



Mémoire
DIU Européen de Rééducation et d'Appareillage en Chirurgie de la Main
Session 2021-2023

Bases de l'ENMG
dans le syndrome du canal carpien
à destination des rééducateurs de la main

Pierre ZELTNI
Médecin MPR
Strasbourg

Membres du Jury :

Dr Alexandra FORLI
M. Denis GERLAC
Dr Steven ROULET
Mme Julie THOUVENIN

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu Alexandra FORLI et Denis GERLAC pour l'organisation parfaite de ce diplôme, tant dans le contenu (théorique et pratique) que dans l'encadrement convivial.

Je souhaiterais également remercier tous les professionnels qui ont eu la gentillesse de me recevoir dans les différents stages et chez qui j'ai continué ma découverte de cet univers passionnant de la rééducation et de l'appareillage de la main.

Je veux également remercier le Dr Emilien DELMONT, Praticien Hospitalier en neurologie au CHU de la Timone (Service des Maladies Neuromusculaires) pour la relecture de ce mémoire.

Un merci personnel pour ma collègue Sabine qui m'a aidé à mettre en forme ce travail...

Pour finir, un immense merci à Julie, qui a su patiemment gérer notre chère petite famille lors de mes nombreuses absences, occasionnées par ce diplôme...

1.	INTRODUCTION	4
2.	PRESENTATION DE L'EXAMEN ET DU MATERIEL.....	5
2.1	Présentation de l'examen	5
2.2	Présentation du matériel.....	5
3.	ETUDE DE LA CONDUCTION NERVEUSE MOTRICE	7
3.1	Principe.....	7
3.2	Objectifs	7
3.3	Technique	7
3.3.1	Recueil	7
3.3.2	Stimulation	8
3.4	Etude de la conduction motrice étagée	8
3.4.1	Stimulation distale.....	8
3.4.2	Stimulation proximale	10
3.4.3	Enregistrement d'une réponse motrice	11
3.5	Paramètres étudiés	12
3.5.1	Amplitude et Surface de la réponse	12
3.5.1.1	Mesure d'amplitude distale	12
3.5.1.2	Mesure de la surface de la réponse	12
3.5.1.3	Calcul des variations d'amplitudes et de surface	13
3.5.2	Latence distale et mesure de la vitesse de conduction motrice	13
3.5.2.1	Mesure de la latence distale	13
3.5.2.2	Mesure de vitesse de conduction motrice (VCM)	13
3.5.3	Tableau récapitulatif des paramètres de l'étude de Conduction Motrice.....	14
3.6	Interprétation de la conduction nerveuse motrice dans le cadre d'un syndrome du canal carpien.....	15
3.6.1	Allongement de la latence distale motrice sur le nerf médian	15
3.6.2	Réduction d'Amplitude distale (voire abolition de la réponse)	17
3.6.3	Ralentissement segmentaire de la Vitesse de Conduction Motrice (VCM) et bloc de conduction moteur	17
3.7	Autre méthode utilisant la conduction motrice : comparaison de la latence distale motrice sur le 2 ^e lombical et sur le 2 ^e interosseux	18
4.	ETUDE DE LA CONDUCTION NERVEUSE SENSITIVE	19
4.1	Principe	19
4.2	Objectifs	19
4.3	Technique « classique » pour l'étude de la conduction nerveuse sensitive du nerf médian : présentation de la méthode orthodromique	20
4.3.1	Recueil	20

4.3.2	Stimulation	20
4.4	Paramètres étudiés	22
4.4.1	Calcul de la Vitesse de Conduction Sensitive.	22
4.4.2	Amplitude de la réponse	22
4.4.3	Tableau récapitulatif des paramètres mesurés lors de l'étude de la conduction sensitive.....	23
4.5	Interprétation de la conduction nerveuse sensitive dans le cadre d'un Syndrome du Canal Carpien	24
4.5.1	Ralentissement de la Vitesse de Conduction Sensitive (VCS)	24
4.5.2	Diminution d'amplitude du potentiel sensitif	25
4.6	Autres techniques d'étude de la conduction nerveuse sensitive couramment utilisées (liste non exhaustive)	27
4.6.1	Etude transcanalaire sensitive sur le nerf médian au 2 ^e ou 3 ^e doigt antidromique	27
4.6.2	Comparaison médio-ulnaire 4 ^e doigt orthodromique ou antidromique	28
4.6.3	La méthode centimétrique.....	30
5.	ELECTROMYOGRAPHIE DE DETECTION	31
5.1	Grands principes.....	31
5.2	Sémiologie de repos	31
5.2.1	Activité normale : (Image 10).....	31
5.2.2	Activités anormales : (Image 11)	32
5.3	Sémiologie électromyographique de contraction volontaire	34
5.3.1	Activité normale : (Image 12).....	34
5.3.2	Activité anormale : (Image 13).....	35
6.	CHRONOLOGIE HABITUELLE DES ALTERATIONS ENMG DANS LE SYNDROME DU CANAL CARPIEN	37
7.	EN PRATIQUE : L'EXPLORATION ENMG D'UN SYNDROME DU CANAL CARPIEN DANS NOTRE EXPERIENCE	38
8.	PROPOSITION D'UNE FICHE PRATIQUE SYNTHETIQUE D'INTERPRETATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES ENMG DANS LE CADRE D'UN SYNDROME DU CANAL CARPIEN.....	39
9.	CONCLUSION	40
10.	BIBLIOGRAPHIE.....	41

1. INTRODUCTION

Le syndrome du canal carpien correspond à une atteinte du nerf médian au canal carpien et constitue de loin, la plus fréquente de toutes les atteintes focales des troncs nerveux périphériques et le plus fréquent des syndromes canaux (1).

L'examen électroneuromyographique, autrement appelé ENMG ou le plus souvent EMG, est l'examen complémentaire clef de cette atteinte. S'il n'est pas obligatoire dans le diagnostic de syndrome de canal carpien, notamment des formes cliniques évidentes (2,3), il reste fortement recommandé en préopératoire (4), en France, notamment sur le plan médico-légal (5). De plus, l'EMG reste indispensable à la reconnaissance d'une maladie professionnelle (6).

Par ailleurs, en dépit d'une sensibilité et d'une spécificité limitées (7)(très variables selon les études (8)), l'ENMG reste l'examen complémentaire qui permet le mieux d'objectiver la souffrance du nerf médian dans sa traversée du canal carpien (9–11), d'évaluer la sévérité de l'atteinte, mais également de rechercher d'autres lésions nerveuses éventuellement associées.

L'interprétation de cet examen, notamment chez les professionnels qui concourent à la prise en charge des patients en rééducation de la main, est souvent vue comme ardue et obscure.

Dans ce travail, nous allons essayer de présenter rapidement l'examen et dégager quelques notions fortes, afin d'aider à la compréhension de l'examen dans un objectif très pratique.

Pour une première approche de l'ENMG, nous avons décidé de prendre le cas le plus fréquemment rencontré, à savoir le syndrome du canal carpien. Nous serons contraints d'éluder de nombreuses notions, notamment physiologiques et d'interprétation des résultats, afin de clarifier les idées. Nous illustrerons notre propos avec un maximum de photographies et de tableaux de résultats issus de notre pratique quotidienne.

De plus, il existe de nombreuses écoles et en conséquence de nombreuses techniques d'ENMG (2,12) et il est impossible d'être exhaustif. Après une approche théorique rapide sur chaque étape de l'examen, nous aborderons brièvement quelques techniques parmi les plus fréquemment utilisées, notamment dans notre expérience, puis nous donnerons quelques notions d'interprétation de résultats.

Ce travail n'étant qu'un préambule à l'interprétation de l'ENMG, nous encourageons vivement les personnes intéressées à poursuivre leur apprentissage dans ce domaine au travers de la lecture des nombreux ouvrages consacrés au sujet.

2. PRESENTATION DE L'EXAMEN ET DU MATERIEL

2.1 Présentation de l'examen :

L'électromyogramme (ou ENMG ou EMG) est un examen d'exploration fonctionnelle du système nerveux périphérique ; il permet d'évaluer le fonctionnement des nerfs et des muscles. Il est complémentaire de l'examen clinique et est réalisé par un médecin. Il comporte en fait plusieurs types de tests, chacun apportant des informations différentes.

2.2 Présentation du matériel (13)

L'appareil d'ENMG est constitué de plusieurs éléments (Image 1):

- Un **boîtier de réception**, par lequel transitent tous les signaux électriques reçus par les électrodes posées sur le patient.
- Une **dalle électronique**, cœur de l'appareil d'ENMG, avec des connections à la fois au stimulateur et à la réception, mais également au PC. Il dispose d'un tableau de commandes et de réglage.
- Une **unité centrale**, de type PC du bureau ou ordinateur portable. Elle dispose d'un logiciel dédié qui permet d'afficher les réglages et les signaux enregistrés sur l'écran. Le logiciel permet également la présentation des résultats sous la forme d'un rapport : tableaux de valeurs, tracés, commentaires...
- Un **stimulateur** bipolaire de surface (barrette ou poignée), composé d'une cathode (-) stimulatrice et d'une anode (+) de référence.
- Un **écran** et une **imprimante**,
- Des **électrodes de surface** :
 - Electrode de recueil active : Cathode : négative (-), Noire
 - Electrode de recueil de référence : Anode : positive (+), Rouge
 - Electrode de terre, afin de lutter contre le « bruit électrique » (courant de secteur, bruit électronique, environnement électrique et ondes radioélectriques...), Verte
- Des **électrodes aiguilles** ; ce sont des aiguilles concentriques, où anode et cathode sont séparées par un film isolant.
- Des **câbles** blindés, afin d'éviter les parasites électriques.

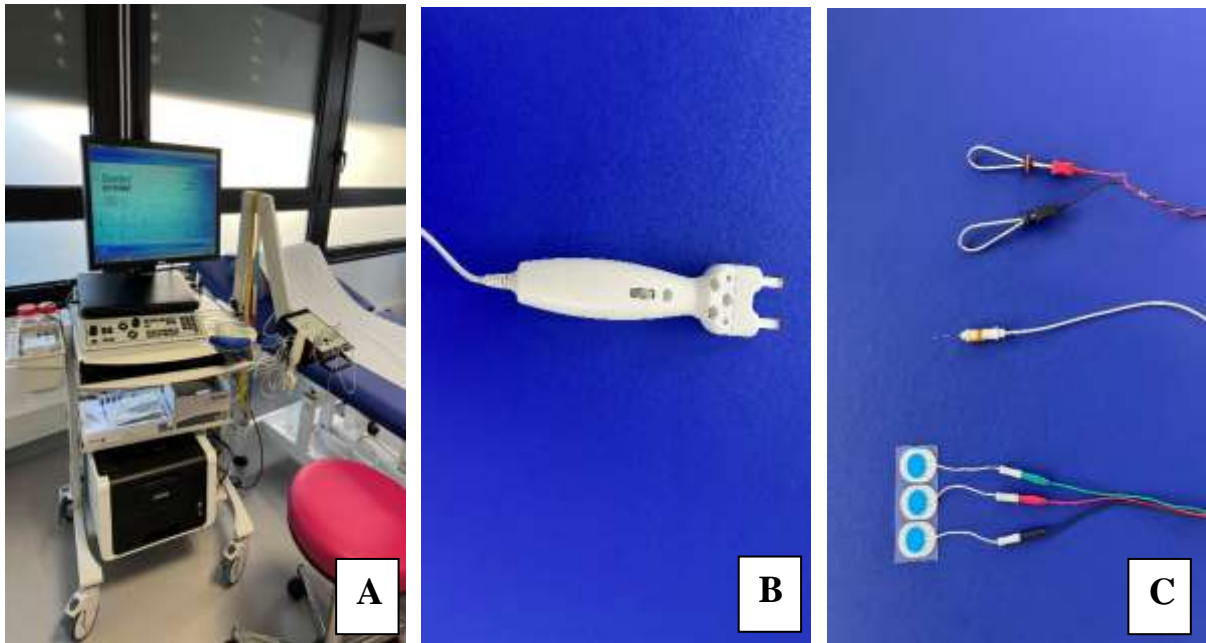


Image 1 :

A. Présentation d'un appareil ENMG. B. Stimulateur bipolaire (poignée). C. Electrodes autocollantes, aiguille-électrode et électrodes-anneaux

3. ETUDE DE LA CONDUCTION NERVEUSE MOTRICE

L'examen électrophysiologique commence habituellement par l'étude de la conduction nerveuse motrice.

3.1 Principe :

Il s'agit de délivrer une stimulation électrique à un nerf en différents points de son trajet et analyser les réponses induites dans l'un des muscles de son territoire. Cette réponse correspond à un potentiel d'action musculaire composé. On détecte les réponses musculaires obtenues par cette stimulation en différents points et on peut en analyser différents paramètres.

3.2 Objectifs :

L'étude de la conduction nerveuse motrice a pour but de dépister des anomalies de la fonction des fibres nerveuses motrices par l'analyse des réponses motrices musculaires induite par la stimulation du nerf mixte. Elle permet de rapprocher un déficit moteur, une amyotrophie, à une dysfonction du nerf ; elle permet également de localiser anatomiquement une lésion nerveuse et d'analyser les fonctions des constituants du nerf (myéline, axone) et évaluer la sévérité de l'atteinte.

3.3 Technique : (Image 2) (14)

3.3.1 Recueil

Lors de l'étude du nerf médian, la mise en place des électrodes de recueil est réalisée à l'aide d'électrodes de surface collées sur la peau en regard du muscle Court Abducteur du Pouce, de la manière suivante :

- Electrode de recueil Active (Noire), positionnée près du point moteur du muscle Court Abducteur du Pouce (à l'endroit où les principaux rameaux nerveux pénètrent dans le corps musculaire : en regard ou juste en distal de l'articulation trapézo-métacarpienne).
- Electrode de recueil Référence (Rouge), positionnée à distance, sur un relief osseux, en l'occurrence, sur l'articulation métacarpo-phalangienne du pouce.
- Electrode de terre (Verte).

NB : Le nerf est mixte (avec une composante sensitive et motrice) mais l'enregistrement sur le muscle permet d'étudier sélectivement la conduction des fibres motrices.

3.3.2 Stimulation

L'activation du nerf est réalisée en lui délivrant une stimulation électrique, de durée brève (de 0.2 à 1 milliseconde (ms) en général), et d'intensité supramaximale (correspondant au seuil moteur [première réponse macroscopique visible] + 10-20%) afin d'activer toutes les fibres du nerf (en général de l'ordre de 10-20 milliampères (mA) grâce au stimulateur bipolaire de surface en différents points de son trajet.

La cathode (-) est placée en regard du nerf, vers l'endroit où l'on veut faire aller l'impulsion nerveuse, c'est-à-dire vers le muscle, proche de l'électrode active (détection) et doit être distale par rapport à l'anode (+), qui est proximale, également placée en regard du nerf.

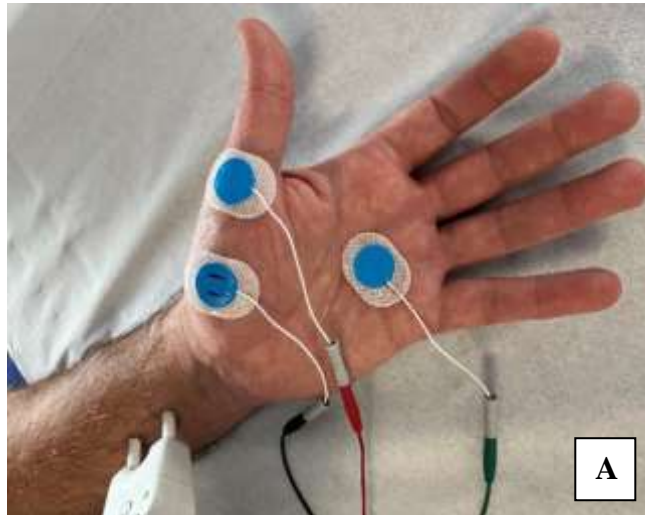
3.4 Etude de la conduction motrice étagée :

3.4.1 Stimulation distale (Image 2)

Elle correspond à la stimulation du nerf en un point distal : pour le nerf médian, lors de l'étude de la traversée du canal carpien, la stimulation se fait à la face antérieure du poignet, entre les tendons du Long Palmar et du Fléchisseur Radial du Carpe.

Une distance fixe de l'électrode d'enregistrement active permet une bonne reproductibilité des résultats (dans notre expérience, distance fixe de 8cm).

La stimulation provoque un mouvement d'abduction du pouce ; attention à une stimulation trop médiale ou trop forte, pouvant stimuler le nerf ulnaire au poignet.



A



B

Image 2 :

A. Positionnement des électrodes et stimulation distale du nerf médian au canal carpien. B. Réponse obtenue : Amplitude 14.7mV et latence 3.56ms, dans les limites de la normale

3.4.2 Stimulation proximale : (Image 3)

Pour le nerf médian, la stimulation plus proximale se fait au niveau du coude, dans la gouttière bicipitale médiale, juste au-dessus du pli du coude.

La stimulation provoque un mouvement de pronation et de flexion radiale du poignet, mais il faut faire attention à une stimulation trop proximale et trop médiale pouvant activer le nerf ulnaire.

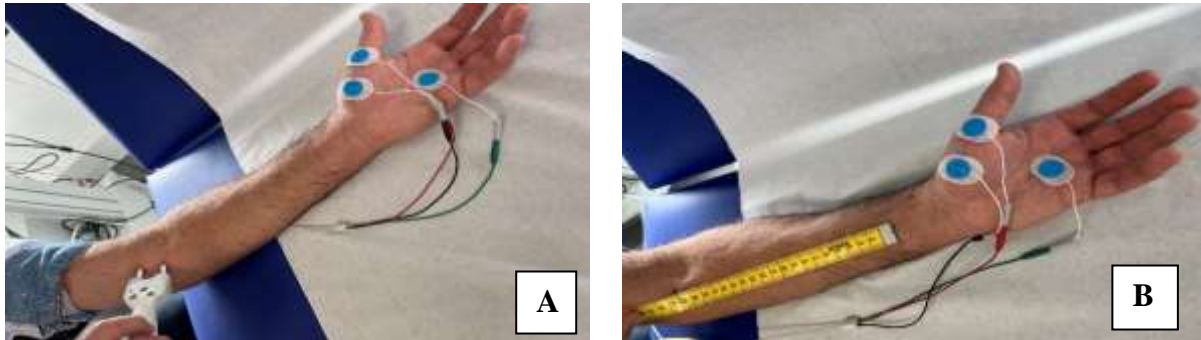


Image 3 :

A. Stimulation distale du nerf médian au coude. B. Mesure de la distance entre les 2 points de stimulation. C. Réponse obtenue (Amplitudes et VCM (51 m/s) normales)

3.4.3 Enregistrement d'une réponse motrice :

L'enregistrement d'une réponse motrice, au niveau du muscle Court Abducteur du Pouce, est la somme des contributions (ou PUM : Potentiel d'Unité Motrice) de chacune des unités motrices activées par la stimulation du nerf. On obtient deux réponses motrices : la réponse motrice distale, après stimulation distale (Schéma 1) et une deuxième réponse, après stimulation plus proximale.

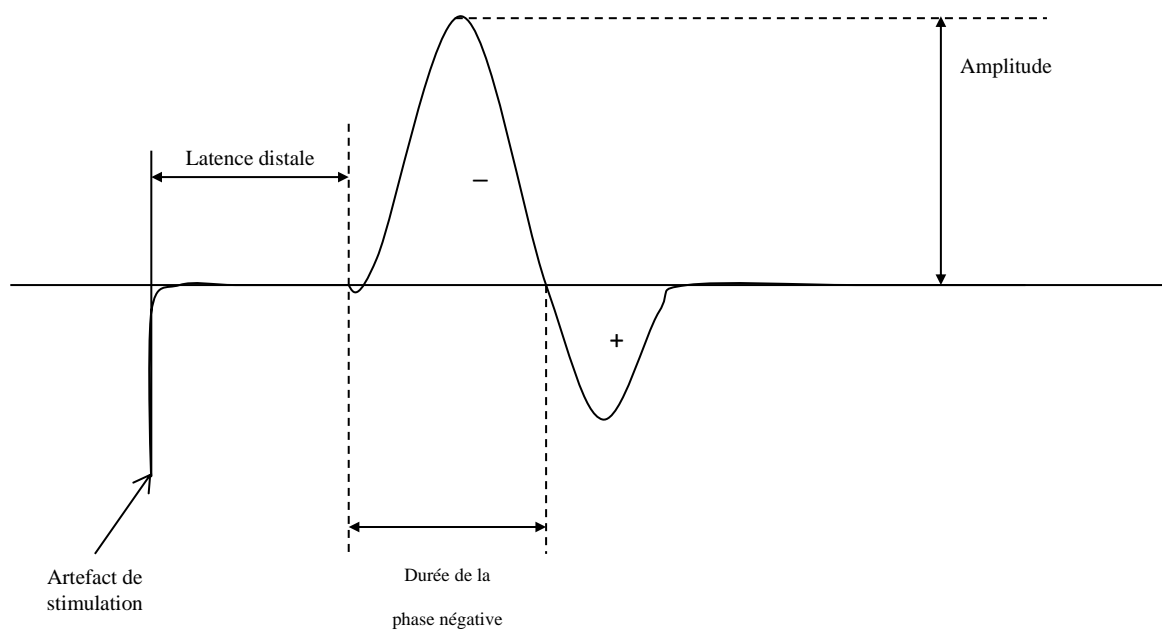


Schéma 1 : Paramètres mesurés lors de l'étude de la conduction motrice : stimulation distale.

3.5 Paramètres étudiés : (Schéma 1)

Deux types de paramètres sont mesurés pour chaque réponse enregistrée

3.5.1 Amplitude et Surface de la réponse :

Ces paramètres dépendent du nombre de fibres musculaires activées. Leur mesure vise à apprécier le nombre de fibres musculaires fonctionnelles dans le muscle enregistré ainsi que le nombre de fibres nerveuses fonctionnelles dans le segment nerveux compris entre le point de stimulation et le point d'enregistrement.

3.5.1.1 *Mesure d'amplitude distale :*

On la mesure le plus fréquemment de la ligne de base au pic négatif du potentiel moteur (au-dessus de la ligne de base). On considère que l'amplitude est proportionnelle au nombre de fibres musculaires répondant aux fibres nerveuses stimulées (d'où la nécessité d'une stimulation supramaximale) et à leur synchronisation.

Il est à noter que l'amplitude des réponses motrices dépend de nombreux facteurs (conditions d'enregistrement, variabilité entre les individus...) et la sensibilité diagnostique n'est pas aussi bonne que celle des latences de conduction. L'amplitude distale ne peut véritablement servir à estimer une perte de fibres musculaires que par comparaison au côté opposé, en cas d'atteinte unilatérale, ou à une valeur mesurée lors d'un examen précédent. Dans les autres cas, l'appréciation des anomalies devra être affinée par la recherche d'anomalies EMG dans le muscle considéré, ici le muscle Court Abducteur du Pouce.

3.5.1.2 *Mesure de la surface de la réponse :*

La surface de la réponse, et notamment la surface négative (au-dessus de la ligne de base) reflète mieux que l'amplitude distale le nombre de fibres musculaires activées par la stimulation nerveuse. En effet, une simple dispersion des vitesses de conduction des fibres nerveuses peut réduire l'amplitude de la réponse motrice, sans pour autant que le nombre de fibres fonctionnelles et la surface soient réduits : la réponse s'étale et perd alors en amplitude ce qu'elle gagne en durée, la surface restant inchangée.

Les valeurs absolues de surface ont peu d'utilité ; ce qui nous intéresse, c'est de pouvoir comparer ces valeurs lors du déplacement proximal du point de stimulation par exemple.

3.5.1.3 Calcul des variations d'amplitudes et de surface

Il est plus commode d'exprimer directement les résultats en terme de variation d'amplitude ou de surface sur le segment nerveux considéré, en pourcentage. Variation d'amplitude = $(\text{amplitude proximale} - \text{amplitude distale}) \times 100 / \text{amplitude distale}$. Une variation d'amplitude de -20% signifie que l'amplitude de la réponse à la stimulation proximale est inférieure de 20% à l'amplitude de la réponse à la stimulation distale du segment nerveux étudié.

3.5.2 Latence distale et mesure de la vitesse de conduction motrice

Mesurée en millisecondes (ms), elle correspond au délai d'apparition de la réponse après la stimulation. On l'appelle latence distale pour la réponse distale ; il s'agit du temps écoulé entre le début du stimulus porté en un point distal du nerf et le début de la réponse motrice.

La latence distale permet d'apprécier la vitesse de conduction dans la partie terminale des fibres nerveuses motrices, même si ce temps de conduction est composite et correspond à la somme du temps de passage de l'influx nerveux jusqu'à la synapse neuromusculaire (dans la partie terminale des fibres nerveuses motrices) mais également le temps d'activation de la fibre motrice au niveau de la synapse. La latence motrice ne permet donc pas de calculer directement la vitesse de l'influx nerveux.

3.5.2.1 Mesure de la latence distale :

La latence se mesure au départ (au pied) de la réponse, à l'endroit où le potentiel décroche de la ligne de base ; ce point de la réponse correspond donc à la naissance sous l'électrode des premiers potentiels d'action musculaires, provoqués par les fibres nerveuses les plus rapides.

3.5.2.2 Mesure de vitesse de conduction motrice (VCM) :

On peut également calculer la *vitesse de conduction motrice (en m/s)* du segment nerveux compris entre les deux points de stimulation (distal et proximal), grâce à la formule mathématique : $VCM = \text{distance mesurée} / \text{différence de latence des 2 réponses}$. La mesure de la distance entre deux positions de la cathode (distale et proximale) est mesurée au mètre ruban avec la meilleure précision possible afin d'éviter les erreurs de mesure et du coup les erreurs de calcul de vitesses.

Plusieurs facteurs influencent la vitesse de conduction d'une fibre nerveuse et notamment trois principaux : la température (perte de 1°C correspondant à une perte de vitesse de 2 m/s), le calibre des fibres (plus le diamètre d'une fibre est élevé, plus la vitesse de conduction est

rapide), la myélinisation d'une fibre (plus la gaine de myéline est épaisse, plus la vitesse de conduction est rapide).

3.5.3 Tableau récapitulatif des paramètres de l'étude de Conduction Motrice

PARAMETRES ETUDIES	VALEURS ATTENDUES (données à titre indicatif)
Latence Distale Poignet-Court Abducteur du Pouce	<3.7-3.8ms
Amplitude	>6mV
VCM Coude-Poignet	>45-48m/s
Variation d'Amplitude Stimulation proximale / Stimulation distale	<20%

Tableau 1 : Paramètres mesurés lors de l'étude de la conduction motrice : stimulation distale puis proximale

3.6 Interprétation de la conduction nerveuse motrice dans le cadre d'un syndrome du canal carpien (15)

3.6.1 Allongement de la latence distale motrice sur le nerf médian (Image 4)

Si on élimine dans un premier temps les causes techniques et/ou physiologiques, un allongement de la latence distale au-delà des valeurs normales indique la présence d'une dysfonction des fibres les plus rapides du nerf médian.

C'est historiquement la première anomalie électrophysiologique décrite (16) par Simpson en 1956.

Il s'agit généralement d'un *ralentissement de la conduction distale des fibres nerveuses rapides*.

Trois phénomènes peuvent notamment s'associer dans le cas d'un syndrome du canal carpien :

- Par démyélinisation distale (neuropathie, polyradiculonévrite...)
- Par dysfonction membranaire axonale
- Par l'effet physique d'une compression du nerf entre le point de stimulation distal et le muscle Court Abducteur du Pouce (réduction du calibre axonal, résistance à l'établissement des courants locaux)

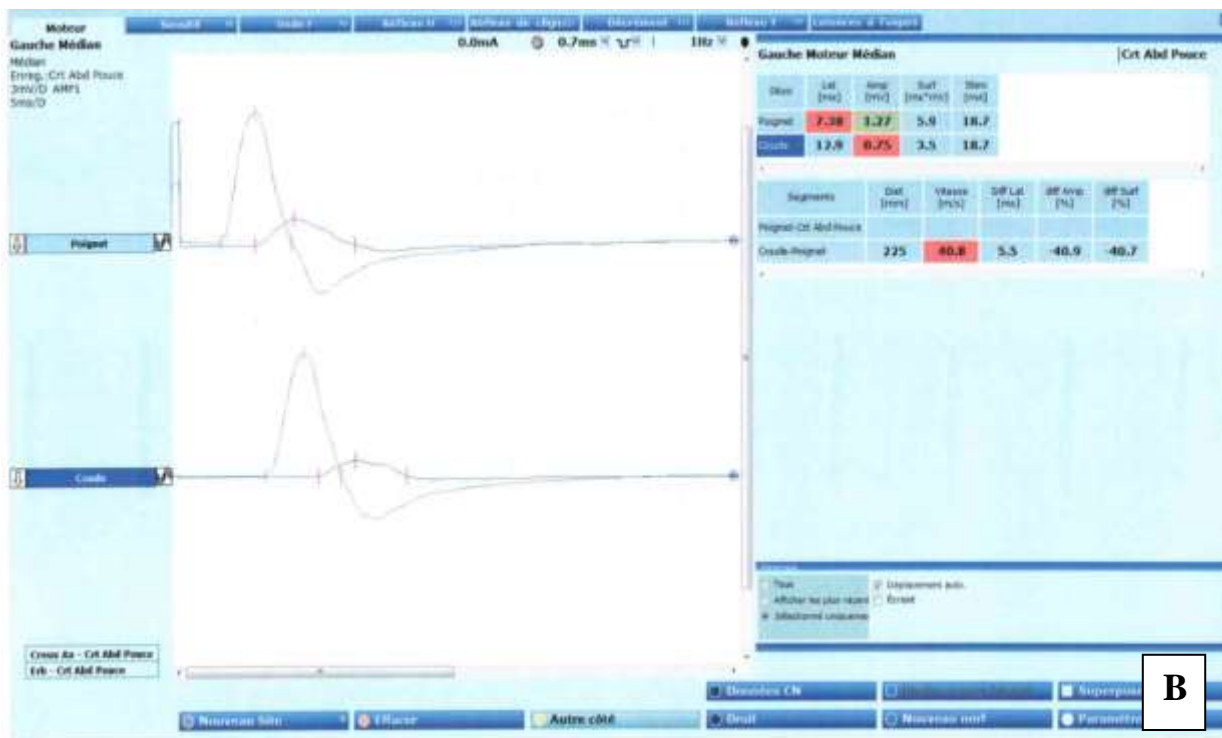
Il peut également s'agir d'une interruption de la conduction des fibres nerveuses motrices les plus rapides :

- Par dégénérescence axonale
- Par simple suspension de leur conduction

La dernière cause de ralentissement peut être une séquelle d'atteinte ancienne, y compris lors de canaux carpiens opérés, avec remyélinisation imparfaite ou repousse d'axones de calibre inférieur au calibre initial.



A



B

Image 4 :

A. Augmentation de la latence motrice distale (5.70ms) avec conservation d'une amplitude normale (8.2mA). B. Augmentation de la latence distale motrice distale (7.38ms) avec réduction de l'amplitude distale (1.27mV) ; en gris, comparaison avec le côté controlatéral normal.

3.6.2 Réduction d'Amplitude distale (voire abolition de la réponse)

Après élimination d'une cause technique, la cause la plus fréquente d'une réduction d'amplitude distale est *l'atteinte axonale*.

La réduction du nombre de fibres nerveuses au sein du nerf testé (c'est-à-dire le nombre d'unités motrices fonctionnelles) est responsable de la réduction du nombre de fibres musculaires participant à la réponse.

Une confirmation est possible par l'électromyographie de détection et l'association d'anomalies de la conduction sensitive est possible (dans le cas d'une atteinte axonale motrice et sensitive). Il existe également d'autres causes de réduction de l'amplitude distale : blocage de la conduction distale (blocs de conduction distaux, défaut de la transmission neuromusculaire, atteinte myopathique...).

3.6.3 Ralentissement segmentaire de la Vitesse de Conduction Motrice (VCM) et bloc de conduction moteur :

Dans le syndrome du canal carpien, on ne constate habituellement pas d'anomalie de conduction motrice sur le nerf médian à l'avant-bras. Pourtant, il arrive rarement que cette vitesse de conduction motrice soit réduite de manière minimale (moins de 30% de la normale) (17).

On explique ce ralentissement sus-lésionnel par une perte de fonction des fibres les plus rapides du nerf.

De même, dans un syndrome du canal carpien, on ne doit pas retrouver de bloc de conduction moteur (défini par une réduction de la taille de la réponse motrice proximale d'au moins 20% par rapport à la réponse distale), qui pourrait être le signe d'une démyélinisation focale (altération de la conduction saltatoire), d'une dysfonction axonale localisée ou bien d'une interruption axonale récente (traumatique, ischémique).

3.7 Autre méthode utilisant la conduction motrice : comparaison de la latence distale motrice sur le 2^e lombrical et sur le 2^e interosseux (18,19)

Cette méthode consiste à comparer la latence distale motrice avec un même enregistrement palmaire au niveau du 2^e espace intermétacarpien, afin d'enregistrer l'activité sur le muscle 2^e lombrical (innervation par le nerf médian) puis le muscle 2^e interosseux palmaire (innervation par le nerf ulnaire). Une différence de latence significative ($>0.5\text{ms}$) serait un indicateur sensible de syndrome du canal carpien, notamment dans les syndromes du canal carpien sévères avec abolition de la réponse motrice.

4. ETUDE DE LA CONDUCTION NERVEUSE SENSITIVE

La deuxième étape de l'examen électrophysiologique est en général l'étude de la conduction nerveuse sensitive. Cette étude est orientée en fonction de l'examen clinique et en fonction des résultats de la conduction motrice. Cet examen doit être comparatif et bilatéral.

4.1 Principe :

Cette étude correspond à l'analyse de la réponse d'un nerf à la stimulation de l'une de ses branches sensibles. Elle consiste à délivrer une stimulation électrique à un nerf en différents points de son trajet et analyser les réponses induites sur le trajet de ce nerf par des électrodes de surface collées sur la peau, en regard de ce trajet. Il existe deux méthodes pour obtenir un potentiel sensitif :

- méthode orthodromique : stimulation distale du nerf sensitif et recueil sur un point plus proximal du nerf (sens physiologique de conduction des fibres sensibles). Méthode utilisée le plus souvent pour les nerfs médian et ulnaire.
- méthode antidromique : stimulation proximale du nerf sensitif et recueil sur un point plus distal du nerf (sens opposé au sens physiologique de conduction des fibres sensibles)

4.2 Objectifs :

Il s'agit de mettre en évidence une dysfonction des fibres nerveuses sensibles qui puisse rendre compte des altérations de la sensibilité éprouvées par le patient. Le deuxième objectif, très important dans le syndrome du canal carpien, est de dépister les atteintes des nerfs. L'enregistrement des potentiels sensitifs permet en effet de détecter une altération des fibres nerveuses périphériques avec une meilleure sensibilité que l'étude des conductions motrices, probablement car les fibres sensibles sont plus souvent et plus précocement altérées que les motrices (20).

4.3 Technique « classique » pour l'étude de la conduction nerveuse sensitive du nerf médian : présentation de la méthode orthodromique (la méthode antidromique peut également être réalisée) (Image 5) (21)

4.3.1 Recueil

Les électrodes de surface sont collées sur la peau en regard du trajet nerveux :

- Electrodes de recueil au poignet, entre les tendons Fléchisseur Radial du Carpe et Long Palmaire. L'électrode peut être déplacée afin de trouver la position où l'amplitude du potentiel sensitif est maximale. L'espacement optimal entre les deux électrodes est d'environ 3cm.
- Electrode de terre

4.3.2 Stimulation

Le nerf est activé en lui délivrant une stimulation électrique, de durée brève (de 0.2 ms en général). L'intensité est d'abord sous-maximale pour la recherche de la meilleure position des électrodes sur le nerf puis supramaximale pour obtenir la réponse d'amplitude maximale.

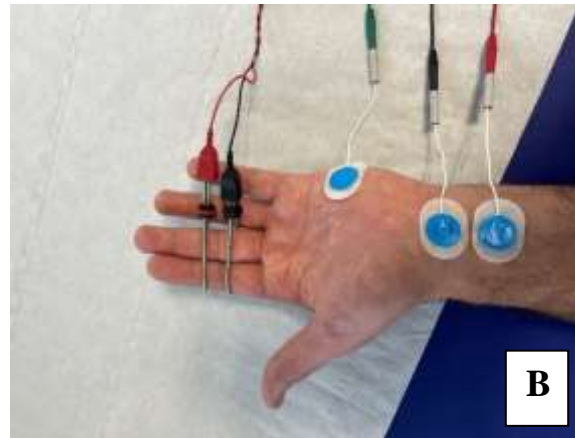
La cathode est placée vers l'endroit où l'on veut faire aller le potentiel, c'est-à-dire le plus proche des électrodes d'enregistrement.

Dans le cas du nerf médian, la stimulation s'effectue à la paume de la main, dans le 2^e espace interosseux, entre les 2^e et 3^e métacarpiens, le plus distalement possible, afin d'éviter de stimuler les branches motrices des nerfs médian et ulnaire. Le patient ressent une sensation irradiant sur les faces opposées de l'index et du majeur.

On peut également effectuer la stimulation par l'intermédiaire de bagues-anneaux.



A



B



C

Image 5 : Technique d'étude de la conduction nerveuse sensitive du nerf médian
A. Stimulation du nerf médian au niveau du 2^e espace interosseux. B. Autre méthode : stimulation du nerf médian par des électrodes anneaux sur les 2^e et 3^e doigts. C. Réponse obtenue dans les limites de la normale : Amplitude : 25.1µV et Vitesse de conduction sensitive : 55.3m/s

4.4 Paramètres étudiés :

Deux types de paramètres sont mesurés pour chaque réponse enregistrée :

4.4.1 Calcul de la Vitesse de Conduction Sensitive.

Après mesure de la latence de la réponse, mesurée en millisecondes (ms), elle correspond au délai d'apparition de la réponse après la stimulation. Comme elle dépend avant tout de la distance entre les points de stimulation et de recueil, on peut mesurer la distance au mètre-ruban entre le centre de la cathode stimulatrice et le centre de l'électrode d'enregistrement la plus proche (électrode active).

On peut ainsi calculer la **Vitesse de conduction sensitive** (VCS, en m/s).
 $VCS = \text{distance mesurée} / \text{latence de la réponse}$

4.4.2 Amplitude de la réponse

L'**amplitude de la réponse** (en microvolt [μV]) reflète le nombre de fibres nerveuses fonctionnelles dans le segment nerveux compris entre le point de stimulation et le point d'enregistrement. L'amplitude se mesure de pic à pic.

L'amplitude des potentiels sensitifs est de l'ordre de grandeur de la dizaine de microvolts (μV), car on enregistre un potentiel d'action pour une fibre nerveuse sensitive stimulée, tandis que la stimulation d'une fibre nerveuse motrice provoque l'activation de plusieurs centaines de fibres musculaires. De ce fait, il est fréquent d'avoir besoin de recourir à un bref moyennage, afin d'extraire le signal du bruit de fond.

Il est également difficile d'effectuer une étude étagée de la conduction sensitive, comme on le fait dans la conduction motrice.

L'amplitude dépend de l'impédance cutanée et de l'épaisseur des tissus ; elle est très influencée par la profondeur du nerf et notamment par l'épaisseur du tissu adipeux. Il est à noter que diverses études ont montré que seules les fibres sensibles de gros diamètre contribuent au potentiel sensitif enregistré en surface.

L'étude de la conduction sensitive ne peut donc étudier l'état des fibres fines (myélinisées ou non), impliquées notamment dans la perception thermique ou douloureuse !

4.4.3 Tableau récapitulatif des paramètres mesurés lors de l'étude de la conduction sensitive (Tableau 2)

PARAMETRES ETUDIES	VALEURS ATTENDUES
VCS médian paume-poignet	>45-50 m/s
Amplitude sur le nerf médian	>15 μ V

Tableau 2 : Paramètres mesurés lors de l'étude de la conduction sensitive

4.5 Interprétation de la conduction nerveuse sensitive dans le cadre d'un Syndrome du Canal Carpien

4.5.1 Ralentissement de la Vitesse de Conduction Sensitive (VCS) (Image 6)

Ce ralentissement se définit par la mesure d'une valeur de VCS inférieure à la normale, ou inférieure à la valeur mesurée du côté opposé (réputé sain) ou inférieure à la valeur mesurée sur un nerf équivalent (attention au risque de sous-estimation de la VCS liés à une température cutanée basse ou à une erreur technique).

Avec l'augmentation de la latence distale motrice, ce ralentissement de la VCS figure parmi les premières anomalies électromyographiques décrites (22). Elle reste la méthode préférée de diagnostic de syndrome du canal carpien dans de nombreux laboratoires (23,24).

La VCS mesurée ne reflète que la conduction des fibres nerveuses sensibles fonctionnelles les plus rapides entre les points de stimulation et d'enregistrement.

Ce ralentissement est le plus souvent lié à un *ralentissement vrai de la conduction des grosses fibres sensibles du nerf par altération de la myéline (démýélinisation)* ou par réduction du calibre de l'axone par compression. Plus rarement, le ralentissement peut être engendré par une perte fonctionnelle des fibres myélinisées de gros diamètre à conduction rapide (par dégénérescence axonale ou par la présence d'un bloc de conduction).

Ce ralentissement de la VCS est *l'anomalie électrique la plus précoce et la plus sensible* ; on peut considérer qu'une vitesse inférieure à 45 m/s est pathologique, une vitesse normale étant supérieure à 50m/s (25).



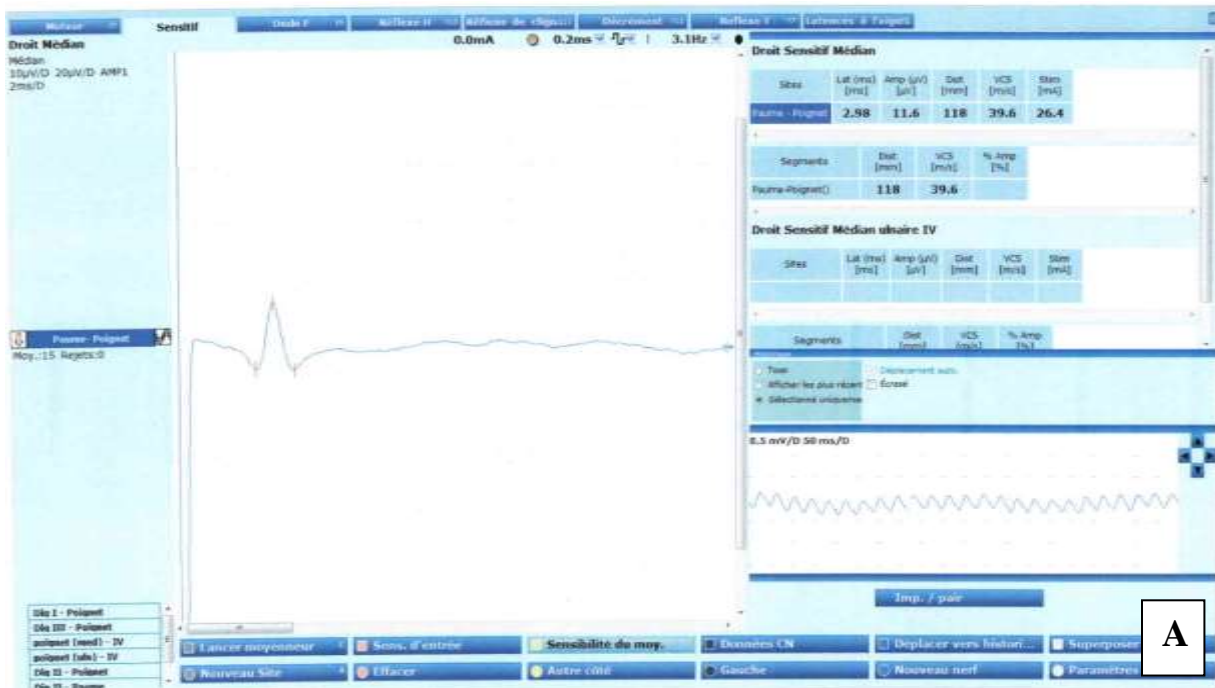
Image 6 : *Ralentissement isolé de la Vitesse de Conduction Sensitive sur le nerf médian (VCS : 42.6m/s) avec amplitude conservée (19.5μV)*

4.5.2 Diminution d'amplitude du potentiel sensitif (Image 7)

Cette diminution s'apprécie par rapport aux valeurs « normales », mais également aux valeurs mesurées sur le même nerf controlatéral (s'il est sain) et des nerfs équivalents. On accepte une différence jusqu'à 30% entre ces nerfs.

L'amplitude du potentiel sensitif est proportionnelle au nombre de fibres nerveuses sensibles de gros calibre participant à la réponse.

Dans le cas du syndrome du canal carpien, cette diminution s'interprète principalement comme une *perte axonale liée à une atteinte primitive du nerf* entre les points de stimulation et de recueil, c'est-à-dire dans sa partie distale.



A



B

Image 7 : Ralentissement de la Vitesse de Conduction Sensitive associé à une diminution de l'amplitude du potentiel sensitif sur le nerf médian. A : forme modérée (Amplitude : $11.6\mu\text{V}$ et VCS : 39.6 m/s). B : forme sévère (Amplitude : $1.37\mu\text{V}$ et VCS : 28.1 m/s) (en gris : comparaison avec le côté opposé, normal).

4.6 Autres techniques d'étude de la conduction nerveuse sensitive couramment utilisées (liste non exhaustive)

4.6.1 Etude transcanalaire sensitive sur le nerf médian au 2^e ou 3^e doigt antidromique (26) (Image 8)

Cette méthode transcanalaire, antidromique, sensée obtenir une VCS transcarpienne, consiste à stimuler le nerf sensitif d'abord au niveau du poignet puis au niveau de la paume de la main, avec un recueil au doigt par une électrode-anneau.

Cette méthode permet théoriquement d'étudier particulièrement la conduction sensitive sur la portion du canal carpien.

Pourtant, il y a plusieurs biais dans cette méthode. En effet, la zone de la paume de la main étant très restreinte, notamment sur des petites mains, il y a un risque de stimuler d'autres branches nerveuses notamment les fibres motrices du nerf médian mais également la branche palmaire profonde du nerf ulnaire, voire les fibres sensibles du nerf ulnaire. D'autre part, la distance très faible entre les sites de stimulation et de recueil rend la mesure délicate et sujette à erreurs.

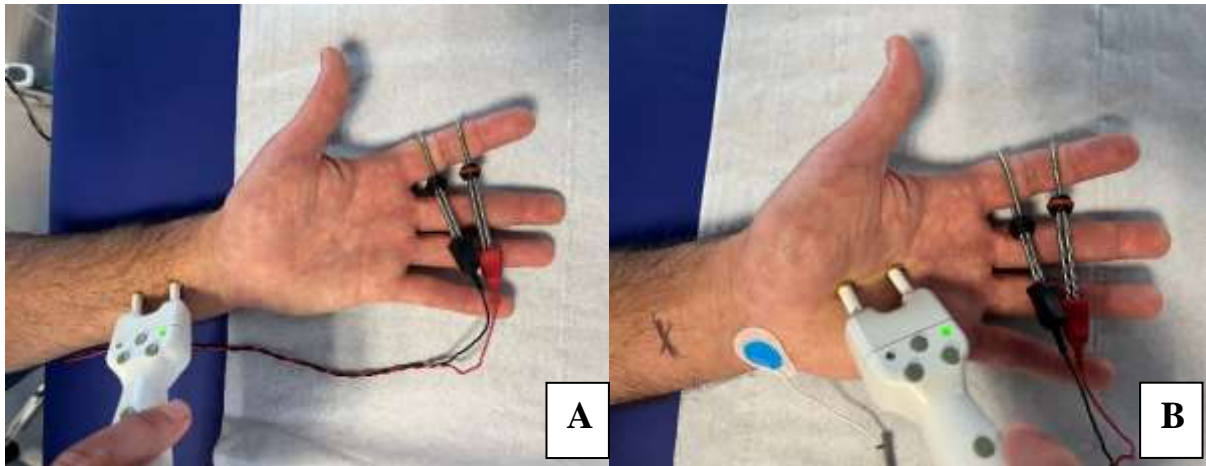


Image 8 : Technique d'étude de la conduction nerveuse sensitive transcarpienne du nerf médian

A. Stimulation du nerf médian au niveau du poignet – Recueil au 2^e doigt par électrode-anneau. B. Stimulation du nerf médian au niveau de la paume– Recueil au 2^e doigt par électrode-anneau. C. Mise en évidence d'un ralentissement de la vitesse de conduction sensitive transcarpienne (27.9 m/s)

4.6.2 Comparaison médio-ulnaire 4^e doigt orthodromique (27,28) ou antidromique (29,30) (Image 9)

Cette méthode est très fréquemment utilisée pour dépister des syndromes du canal carpien débutants, avec une conduction motrice et sensitive encore dans les limites de la normale.

La méthode consiste à comparer la conduction sensitive sur le nerf médian et sur le nerf ulnaire, le 4^e doigt étant pour moitié innervé par le nerf médian et le nerf ulnaire.

Dans la méthode orthodromique (illustrée ci-après), on garde la stimulation au 4^e doigt et on change le lieu de recueil : ici, d'abord recueil sur le nerf médian puis recueil sur le nerf ulnaire, en conservant évidemment la même distance entre la stimulation et le recueil. Une différence $>0.5\text{ms}$ aux pics est considérée comme significative et peut ainsi révéler des syndromes du canal carpien débutants.

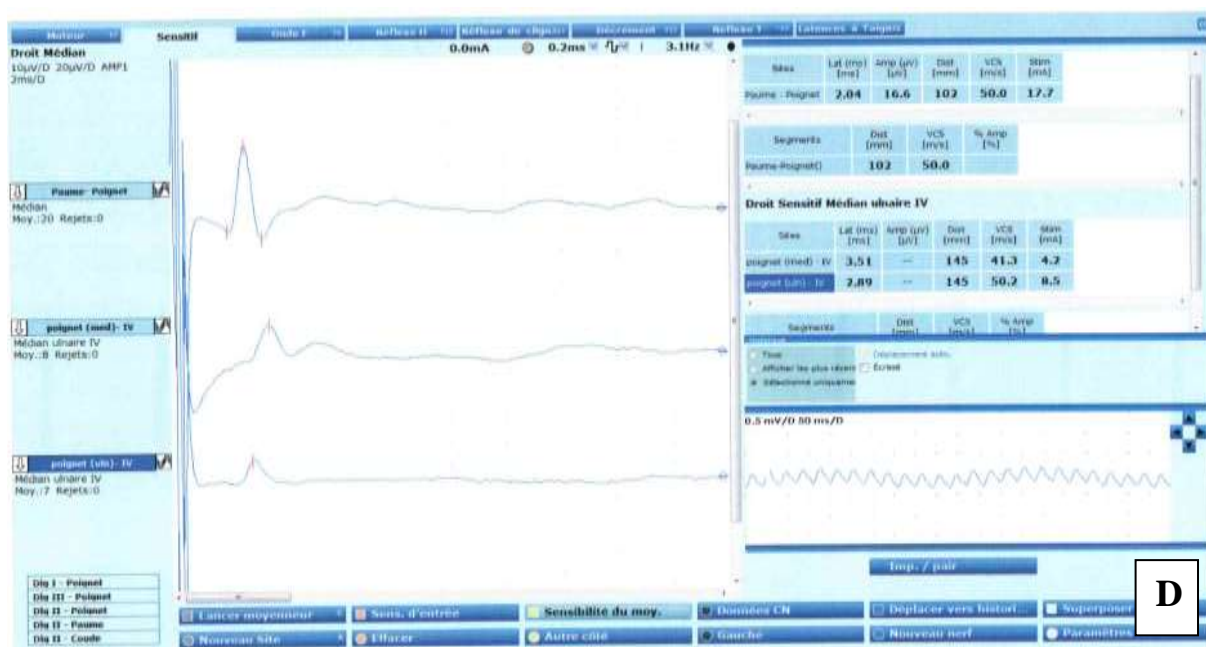
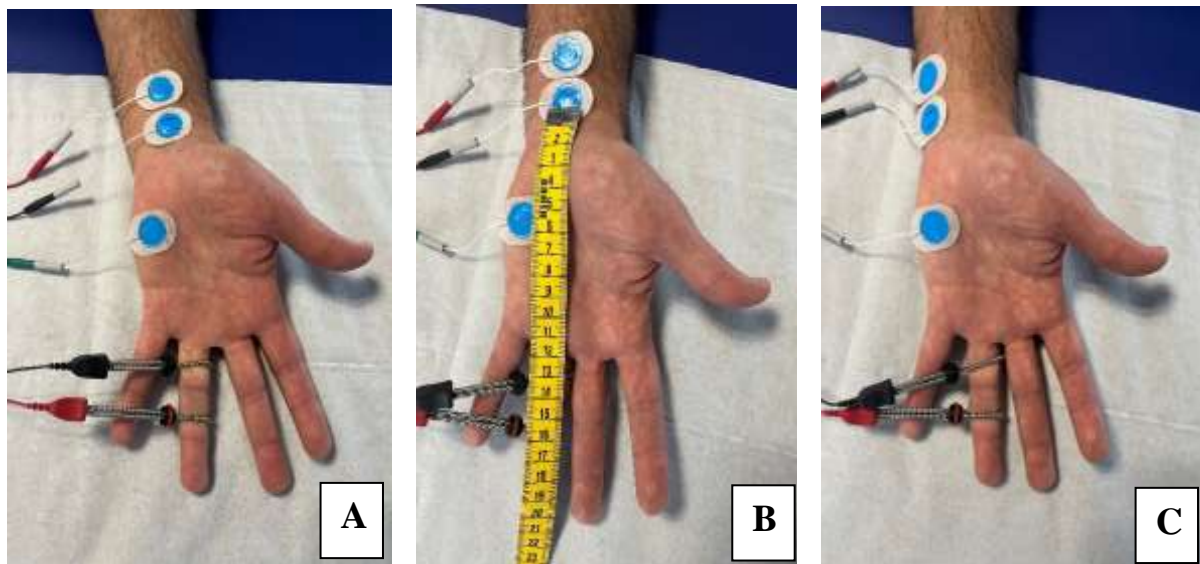


Image 9 : Technique de comparaison de la conduction nerveuse sensitive médio-ulnaire au 4^e doigt orthodromique.

A. Recueil médian au niveau du poignet- Stimulation 4^e doigt par électrode-anneau. B. Mesure de la distance. C. Après report de la même distance stimulation 4^e doigt et recueil

ulnaire au poignet. D. Exemple d'un syndrome du canal carpien débutant symptomatique, avec VCS normale mais différence médio-ulnaire significative (différence aux pics >0.5ms)

4.6.3 La méthode centimétrique

Cette méthode, antidromique, non pratiquée régulièrement dans notre activité, consiste à stimuler le nerf médian, en série de stimulations à 1 cm de distance, de la paume à la partie distale de l'avant-bras, avec recueil au 2^e ou 3^e doigt (31). Des dérivés de cette technique ont été décrites par la suite et rapportent des résultats très intéressants, notamment chez les patients présentant un syndrome du canal carpien avec des résultats électromyographiques classiques normaux (32).

5. ELECTROMYOGRAPHIE DE DETECTION

5.1 Grands principes

Le principe de l'examen électromyographique (EMG proprement dit) consiste à implanter une électrode-aiguille concentrique à usage unique dans les muscles à étudier. Le protocole et le choix des muscles étudiés est fonction de la pathologie et souvent guidé par la stimulo-détection préalable.

A chaque insertion de l'aiguille, on enregistre les activités électriques dites de repos (spontanées ou provoquées), puis les activités de contraction volontaire du muscle enregistré. L'analyse se fait de façon qualitative, à l'oreille et à l'œil.

Dans le cadre du syndrome du canal carpien, on analyse les paramètres d'enregistrement au sein du muscle Court Abducteur du Pouce.

Après avoir positionné l'aiguille dans le muscle et effectué l'analyse de repos, le patient est invité à effectuer une contraction volontaire maximale contre résistance.

5.2 Sémiologie de repos

5.2.1 Activité normale : (Image 10)

Le grand principe de l'EMG de repos normal est le silence électrique : hormis l'apparition de potentiels d'insertion de l'aiguille, si le patient est bien relâché, le muscle est électriquement silencieux.

L'explication physiologique étant que les fibres musculaires normalement innervées n'ont pas d'autre activité que celle qui leur est imposée par les fibres nerveuses.

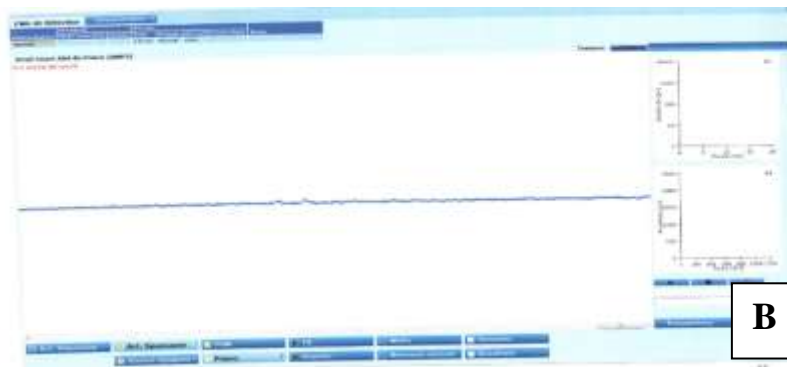


Image 10 : A. Positionnement de l'aiguille au niveau du muscle Court Abducteur du Pouce Droit. B. Enregistrement de l'activité de repos.

5.2.2 Activités anormales : (Image 11)

Dans le cadre d'un syndrome du canal carpien évolué, on peut voir et entendre, sur l'EMG de repos, des activités électriques témoignant de la décharge autonome de certaines fibres musculaires, échappant au fonctionnement collectif normal de l'unité motrice (une fibre nerveuse qui innerve un groupe de fibres musculaires d'un même muscle) : elles sont appelées potentiels de fibrillation et peuvent avoir des aspects variables (potentiels de fibrillation, pointes positives...). Leur bruit est caractéristique, décrit comme un bruit de friture ou de feu de paille. La présence de ces activités traduit donc une dénervation fonctionnelle des fibres musculaires témoignant, dans le cadre d'un syndrome du canal carpien, d'une dégénérescence axonale. Cette fibrillation apparaît après que l'axone a totalement dégénéré, donc quelques jours à quelques semaines après la lésion. Dans l'immédiat, il s'agit d'un signe de gravité de l'atteinte

nerveuse car elle traduit une dégénérescence axonale et donc la nécessité de passer par une réinnervation lente et aléatoire pour espérer une récupération fonctionnelle.

A distance, la persistance de ces signes est un élément de bon pronostic, car elle témoigne de la persistance de fibres musculaires dénervées, mais vivantes, et donc susceptibles d'être réinnervées. Les fibres musculaires dénervées et inactives finissent par involuer en tissu graisseux et conjonctif au bout d'un à deux ans.

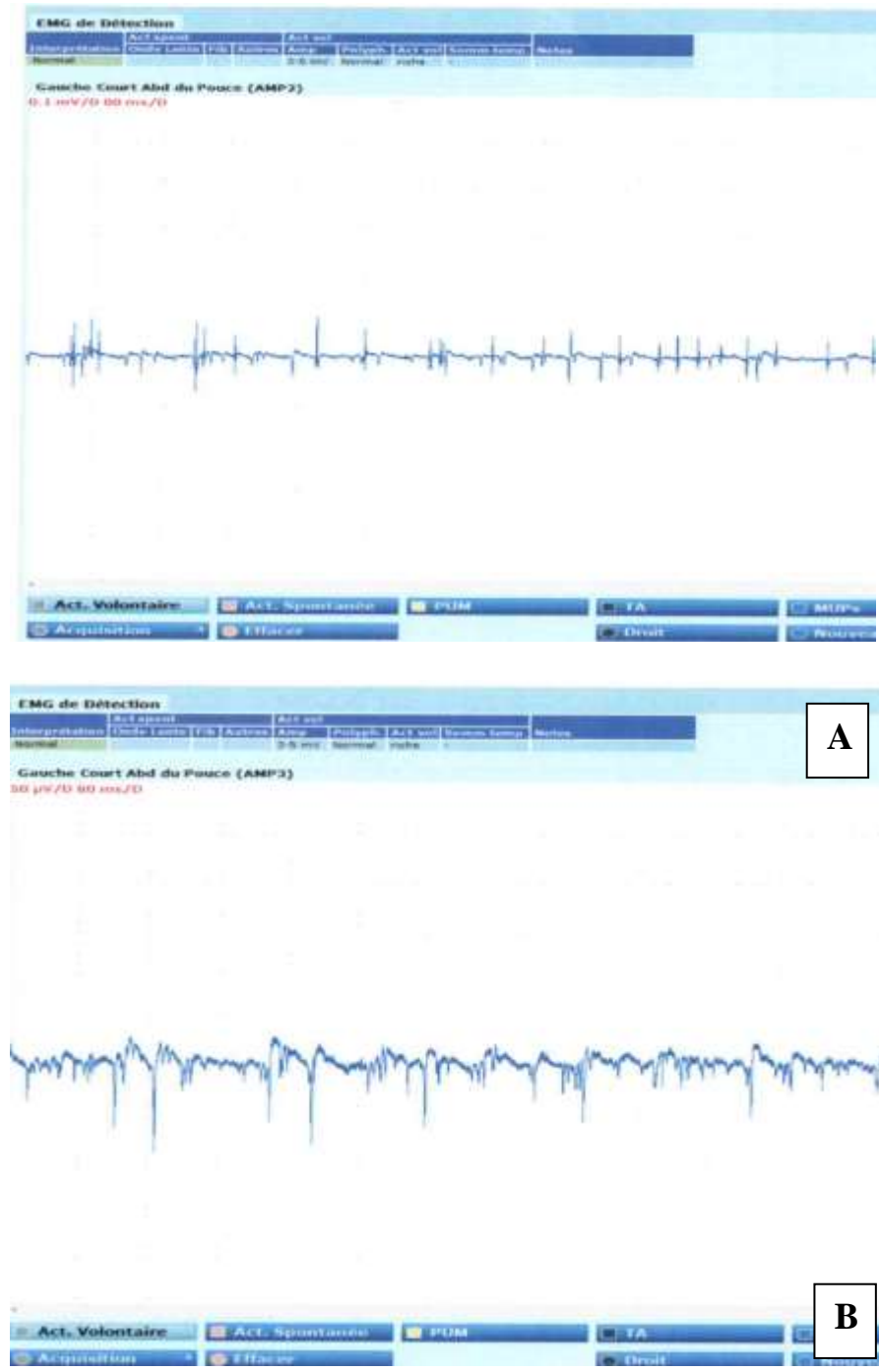


Image 11 : *Activité Spontanée de dénervation au niveau du muscle Court Abducteur du Pouce Gauche A. Potentiels de fibrillation. B. Pointes positives*

5.3 Sémiologie électromyographique de contraction volontaire

5.3.1 Activité normale : (Image 12)

On demande au patient une contraction musculaire d'abord minime, puis croissante, afin d'atteindre finalement la force maximale. Dans le cadre du muscle Court Abducteur du Pouce, on demande au patient de relever le pouce et on exerce un contre-appui afin de limiter le déplacement du doigt et d'éviter ainsi au maximum la mobilisation de l'aiguille dans le muscle, qui pourrait s'avérer douloureuse.

La force de contraction minimale correspond à l'activation à faible fréquence d'un seul des motoneurones qui commande le muscle enregistré. On obtient un tracé dit « simple » ou « élémentaire ».

Lorsque la force de contraction augmente, il y a en parallèle une augmentation du nombre de motoneurones activés (recrutement spatial) et de la fréquence de battement de chacun des motoneurones (recrutement temporel) : c'est ce que l'on appelle le *recrutement temporo-spatial*. Le tracé est alors dit « intermédiaire » puis « interférentiel » lorsque la ligne de base disparaît, pour une force maximale.



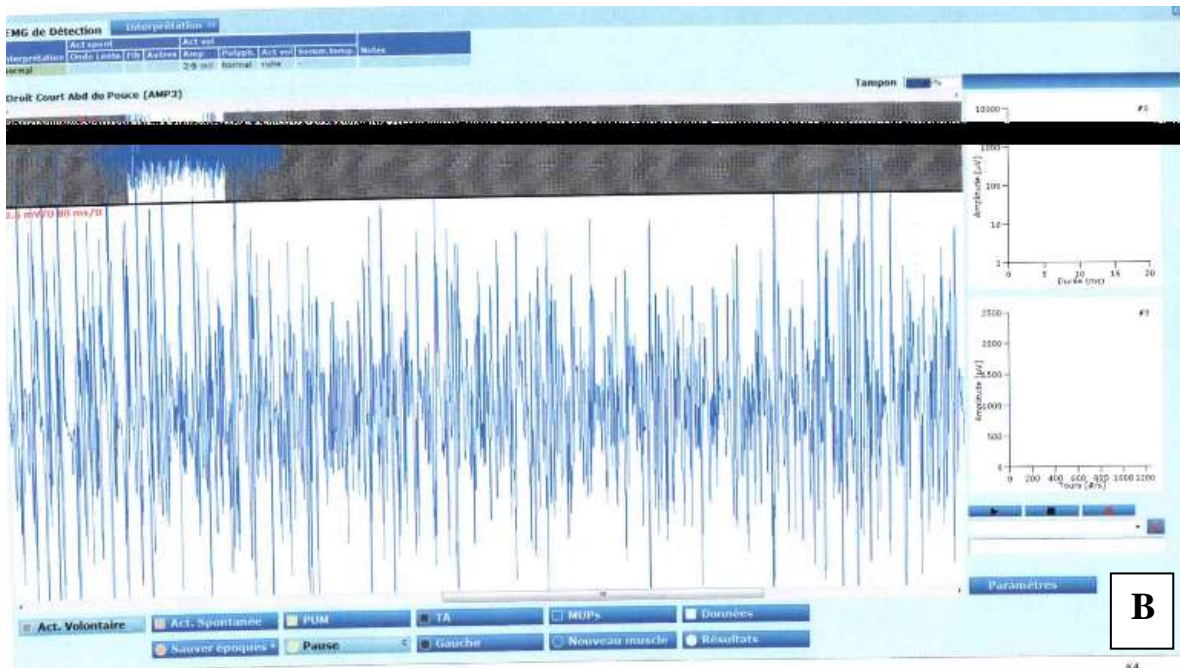


Image 12 : A. Positionnement de l'aiguille au niveau du muscle Court Abducteur du Pouce Droit et maintien d'un contre-appui afin d'obtenir la contraction volontaire contre résistance. B. Enregistrement de l'activité de contraction volontaire : activité interférentielle normale.

5.3.2 Activité anormale : (Image 13)

Dans le cadre d'un syndrome du canal carpien évolué, en cas d'atteinte neurogène périphérique, il y a un déficit du recrutement spatial et une augmentation compensatrice excessive de la fréquence ; en effet, en raison de la présence d'unités motrices non fonctionnelles, le recrutement spatial de nouvelles unités motrices ne peut se faire et les unités restantes déchargent à des fréquences plus élevées pour compenser. Le tracé reste pauvre (manque d'unités motrices fonctionnelles), simple ou intermédiaire (selon le nombre d'unités motrices restantes sur le tracé) et accéléré (l'augmentation de force se fait par accélération des unités motrices restantes), voire une absence de tracé en cas de paralysie complète.

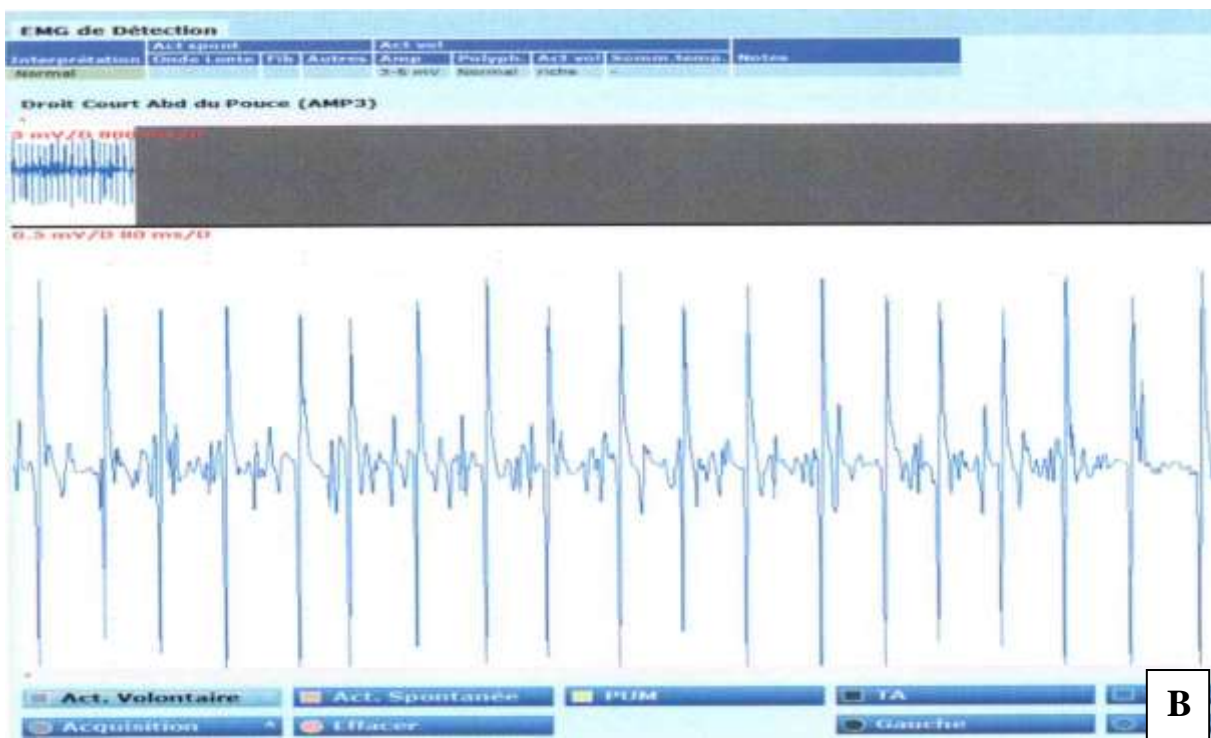
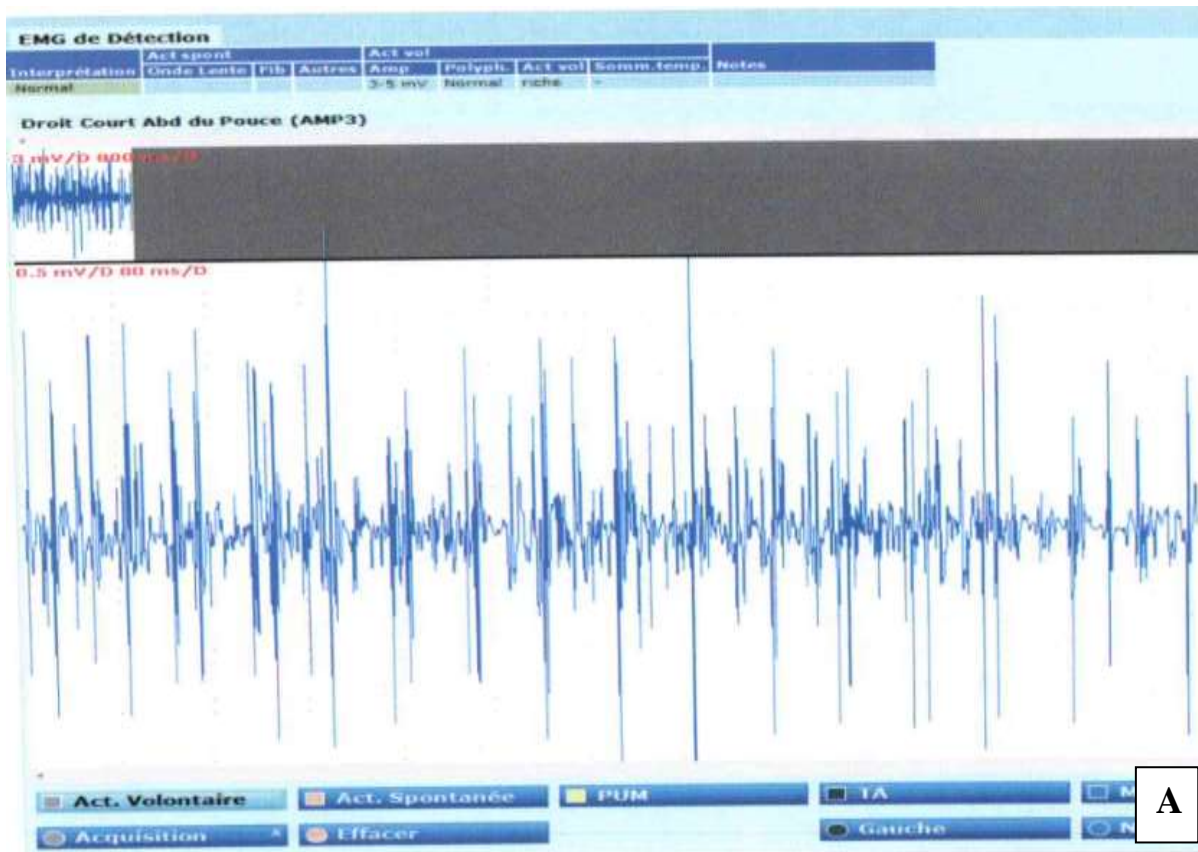


Image 13 : Manque d'unités motrices fonctionnelles ; signes d'atteinte neurogène périphérique dans le muscle Court Abducteur du Pouce. A. Tracé intermédiaire accéléré. B. Tracé simple accéléré

6. CHRONOLOGIE HABITUELLE DES ALTERATIONS ENMG DANS LE SYNDROME DU CANAL CARPIEN

Evaluer la sévérité d'un syndrome du canal carpien en se basant sur les résultats de l'ENMG a été souvent débattu dans la littérature (33,34); il faut rappeler que l'EMG peut évaluer la sévérité de l'atteinte du nerf médian au poignet, mais ne peut pas évaluer la sévérité subjective des symptômes présentés par le patient (35). La corrélation clinique – ENMG n'est donc pas systématiquement parallèle. Plusieurs échelles de gravité existent dans la littérature (26,36) et nous allons présenter ici l'évolution classique des anomalies observées, avec une sévérité croissante (37).

En général, la *diminution de la VCS* est le signe électrophysiologique le plus sensible dans les atteintes minimales (23).

L'*allongement de la latence distale motrice* et la *diminution de l'amplitude du potentiel sensitif* viennent ensuite, et parfois de façon simultanée, lorsque l'atteinte devient plus importante.

La *réduction de l'amplitude motrice distale* avec *absence* ou *diminution de l'amplitude du potentiel sensitif* est le grade de sévérité suivant.

Une *disparition de la réponse motrice* (avec disparition de la réponse sensitive) est le stade le plus sévère et peut s'accompagner de signes électromyographiques *d'atrophie neurogène chronique* et de *dénervation*.

7. EN PRATIQUE : L'EXPLORATION ENMG D'UN SYNDROME DU CANAL CARPIEN DANS NOTRE EXPERIENCE

Dans notre expérience, l'examen ENMG des membres supérieurs respecte les principes suivants, dans le cadre de l'exploration d'un syndrome du canal carpien :

- Comparaison Droite / Gauche pour tous les tests
- Etude de la conduction motrice sur le nerf médian et sur le nerf ulnaire
- Etude de la conduction sensitive sur le nerf médian (doigt ou paume) - poignet et sur le nerf ulnaire
- Si la conduction sensitive sur le nerf médian est normale :
 - Comparaison médio-ulnaire au 4^e doigt orthodromique ou antidromique
 - Etude transcanalaire sensitive sur le nerf médian au 2^e ou 3^e doigt antidromique
 - Etude centimétrique
- Electromyographie de détection sur le muscle Court Abducteur du Pouce +/- muscle 1^{er} Interosseux Dorsal. Si la détection sur le muscle Court Abducteur du Pouce est pathologique, il faut alors explorer d'autres muscles d'innervation C8, dont le muscle 1^{er} Interosseux Dorsal afin d'éliminer une origine radiculaire ou plexique.

8. PROPOSITION D'UNE FICHE PRATIQUE SYNTHETIQUE D'INTERPRETATION DES PRINCIPAUX PARAMETRES ENMG DANS LE CADRE D'UN SYNDROME DU CANAL CARPIEN

ANOMALIE ENMG OBSERVEE	INTERPRETATION	VALEURS INDICATIVES
Augmentation de la latence distale motrice (nerf médian)	Atteinte myélinique motrice	> 3.8 ms
Diminution de l'amplitude motrice (nerf médian)	Atteinte axonale motrice	< 6 mV
Ralentissement de la vitesse de conduction sensitive (nerf médian)	Atteinte myélinique sensitive	< 50 m/s
Diminution de l'amplitude sensitive (nerf médian)	Atteinte axonale sensitive	<15 μ V
Différence de latence sensitive médio-ulnaire au 4 ^e doigt	Atteinte myélinique sensitive débutante	Si >0.4-0.5ms
Présence d'une activité de repos dans le muscle Court Abducteur du Pouce	Présence de signes de dénervation (= signe de gravité)	Activité spontanée de dénervation
Activité volontaire pauvre ET accélérée dans le muscle Court Abducteur du Pouce (ou absence de réponse)	Atteinte neurogène chronique (= signe de gravité)	

9. CONCLUSION

Ce travail est destiné aux différents rééducateurs prenant en charge les patients en rééducation de la main (kinésithérapeutes, ergothérapeutes, orthésistes...). Il n'a pas pour ambition de se substituer aux nombreux ouvrages expliquant de manière détaillée et approfondie tous les aspects de cet examen particulièrement complexe qu'est l'ENMG.

Dans ce travail, nous avons voulu permettre aux rééducateurs de mieux comprendre comment se déroulait de façon pratique un examen d'ENMG en expliquant brièvement et en illustrant les différentes étapes de l'examen ; nous nous sommes appuyés sur le cas occasionnant le plus de demandes d'exploration ENMG, à savoir le syndrome du canal carpien.

Nous avons abordé les tests électrophysiologiques les plus couramment utilisés dans notre pratique et avons donné quelques éléments d'interprétation. Comme nous l'avons indiqué en introduction, nous avons volontairement simplifié cette interprétation afin d'essayer de dégager des notions élémentaires utiles à la compréhension de l'examen. Comme toute simplification, le risque est bien évidemment d'apporter une information parcellaire voire même erronée dans certains cas particuliers. Le but n'est absolument pas d'interpréter les résultats à la place du praticien ayant réalisé l'examen ; il s'agit plutôt de comprendre les différentes étapes d'exploration et les tests utilisés, ainsi que d'acquérir des notions sur les stades de sévérité de l'atteinte du nerf médian au canal carpien.

Nous espérons avoir aidé à la compréhension de l'ENMG et éveillé la curiosité et l'intérêt de tous les rééducateurs pour cet examen qui ne se limite pas à l'exploration du nerf médian au canal carpien.

10. BIBLIOGRAPHIE

1. Newington L, Harris EC, Walker-Bone K. Carpal tunnel syndrome and work. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*. 1 juin 2015;29(3):440-53.
2. Kamal RN. The Impact of the New Carpal Tunnel Clinical Practice Guidelines. *Journal of Hand Surgery*. 1 sept 2016;41(9):e329.
3. Zhuang T, Shapiro LM, Schultz EA, Truong NM, Harris AHS, Kamal RN. Has the Use of Electrodiagnostic Studies for Carpal Tunnel Syndrome Changed After the 2016 American Academy of Orthopaedic Surgeons Clinical Practice Guideline? *J Hand Surg Am*. janv 2023;48(1):19-27.
4. Chammas M. Carpal tunnel syndrome. *Chir Main*. avr 2014;33(2):75-94.
5. Syndrome du canal carpien – Optimiser la pertinence du parcours patient [Internet]. Haute Autorité de Santé; 2013 févr p. 16-7. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/c_1365548/fr/syndrome-du-canal-carpien-optimiser-la-pertinence-du-parcours-patient
6. Stratégie des examens paracliniques et des indications thérapeutiques dans le syndrome du canal carpien [Internet]. Agence Nationale d'Accréditation et D'Evaluation en Santé (ANAES); 1997. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/plugins/ModuleXitiKLEE/types/FileDocument/doXiti.jsp?id=c_1360539
7. Chen J, Fowler JR. Comparison of Diagnostic Accuracy of Electrodiagnostic Testing and Ultrasonography for Carpal Tunnel Syndrome. *Hand (N Y)*. 25 août 2021;15589447211038700.
8. Witt JC, Hentz JG, Stevens JC. Carpal tunnel syndrome with normal nerve conduction studies. *Muscle Nerve*. avr 2004;29(4):515-22.
9. Syndrome du canal carpien – Optimiser la pertinence du parcours patient [Internet]. Haute Autorité de Santé; 2013 févr p. 13-17. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/c_1365548/fr/syndrome-du-canal-carpien-optimiser-la-pertinence-du-parcours-patient
10. Boutte C, Gaudin P, Grange L, Georgescu D, Besson G, Lagrange E. Comparaison de l'échographie et de l'électroneurographie pour le diagnostic du syndrome du canal carpien en pratique courante. *Revue Neurologique*. 1 mai 2009;165(5):460-5.
11. Buch-Jaeger N, Foucher G. Correlation of clinical signs with nerve conduction tests in the diagnosis of carpal tunnel syndrome. *J Hand Surg Br*. déc 1994;19(6):720-4.
12. Bouche P. Bouche P. In: Clinique E, editor. *Encyclopédie Médico-chirurgicale*. Paris: Elsevier Masson SAS; 2008. 17-030-A-10. In 2008.
13. De Korvin G. Bases techniques de l'ENMG | ENMG en MPR [Internet]. 2020 [cité 31 mars 2023]. Disponible sur: <https://www.enmgdekorvin.fr/general/bases-techniques/>

14. Fournier E. Technique d'étude de la conduction motrice. In: *Sémiologie EMG élémentaire*. Lavoisier. Lavoisier; 2013. p. 5-55. (Médecine Sciences Publications).
15. Fournier E. Sémiologie de la conduction nerveuse motrice. In: *Sémiologie EMG élémentaire*. Lavoisier. Lavoisier; 2013. p. 39-55. (Médecine Sciences Publications).
16. Simpson JA. Electrical Signs in the Diagnosis of Carpal Tunnel and Related Syndromes. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*. 1 nov 1956;19(4):275-80.
17. Werner RA, Andary M. Electrodiagnostic evaluation of carpal tunnel syndrome. *Muscle Nerve*. oct 2011;44(4):597-607.
18. Preston DC, Logigian EL. Lumbrical and interossei recording in carpal tunnel syndrome. *Muscle Nerve*. nov 1992;15(11):1253-7.
19. Ornelas AS, Girardo ME, Smith BE. Electrodiagnostic Testing for Carpal Tunnel Syndrome When Routine Median Sensory and Thenar Motor Responses Are Absent. *J Clin Neurophysiol*. 15 nov 2021;
20. Kuntzer T. Carpal tunnel syndrome in 100 patients: sensitivity, specificity of multi-neurophysiological procedures and estimation of axonal loss of motor, sensory and sympathetic median nerve fibers. *J Neurol Sci*. 20 déc 1994;127(2):221-9.
21. Fournier E. Technique d'étude et sémiologie de la conduction nerveuse sensitive. In: *Sémiologie EMG élémentaire*. Lavoisier. Lavoisier; 2013. p. 105-22. (Médecine Sciences Publications).
22. Gilliatt RW, Sears TA. Sensory nerve action potentials in patients with peripheral nerve lesions. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry*. 1 janv 1958;21(2):109-18.
23. Eklund G. A New Electrodiagnostic Procedure for Measuring Sensory Nerve Conduction across the Carpal Tunnel. *Upsala Journal of Medical Sciences*. 1 févr 1975;80(1):63-4.
24. Stevens JC. AAEM minimonograph #26: the electrodiagnosis of carpal tunnel syndrome. *American Association of Electrodiagnostic Medicine. Muscle Nerve*. déc 1997;20(12):1477-86.
25. Corlobé P. L'électromyogramme des syndromes canaux. *Chirurgie de la Main*. 1 déc 2004;23:S4-14.
26. Padua L, Lo Monaco M, Valente EM, Tonali PA. A useful electrophysiologic parameter for diagnosis of carpal tunnel syndrome. *Muscle & Nerve*. 1996;19(1):48-53.
27. Lauritzen M, Liguori R, Trojaborg W. Orthodromic sensory conduction along the ring finger in normal subjects and in patients with a carpal tunnel syndrome. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. févr 1991;81(1):18-23.
28. Valls J, Llanas JM. Orthodromic study of the sensory fibers innervating the fourth finger. *Muscle Nerve*. juin 1988;11(6):546-52.
29. Johnson EW, Kukla RD, Wongsam PE, Piedmont A. Sensory latencies to the ring finger: normal values and relation to carpal tunnel syndrome. *Arch Phys Med Rehabil*. mai 1981;62(5):206-8.

30. Monga TN, Laidlow DM. Carpal tunnel syndrome. Measurement of sensory potentials using ring and index fingers. *Am J Phys Med.* juin 1982;61(3):123-9.
31. Kimura J. The carpal tunnel syndrome: localization of conduction abnormalities within the distal segment of the median nerve. *Brain.* 1 sept 1979;102(3):619-35.
32. Seror P. [The centrimetric test: a diagnostic test of certainty in carpal tunnel syndrome]. *Presse Med.* 2 avr 1988;17(12):588.
33. Robinson L. We should not use a modifier to describe the severity of carpal tunnel syndrome. *Muscle Nerve.* sept 2013;48(3):334-5.
34. Sucher BM. Grading severity of carpal tunnel syndrome in electrodiagnostic reports: why grading is recommended. *Muscle Nerve.* sept 2013;48(3):331-3.
35. Sasaki T, Koyama T, Kuroiwa T, Nimura A, Okawa A, Wakabayashi Y, et al. Evaluation of the Existing Electrophysiological Severity Classifications in Carpal Tunnel Syndrome. *J Clin Med.* 18 mars 2022;11(6):1685.
36. Bland JD. A neurophysiological grading scale for carpal tunnel syndrome. *Muscle Nerve.* août 2000;23(8):1280-3.
37. Alanazy MH. Clinical and electrophysiological evaluation of carpal tunnel syndrome: approach and pitfalls. *Neurosciences (Riyadh).* juill 2017;22(3):169-80.