner JL, Farrar JQ, Coronado RA. Dart thrower's motion and the injured scapholunate interosseous ligament: A scoping review of studies examining motion, orthoses, and rehabilitation. J Hand Ther [Internet]. 2020;33(1):45–59. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jht.2018.09.005>
35. Hagert E. Proprioception of the Wrist Joint: A Review of Current Concepts and Possible Implications on the Rehabilitation of the Wrist. J Hand Ther [Internet]. 2010;23(1):2–17. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jht.2009.09.008>
36. Werner FW, Sutton LG, Basu N, Short WH, Moritomo H, St-Amand H. Scaphoid tuberosity excursion is minimized during a dart-throwing motion: A biomechanical study. J Hand Ther [Internet]. 2016;29(2):175–82. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jht.2016.02.006>

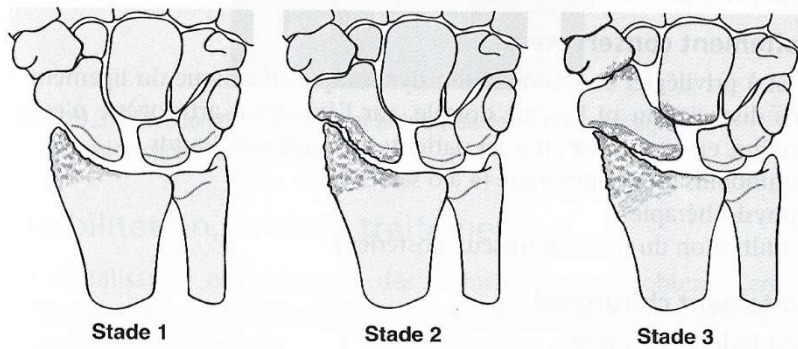
37. Kaufman-Cohen Y, Levanon Y, Friedman J, Yaniv Y, Portnoy S. Home exercise in the dart-throwing motion plane after distal radius fractures: A pilot randomized controlled trial. *J Hand Ther.* 2020;1–7.
38. Feehan L, Fraser T. Dart-throwing motion with a twist orthoses: Design, fabrication, and clinical tips. *J Hand Ther [Internet].* 2016;29(2):205–12. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jht.2015.12.009>
39. Esplugas M, Garcia-Elias M, Lluch A, Llusá Pérez M. Role of muscles in the stabilization of ligament-deficient wrists. *J Hand Ther [Internet].* 2016;29(2):166–74. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jht.2016.03.009>
40. MARIEB E.N. (2005) *Anatomie et physiologie humaine*. Pearson education
41. Tang JB, Gu XK, Xu J, Gu JH. In vivo length changes of carpal ligaments of the wrist during dart-throwing motion. *J Hand Surg Am.* 2011;36(2):284–90.
42. Bertinchamp U. Concept PNF : facilitation proprioceptive neuromusculaire (concept Kabat-Knott-Voss). EMC - Kinésithérapie - Médecine Phys - Réadaptation [Internet]. 2010;6(2):1–9. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S1283-0887\(10\)51680-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1283-0887(10)51680-3)
43. Chen Z. A novel staged wrist sensorimotor rehabilitation program for a patient with triangular fibrocartilage complex injury: A case report. *J Hand Ther [Internet].* 2019;32(4):525–34. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jht.2018.04.003>
44. Baladron R.(2009) *Rééducation après disjonction scapho-lunaire*. mémoire DIU , site du GEMSOR
45. Thomas Dominique. « Dart throwing motion » et PNF dans la rééducation des instabilités du poignet. congrès de la société française de chirurgie de la main; 2012 p. 2012.
46. Papaloïzos M, Chick G.(2015) *Pathologies chroniques de la main et du poignet..* 86–93 p. Elsevier Masson
47. Boutan M, Dominique T, Sylvain C, Vincent C, Moutet Francois.(2013) *Rééducation de la main et du poignet*. Elvesier M.

Annexe 1 : SLAC wrist [46]



Aspect radiologique d'une lésion scapholunaire au stade statique

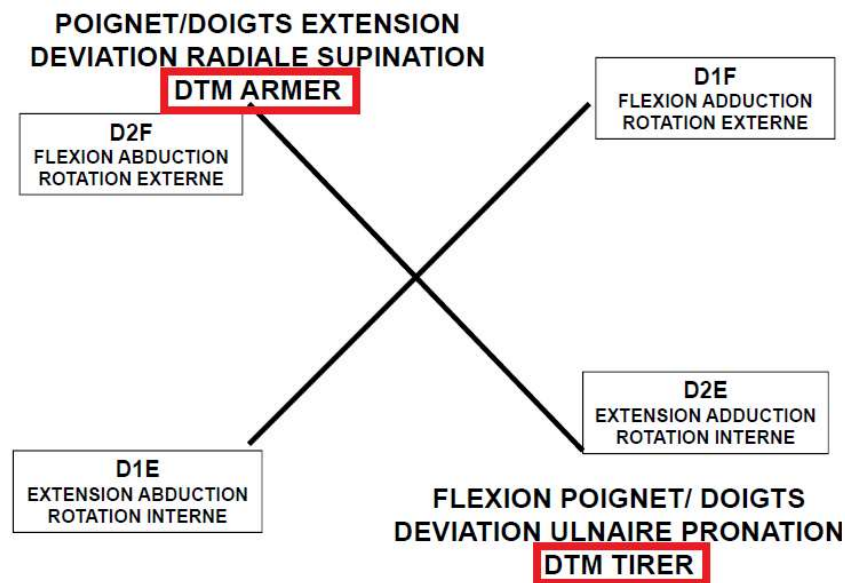
- a.signe de l'anneau
- b.diastasis scapho lunaire
- c.DISI



SLAC wrist

- Stade 1.arthrose styloscaphoïdienne
- Stade 2.arthrose radioscaphoïdienne
- Stade 3.arthrose radioscaphoïdienne et lunocapitate

Annexe 2 : Schémas du membre supérieur en PNF [6][42]



La PNF est un concept de traitement, avec ses principes de traitement et de facilitation et des techniques spécifiques :

Les principes de traitement.

- Approche positive
- Mobilisation du potentiel de réserves (ressources)
- Traitement du patient dans sa globalité
- Traitement de manière fonctionnelle
- Application d'un programme intensif
- Variation des activités et des positions
- Sans douleurs
- Évaluation et définitions des objectifs de traitements
- Réévaluation permanente

Les principes de facilitation.

Stimulations proprioceptives

- Schémas du mouvement
- Stimulation tactile / contact manuel
- Position du patient
- Position du thérapeute et sa dynamique corporelle
- Résistance optimale
- Irradiation – Overflow (débordement d'énergie)
- Étirement (préparatoire) / Stretch
- Timing
- Traction/ Approximation

Stimulations extéroceptives

- Stimulation tactile
- Feedback visuel
- Stimulation verbale

Techniques.

| Techniques pour les agonistes | Techniques pour les antagonistes |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Initiation rythmique | Renversement dynamique |
| Réplication | Contracter/Relâcher |
| Renversement des agonistes | Tenir/Relâcher |
| Stretch | Stabilisation inversée |
| Tenir | |

« Le cerveau ne connaît pas un muscle mais un mouvement » *Beevor*

Annexe 3 : La thérapie miroir [47]

[Photo personnelle]

Elle fait partie du programme d'imagerie motrice, basé sur la plasticité cérébrale et le remaniement cortical.

Il comprend 3 phases selon Moseley qui permettent un « réentraînement » du cerveau :

- **Reconnaissance de latéralité** : activation du cortex prémoteur

Le patient observe des photos de main droite ou gauche sous différentes orientations, et doit reconnaître la latéralité de la main proposée.

- **Mouvements imaginés** : activation du cortex prémoteur et cortex moteur et sensitif primaire

Une photo de main dont la latéralité correspond au côté atteint est montrée au patient. Il doit imaginer reproduire la position de l'image sans mouvement.

- **Thérapie miroir** : activation du cortex prémoteur mais surtout du cortex moteur primaire

La main atteinte du patient est placée dans une boîte miroir. Le patient observe le reflet de la main non atteinte dans le miroir. Il effectue des mouvements simples synchrones des 2 mains, notamment le DTM. Il peut effectuer des mouvements plus complexes « connus ». Elle permet de tromper le cerveau afin de réconcilier le feedback visuel et la commande motrice

