MINISTERE DE LA SANTE
REGION LORRAINE
ECOLE DE KINESITHERAPIE DE NANCY

COMPARAISON DE FORCE ELECTROSTIMULEE ET VOLONTAIRE DU QUADRICEPS FEMORAL.

ANALYSE DES PARAMETRES ELECTRIQUES D'EFFICACITE POUR LA FORCE MAXIMALE.

Rapport de travail écrit personnel
présenté par **Vincent XAMBEU**
étudiant en 3° année de kinésithérapie
en vue de l'obtention du diplôme d'état
de masseur-kinésithérapeute
1991-1992

RESUME

Cette étude avait pour objectif de comparer la force maximale du quadriceps fémoral développée en volontaire par rapport à celle observée par électrostimulation, en essayant de déterminer par la même occasion, les paramètres du courant les plus adéquats pour obtenir la meilleure contraction musculaire possible.

Sur 30 sujets sains (56 quadriceps fémoraux) les résultats montrent qu'en moyenne un quadriceps électrostimulé réalise une contraction de 81,46% de sa force maximale volontaire. Quant aux paramètres du courant, l'efficacité optimale est obtenue avec une largeur d'impulsion de 400 µs et une fréquence de 80 Hz.

On ne parlera pas d'électrostimulation de la sorte en rééducation fonctionnelle, mais, par contre, on pourra l'évoquer chez les sportifs. Il est important de noter le côté "intensif" de ce test, chaque sujet étant à la limite de la douleur.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. MATERIEL ET METHODE

    2.1. Matériel

        2.1.1. Population

        2.1.2. Matériel expérimental

    2.2. Installation du sujet

    2.3. Protocole

3. RESULTATS

    3.1. Intensité

    3.2. Largeur d'impulsion

    3.3. Fréquence

4. DISCUSSION

    4.1. Analyse des résultats

        4.1.1. Intensité

        4.1.2. Largeur d'impulsion

        4.1.3. Fréquence

    4.2. Comportement des patients. Analyse qualitative

    4.3. Cas particuliers

5. CONCLUSION

1. INTRODUCTION

Dès l'antiquité, l'homme traitait déjà les maladies par l'électricité, mais ce n'est qu'en 1791 lorsque Galvani effectue l'expérimentation désormais célèbre de la contraction d'une cuisse de grenouille qu 'est née réellement l'ère scientifique de la stimulation électrique. Puis les découvertes se succèdent alors très rapidement; en 1799 Volta note qu'une contraction musculaire n'a lieu qu'à l'établissement du courant; en 1801 Ritter découvre qu'il existe une capacité d'accommodation du muscle si celui ci n'est pas excité assez rapidement; en 1822 Magendie différencie les fibres nerveuses; en 1909 Lapicque détermine la courbe Intensité-Durée et parle de rhéobase et de chronaxie; Bourguignon en 1935 démontre que le point moteur correspond à l'épanouissement du nerf sur le muscle; Hodes Larrabee et German en 1948 déterminent les vitesses de conduction des motoneurones. Mais depuis cette période l'électrostimulation (E.S) ne progresse guère. On assiste juste à la naissance de différentes formes de stimulation. On prête alors à ces courants, de façon totalement empirique, des vertus thérapeutiques sur de simples observations, en l'absence de toute méthodologie rigoureuse. L'E.S fait alors couler beaucoup d'encre d'autant plus que les résultats sont très inconstants et variés.

Quelle est vraiment son action physiologique sur le muscle ?

On s'est interrogé sur ses conséquences histologiques et métaboliques .

Des expériences ont été faites chez l'homme mais rien n'est encore prouvé. Dans certains cas on a observé une hypertrophie des fibres rapides et une augmentation de la densité mitochondriale (5) . Toutefois chez l'animal, d'autres chercheurs ont montré que l'E.S, à l'aide d'une fréquence supérieure à 40 Hertz, était à l'origine de l'augmentation du pouvoir oxydatif du muscle (capillarisation du muscle, augmentation de l'activité enzymatique, augmentation de la densité mitochondriale) .

Restons quand même très méfiants car Erikson *et al* ne mettent pas en évidence de modification de l'ultrastructure ni des capacités métaboliques du muscle électrostimulé à 200 Hz. Mais les données rapportées par Cabric *et al* (11) nous permettent tout de même de nous justifier sur l'augmentation du volume et de la force musculaire aprés électrostimulation.

On s'est aussi interrogé sur les différents paramètres physiques du courant pour obtenir la meilleure réponse possible en limitant les phénomènes nociceptifs. Pour ce qui est de la direction du courant, il a été montré que les courants unidirectionnels pouvaient nuire à l'état cutané du sujet. De plus, il semblerait que la contraction musculaire soit de meilleure qualité pour des courants bidirectionnels (17) . Pougheon et Thepault-Mathieu pensent que les résultats provenant des courants uni- ou bidirectionnels ne révèlent aucune différence, mais pour le confort du sujet ils préfèrent les courants bidirectionnels .

Dans le cadre d'une contraction brève, l'application de courant régulier ou irrégulier ne montre aucune différence dans les contractions. Il est probable que

l'accoutumence n'ait pas le temps de s'installer (20) .

En ce qui concerne la forme de l'impulsion, les courants de forme rectangulaires permettent d'atteindre le seuil d'excitation avec un minimum d'énergie électrique. Les impulsions rectangulaires sont d'ailleurs mieux ressenties que les impulsions sinusoïdales. (fig. 1)

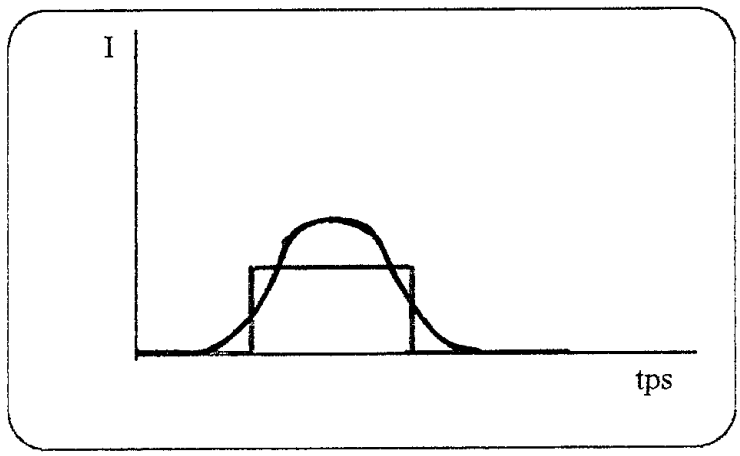


Fig. 1 : comparaison entre impulsion rectangulaire et sinusoïdale

Au sujet de l'intensité, plus elle sera importante, plus la contraction sera grande (Annexe II). Malheureusement la stimulation électrique n'excite pas seulement les nerfs moteurs mais aussi les nerfs sensitifs, et la douleur va assez rapidement limiter cette augmentation. Le réglage de l'intensité reste quelque chose de très subjectif car, suivant l'impédance électrode-peau-muscle de chaque individu, on aura des intensités différentes. Le but sera d'avoir une intensité au maximum désagréable mais non douloureuse .

Pour la disposition et la dimension des électrodes, on sait qu'il faut placer les électrodes au niveau des points moteurs du muscle (c'est la projection cutanée de la jonction neuro-musculaire entre le nerf moteur et le muscle). Il a été démontré par Duchenne de Boulogne que c'était la zone qui nécessitait le moins de charges électriques pour atteindre le

seuil d'excitabilité. Théoriquement il faudrait aussi placer les électrodes longitudinalement dans le sens des fibres du muscle, en évitant les surfaces tendineuses qui sont de mauvais conducteurs. La dimension de l'électrode peut être aussi un facteur important, en effet pour un passage de courant identique, la densité au niveau d'une électrode augmente en proportion inverse de sa surface. Ceci est intéressant car une électrode plus petite sera plus active sur une région précise.

Concernant le temps de contraction et le temps de repos, on peut distinguer deux cas. Lors d'une contraction de forte intensité, le muscle a besoin d'un temps de repos assez important pour pouvoir régénérer son stock de phosphocréatines contenues dans les fibres rapides de type IIb qui travaillent en anaérobie alactique . Par contre pour des contractions de faible intensité le muscle n'a pas besoin d'un temps de repos important car c'est essentiellement les fibres lentes de type I qui se contractent en aérobie et qui ne sont pas vite fatigables .

Quant à la fréquence et à la largeur d'impulsion pour obtenir la meilleure contraction musculaire, quelques articles ont déjà été publiés, mais il existe encore de nombreux désaccords.

Nous allons essayer dans ce travail de déterminer les paramètres optimaux pour obtenir sur le quadriceps le courant qui développe la meilleure force musculaire sous E.S par rapport à la force maximale volontaire (F.M.V). Mais existe-t-il une seule et unique combinaison de paramètres valable chez tous les sujets ?

Concernant l'E.S on peut bien sur se poser d'autres questions. Il existe notamment une controverse au sujet de la force développée par E.S en pourcentage de la force

développée en volontaire. Certains (5) pensent que le courant ne peut pas stimuler le muscle plus que ce qu'il est capable de faire en volontaire. D'autres, à l'opposé, comme le soviétique Kotz, affirment que lors de la tétanisation électrique maximale un muscle est capable de provoquer une force supérieure à celle développée lors d'un effort maximal volontaire et ceci sans causer de douleur.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. Materiel :

2.1.1. Population : On réalise des tests au niveau des quadriceps fémoraux gauche et droit de 30 sujets de niveaux sportifs variés, en bonne santé (sans pathologies musculaires et articulaires au niveau des membres inférieurs). Leur âge varie de 20 à 35 ans avec une moyenne de 25,47 ans et un écart-type de 3,43. Ils mesurent entre 1,54 m et 1,89 m et pèsent entre 45 et 86 Kg .

2.1.2. Materiel expérimental :

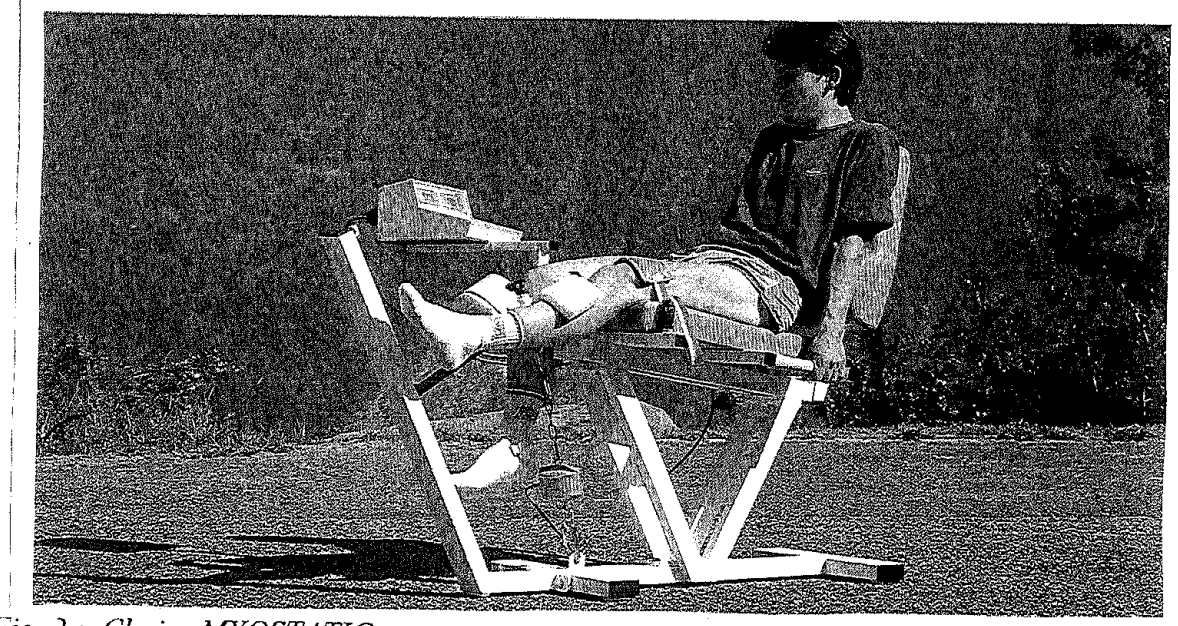


Fig. 2 : Chaise MYOSTATIC

Le patient est assis sur une chaise dite "MYOSTATIC" avec un dossier à 100° par rapport à l'assise. L'axe du bras de levier est fixé en regard de l'axe condylien. Le cavalier résistant à la force du quadriceps est fixé sur la partie haute du segment jambier. Ce cavalier est relié à un capteur de force (qui mesure les contractions) par une chaîne permettant de placer d'une part le genou à 30° de flexion et d'autre part le système résistant à 90° part rapport au segment jambier. Il existe aussi deux poignées latérales au niveau du bassin (fig.2). Le capteur de force musculaire statique MYOSTATIC est composé d'une cellule de force, à jauge de contrainte, incluse dans un système de lecture dont nous n'utiliserons, pour cette mesure, que la fonction Force Maximale.

Un générateur de courant à forme d'impulsion bidirectionnelles (Compex). Ce courant se diffuse par l'intermédiaire de fils conducteurs et d'électrodes de surface souples en élastomère permettant le moulage des quadriceps pendant les contractions. Ces électrodes sont recouvertes d'un gel de contact et sont maintenues en place par des bandes d'élastomousse. La taille des deux petites électrodes carrées est de 4cm de côté alors que la grande mesure 14cm de longueur et 8cm de largeur. Ce stimulateur fonctionne grâce à une carte à mémoire E.P.R.O.M. programmable à partir d'un ordinateur I.B.M.P.C. (Annexe I). On peut ainsi délivrer le programme prévu mais aussi enregistrer le temps de stimulation.

2.2. Installation du sujet : Concernant la position des électrodes (fig.3) on place la grande électrode sur la partie proximale du droit antérieur, une petite électrode au niveau du vaste interne et l'autre au niveau du vaste externe. Le sujet est adossé à la chaise et il maintient activement son bassin sur celle-ci par l'intermédiaire de ses bras qui tirent sur les

poignées. Par cette précaution on évite une élévation du bassin qui serait provoquée par une contraction du quadriceps en chaine cinétique fermée. Par contre il est important de préciser au sujet qu'il ne doit avoir aucune participation active à la contraction du quadriceps fémoral lors de tous les tests sous électrostimulation.

Fig . 3 : Position des électrodes

2.3. Protocole :

1° temps : échauffement de quelques minutes avec des contractions sous-maximales du quadriceps fémoral .

2ème temps : le calcul de la Force Maximale Volontaire(F.M.V.)par trois éssais successifs interrompus par deux minutes de repos entre chaque. Le meilleur est retenu.

3ème temps : "l'avant test" . On réalise le réglage de l'intensité maximale supportée, avec le programme de 300 µs comme largeur d'impulsion et 50 Hz de fréquence. Cette intensité n'est ensuite plus modifiée, elle reste la même pour tout le protocole. On recherche les points moteurs en déplaçant les électrodes. Ceci est fait assez rapidement pour ne pas trop fatiguer le sujet avant les tests proprement dits.

4ème temps :"les test E.S" . Chaque test (avec une fréquence et une largeur d'impulsion données) comporte deux essais, le meilleur sera retenu. Pour le train d'impulsion, le temps de montée est de 3 secondes, le temps de maintien de 7 secondes et le temps de descente de 1,5 seconde. Entre chaque stimulation il y a un temps de repos de 49 secondes.

1ère partie: "Recherche de la largeur d'impulsion (L.I) optimale"

F=50Hz ; L.I=100µs (2 essais)

F=50Hz ; L.I=200µs (2 essais)

F=50Hz ; L.I=300µs (2 essais)

F=50Hz ; L.I=400µs (2 essais)

La largeur d'impulsion retenue est celle ayant donné le meilleur résultat lors de la première partie. La suite offre quatre possibilités suivant la largeur d'impulsion sélectionnée.

2ème partie: "Recherche de la fréquence optimale"

F=20Hz ; L.I retenue (2 essais)

F=30Hz ; L.I retenue (2 essais)

F=40Hz ; L.I retenue (2 essais)

F=50Hz ; L.I retenue (2 essais)

F=65Hz ; L.I retenue (2 essais)

F=80Hz ; L.I retenue (2 essais)

3. RESULTATS

3.1. Intensité :

Au niveau du vaste interne, la moyenne de l'intensité appliquée est de 25,7 mA, avec un maximum de 40 mA, et un minimum de 20 mA. L'écart type est de 4.48.

Au niveau du vaste externe, la moyenne de l'intensité appliquée est de 29,48 mA, avec un maximum de 45 mA et un minimum de 20 mA. L'écart type est de 5.42.

3.2. Largeur d'impulsion :

Pour une intensité et une fréquence données, la largeur d'impulsion qui donne les meilleurs résultats dans 100% des cas est de 400 µs. En effet, sur 56 quadriceps fémoraux testés, tous ont eu une réponse plus importante pour 400 µs par rapport aux autres largeurs d'impulsions.

3.3. Fréquence :

Pour une intensité et une largeur d'impulsion données, les fréquences donnant les meilleurs résultats sont celles supérieures ou égales à 50Hz .

Sur 56 quadriceps fémoraux testés, on observe 31 meilleures réponses pour une fréquence de 80 Hz, 10 pour une fréquence de 65 Hz, 17 pour une fréquence de 50 Hz (dont 15 lors du test de la première partie) , et 1 pour une fréquence de 40 Hz. *(Fig . 4)*

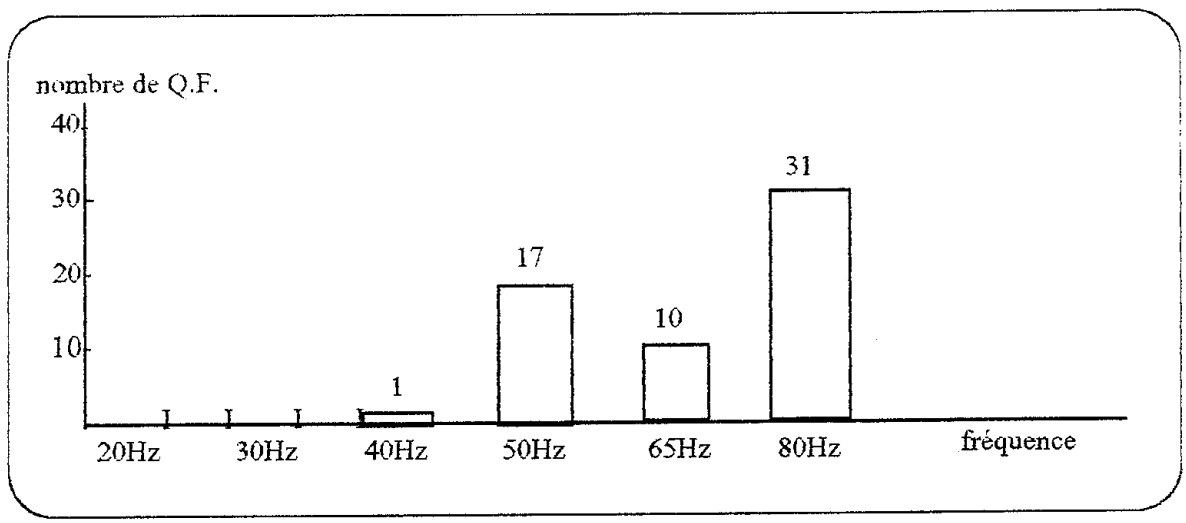


Fig.4 : Histogramme des réponses en fonction des fréquences

remarque: Le sujet n° 25 a obtenu sa meilleure contraction électrostimulée au niveau du quadriceps fémoral droit pour les fréquences de 40, 50, 65 et 80 Hz. Ce qui explique que la somme des quadriceps fémoraux comptabilisés dans ce graphique soit de 59 au lieu de 56.

TABLEAU DES RESULTATS

				mb.	pied	F. M. V.					
	Age	Taille	Poids	dom	d'appel	droit			gauche		
Sujet 1	22	1,85	80	D	G	244	**250**		239	**250**	
Sujet 2	22	1,70	57	D	G	89	107	**113**	142	**143**	133
Sujet 3	21	1,84	65	D	G	171	**198**	182	140	**182**	149
Sujet 4	24	1,89	85	D	G	225	245	**250**	**250**		
Sujet 5	26	1,86	76	D	G	212	221	**229**			
Sujet 6	28	1,80	72	D	G	202	197	**207**	**209**	195	201
Sujet 7	25	1,63	64	D	G	129	144	**203**	**196**	178	170
Sujet 8	23	1,68	62	D	D	**114**	90	94	**113**	88	102
Sujet 9	25	1,75	85	D	G	232	**246**	230	231	234	**250**
Sujet 10	27	1,65	57	D	G	177	201	**228**	129	**130**	94
Sujet 11	23	1,83	86	D	G	164	**182**	174	232	**235**	227
Sujet 12	25	1,66	60	D	G	140	145	**150**	147	150	155
Sujet 13	27	1,78	78	D	G	**250**			**250**		
Sujet 14	24	1,73	62	D	G	**234**	230	221	**183**	170	171
Sujet 15	24	1,70	63	D	G	**245**	236	235			
Sujet 16	21	1,70	55	D	G	163	157	**165**	131	**176**	171
Sujet 17	27	1,58	51	D	G	106	**125**	124	122	109	**137**
Sujet 18	25	1,76	70	G	G	233	224	**250**	188	**238**	200
Sujet 19	27	1,75	65	D	G	166	**190**	184	146	**250**	
Sujet 20	28	1,65	60	D	G	152	153	**158**	143	150	**158**
Sujet 21	21	1,72	67	D	G	173	187	193	194	202	**221**
Sujet 22	25	1,58	51	D	G	111	114	**121**	116	119	**126**
Sujet 23	32	1,80	75	D	G	222	227	**250**			
Sujet 24	28	1,87	69	D	G	131	158	**189**	143	149	**175**
Sujet 25	26	1,80	82	D	G	228	233	**239**	242	232	**250**
Sujet 26	32	1,70	60	D	G	136	155	**159**	106	**120**	112
Sujet 27	35	1,54	45	D	G				107	107	**108**
Sujet 28	28	1,75	70	D	G	**250**			**250**		
Sujet 29	20	1,62	57	D	G	122	147	**163**	145	**172**	161
Sujet 30	23	1,71	55	D	G	**133**	101	104	83	140	**153**

TABLEAU DES INTENSITES ET PLIS CUTANES

	INTENSITE (mA)				PLI CUTANE (mm)			
	D		G		D		G	
	V. I.	V. E.	V. I.	V. E.	V.I.	V.E.	V.I.	V.E.
Sujet 1	25	30	25	30	5	8	5	7,5
Sujet 2	20	30	20	30				
Sujet 3	25	30	25	30				
Sujet 4	25	30	25	30	12	15	14	15
Sujet 5	35	40			10	14		
Sujet 6	25	30	25	30	9	8	9	10
Sujet 7	25	30	25	30				
Sujet 8	25	30	30	30	15	20	13	19
Sujet 9	25	30	25	30				
Sujet 10	25	35	30	35	15,5	17	15	18
Sujet 11	25	35	25	35	10,5	10	9	10
Sujet 12	40	45	40	45	13	17,5	12	18
Sujet 13	25	30	25	30	12	10	12	9
Sujet 14	25	25	30	35	9	12	9	11
Sujet 15	25	30						
Sujet 16	35	40	25	30	14	16	15	18
Sujet 17	30	35	30	35	9	11	9,5	11
Sujet 18	25	30	25	30	13	13	13	10
Sujet 19	25	35	30	30	8	10	7	10
Sujet 20	25	30	25	25	15	16	15	16
Sujet 21	20	30	20	20	6	5	6,5	4,5
Sujet 22	20	20	20	20	11	10	12	10
Sujet 23	25	30			7	7		
Sujet 24	25	30	25	25	5	5	4,5	5,5
Sujet 25	25	30	20	20	15	13	12	12
Sujet 26	20	25	20	20	7	5	7	6
Sujet 27			20	25			9	13
Sujet 28	30	35	30	30	6	6	7	6
Sujet 29	30	30	25	25	15	16	17	20
Sujet 30	20	20	25	25	14	14	14	15

REPONSES (en kg force) MUSCULAIRES DU QUADRICEPS DROIT E.S.

	100 µs	200 µs	300 µs	400 µs	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	65 Hz	80 Hz
Sujet 1	0	1	101	132	28	85	123	130	**157**	155
Sujet 2	0	3	95	102	79	92	115	103	**122**	111
Sujet 3	0	3	56	126	25	69	77	100	184	**192**
Sujet 4	0	0	41	111	28	78	129	124	141	**212**
Sujet 5	0	25	81	120	68	124	121	117	125	**153**
Sujet 6	2	22	105	155	125	132	136	163	178	**212**
Sujet 7	0	4	78	94	68	87	94	95	**128**	113
Sujet 8	0	0	60	104	70	83	110	127	**150**	145
Sujet 9	20	45	161	**164**	126	159	161	145	149	130
Sujet 10	27	113	147	187	140	160	139	184	**213**	210
Sujet 11	7	69	135	**208**	135	155	178	190	196	191
Sujet 12	0	46	89	101	87	106	119	122	**124**	119
Sujet 13	0	31	93	203	96	167	208	206	223	**232**
Sujet 14	6	49	150	**206**	72	164	175	144	141	188
Sujet 15	7	12	124	215	140	169	191	169	196	**223**
Sujet 16	7	84	99	111	83	98	111	106	111	119
Sujet 17	1	13	42	**104**	54	83	93	93	97	103
Sujet 18	2	34	128	183	45	89	147	201	204	**250**
Sujet 19	23	25	79	**104**	52	77	84	96	97	101
Sujet 20	0	14	76	92	52	71	78	89	97	**100**
Sujet 21	4	40	108	**185**	74	103	105	136	153	163
Sujet 22	0	38	100	100	65	77	101	117	**126**	125
Sujet 23	4	95	119	206	110	154	221	239	237	**244**
Sujet 24	2	34	163	**208**	141	187	166	188	193	183
Sujet 25	0	34	250	**250**	197	220	**250**	**250**	**250**	**250**
Sujet 26	18	16	50	72	26	51	58	60	80	81
Sujet 27										
Sujet 28	1	13	59	107	60	81	147	147	171	**219**
Sujet 29	0	1	16	64	13	25	34	45	72	84
Sujet 30	0	39	90	101	63	76	89	99	110	119

REPONSES (en kg force) MUSCULAIRES DU QUADRICEPS GAUCHE E.S.

	100 µs	200 µs	300 µs	400 µs	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	65 Hz	80 Hz
Sujet 1	17	31	62	**165**	87	75	124	137	145	125
Sujet 2	0	20	87	90	62	75	87	**109**	99	99
Sujet 3	0	51	109	125	78	93	101	127	155	**204**
Sujet 4	0	38	99	155	61	120	166	174	184	**203**
Sujet 5										
Sujet 6	0	0	86	110	39	71	114	109	**199**	189
Sujet 7	0	22	61	**92**	62	66	80	76	85	87
Sujet 8	0	10	40	58	35	46	56	60	**64**	60
Sujet 9	0	59	68	94	86	113	106	117	113	**126**
Sujet 10	11	93	131	144	139	159	163	167	183	**186**
Sujet 11	0	33	107	**153**	82	113	125	128	139	130
Sujet 12	0	27	87	97	69	83	106	**115**	113	109
Sujet 13	2	80	184	205	97	137	190	198	189	**206**
Sujet 14	12	73	148	**180**	167	172	157	150	166	176
Sujet 15										
Sujet 16	1	63	101	109	82	125	121	129	125	**130**
Sujet 17	1	16	45	80	56	69	77	83	81	**88**
Sujet 18	0	18	68	151	49	72	119	121	134	**165**
Sujet 19	0	6	20	94	27	40	35	61	42	**135**
Sujet 20	5	45	183	102	50	68	75	91	93	**120**
Sujet 21	5	57	100	**163**	87	116	122	132	139	150
Sujet 22	0	21	68	94	67	78	83	93	95	**112**
Sujet 23										
Sujet 24	0	42	95	**144**	52	91	122	121	103	124
Sujet 25	2	124	182	236	44	139	198	232	238	**250**
Sujet 26	14	13	43	73	23	35	43	55	63	**82**
Sujet 27	0	16	40	73	41	61	73	81	85	**99**
Sujet 28	0	7	48	**110**	46	74	84	80	71	47
Sujet 29	13	16	80	119	117	**111**	111	122	109	**122**
Sujet 30	1	19	43	11	32	45	58	99	112	**122**

4. DISCUSSION

4.1. Analyse des résultats

Comparaison aux résultats antérieurs

4.1.1 Intensité :L'intensité maximum supportée varie de 20 à 45mA.

Pourquoi tant d' écart ? L'épaisseur cutanée est vraisemblablement une partie de l'explication de ces importantes différences d'intensité supportées (Annexe III) . On remarque dans nos tests que de façon générale les personnes ayant une épaisseur de pli de peau importante supportent plus d'intensité (ex: Sujets n°10, 12 et 16) que les patients avec un petit pli cutané (ex: sujets n°21, 22 et 26). On peut encore aller plus loin en faisant remarquer que de façon générale les femmes ont un pli cutané supérieur à celui des hommes, et supportent une intensité supérieure. L'explication de ce phénomène est simple, le tissus adipeux est un très mauvais conducteur et plus il est important moins le courant passe facilement. Toutefois, il est hors de question de répondre à cette interrogation par cette seule explication. On observe certains sujets ne rentrant pas du tout dans ce schéma (ex: Sujets n°8, 17 et 28). Il ne faut pas oublier tout le côté psychologique de ce réglage de l'intensité. La motivation, l'habitude ou non à la souffrance musculaire, auront un rôle important . Cette intensité restera donc toujours quelque chose de très subjectif.

4.1.2. Largeur d'impulsion: On a observé que les meilleurs scores étaient toujours obtenus pour une largeur d'impulsion (L.I) de 400 µs. D'autre auteurs(24) ont aussi trouvé qu'avec une intensité constante, la force d'une contraction électroinduite augmentait quand la L.I. augmentait. On explique cela par le principe de la sommation spatiale (Annexe IV), une impulsion de longue durée permet d'atteindre le seuil de dépolarisation d'un plus grand nombre unités motrices qu'une impulsion de courte durée car la quantité de courant est plus importante. On remarque chez pratiquement tous les sujets une nette différence entre les résultats obtenus pour 100 et 200 µs d'une part et 300, 400 µs de l'autre. Quelle est cette barrière ? On peut penser au franchissement de cette fameuse chronaxie (temps nécessaire pour stimuler un muscle à partir d'une intensité égale au double de la rhéobase; cette rhéobase étant l'intensité minimale pour stimuler un muscle). D'autant plus que certains auteurs(3)(24) seraient en accord avec cette observation en situant la chronaxie entre 200 et 300 µs. Mais que dire quand ces mêmes auteurs pensent avoir prouvé mathématiquement que la durée d'impulsion optimale est égale à la chronaxie du muscle électrostimulé ?

4.1.3. Fréquence : Dans les années 70, Kotz était pour un courant oscillant entre 2000 et 2500 Hz modulé en train d'impulsion de 50 Hz. On s'est aperçu de l'inefficacité des courants de moyenne fréquence, dans le sens où beaucoup de stimulations n'avaient aucune action en arrivant pendant la phase de dépolarisation des fibres musculaires. Désormais on parle que de fréquence inférieure à 150 Hz (basses fréquences) , d'ailleurs il a été montré que le niveau de contraction diminue même après 150 Hz (4).

Dans la littérature , la majorité des auteurs relatent des contractions musculaires peu importantes au fréquences basses de 10-20 Hz (13)(24). Pour les fréquences supérieures à 30 Hz les résultats varient plus. Beaucoup pensent atteindre les plus haut niveaux de contraction dès 50 Hz (4)(12)(21)(24) . Quant aux fréquences plus élevées certains affirment qu'elles n'entrainent pas d'augmentation significative (2)(7)(15) . D'autres comme Thépault-Mathieu et Pougheau révèlent de très bons résultats pour une fréquence de 80 Hz. Mais attention aucune expérience n'a été faite avec le même courant (dans chaque étude les paramètres varient) . Ceci est donc sûrement une explication de ces désaccords. Nos résultats montrent que sur 30 sujets, soit 56 quadriceps fémoraux (puisque 4 sujets n'ont pu tester qu'une seule jambe) , 31 développent le maximum de force musculaire pour 80 Hz , 17 pour 50 Hz, 10 pour 65 Hz et un pour 40 Hz. Cette nette supériorité des valeurs contractiles pour une fréquence de 80 Hz peut s'expliquer par une sollicitation préférentielle des fibres rapides (type IIb) entrainant des réponses plus importantes. Mais restons vigilant car à ce sujet rien n'est encore prouvé ! Dautre part, on peut penser que lors de cette électrostimulation à 80 Hz, un plus grand nombre d'unités motrices se contractent de façon synchrone, et que les fibres sont recrutées de manière indifférenciées, c'est le principe de la sommation temporelle. C'est peut-être, là aussi, une bonne explication. Malheureusement pour l'instant nous ne pouvons qu'émettre des hypothèses.

Observons de plus près les 17 quadriceps fémoraux stimulés le plus efficacement lors des tests à 50 Hz. Il est interessant de voir que deux tests dans ce protocole ont exactement les mêmes paramètres (50 Hz de fréquence et 400 µs de largeur d'impulsion). C'est le 4ième test de la 1ière partie et le 4ième test de la 2ième partie. Il faut alors noter que sur ces 17 quadriceps fémoraux, 15 proviennent du test de la première partie du protocole.

Cela semblerait signaler une fatigue des sujets lors de l'épreuve, ou en tout cas une fatigue de certains sujets (peut-être moins entrainés ou moins endurants) . Si c'est vraiment le cas on peut penser que la fin de l'épreuve est légèrement perturbée.

Dans l'analyse de ces résultats, il est intéressant de calculer le rapport :

$P=\frac{\text{contraction électrostimulée}}{\text{contraction maximale volontaire}} \times 100$ pour chacun des tests de ce protocole. Si on effectue ensuite une moyenne en prenant le meilleur pourcentage de chaque quadriceps fémoral testé on obtient une valeur de 81,46%. Tout en sachant que le rapport minimum est de 44% et le maximum de 131%. Parallèlement dans la littérature, on retrouve des résultats qui fixent les limites entre 50 et 70 % (16), alors que d'autres paraissent plus exceptionnels avec 92 % (15), 93 % (6), ou 120 % (14). Malheureusement ces publications sont réalisées avec un nombre trop limité de sujets pour qu'elles aient une réelle valeur scientifique. On peut penser que cet important écart dans les résultats résulte en partie des personnes électrostimulées. En effet, des sujets sportifs ont vraisemblablement plus l'habitude de supporter la douleur et les effets nociceptifs. Ce qui pourrait par exemple expliquer les résultats de Kotz (120 %) et Cometti (93 %) réalisés chez des sportifs.

Mais bien sûr de nombreux paramètres (le placement, la taille, le nombre des électrodes, la motivation du patient, l'heure du test, l'échauffement du quadriceps avant l'épreuve, la position du patient...) interviennent lors des tests et sont capables de faire varier les résultats. D'autre part, il ne faudrait pas négliger qu'une contraction musculaire volontaire est réalisée à partir d'une coopération d'un ensemble de muscles agonistes et facilitateurs. Même si ces derniers n'interviennent pas dans la contraction, ils créent des conditions mécaniques plus favorables en fixant les articulations voisines. Or dans les contractions musculaires électrostimulées les facilitateurs ne sont à priori pas recrutés. Cela serait-il la clef

des déficits des contractions E.S par rapport aux contractions volontaires relatées dans toutes les études à l'exception de celle réalisée par Kotz.

4.2. Comportement des patients au cours des tests: Lors de cette expérimentation, la "douleur" est un point à ne pas négliger; en effet, il est important de rappeler que ce protocole est réalisé à la limite du supportable chez tous les sujets. Certains tests sont de façon générale plus desagréables que d'autres et il semblerait ressortir une corrélation entre la douleur et la tétanie. On s'aperçoît que plus la contraction est importante plus le degré d'inconfort augmente. Les contractions les plus désagréables se situent donc entre 50 et 80Hz. Toutefois, beaucoup de sujets ont trouvé les tests à 20 Hz insupportables. Ces tests provoquent des contractions du muscle en tétanos imparfait entrainant de nombreux picotements dans le quadriceps. Malheureusement pour l'E.S cette douleur est difficilement contournable. Provoquée par la stimulation des fibres sensitives et nociceptives situées au niveau du champ électrique, elle restera une limite pour les courants de stimulations. Mais il reste quand même un bon point, la douleur s'oublie vite : un grand nombre de sujets ayant souffert pendant le protocole serait prêt à recommencer. Il existe une certaine habitude, ou plutôt une connaissance de ce qui nous attend, ce qui peut être rassurant. Il est aussi important de souligner le côté affectif, le découragement, l'épuisement et le stress sont des facteurs qui interviennent énormément. Sans oublier la mémoire douloureuse du sujet (celui-ci peut ressentir une sensation identique à celle connue lors d'une crampe quand il aperçoit son muscle se tétaniser sans l'avoir commandé). Toute cette partie émotionnelle est non chiffrable mais peut faire varier les résultats de façon considérable. Il est donc important d'expliquer au

patient le déroulement du test (temps de contraction, temps de repos, temps du protocole total etc...), ce qu'il va ressentir et bien sûr d'être toujours présent à ses côtés pour l'encourager.

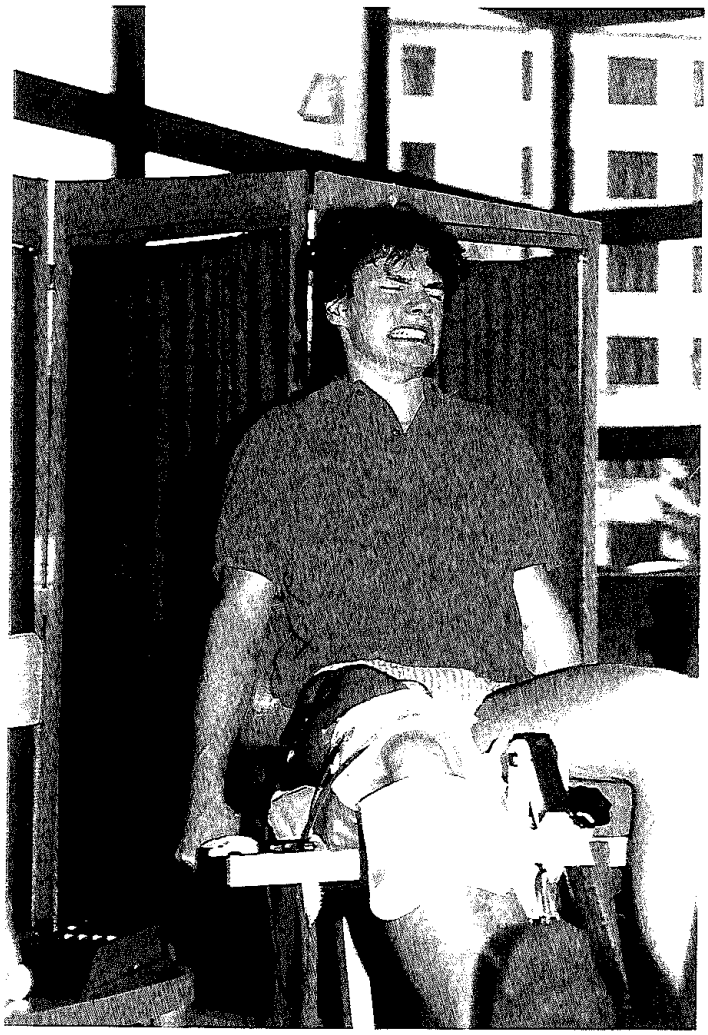


Fig . 5 : Aspect douloureux de l'épreuve

Pour ce qui est de la fatigue, des auteurs ont montré une détérioration de la réponse musculaire d'autant plus importante que la fréquence est élevée et ceci pour une durée d'épreuve identique (2)(20). Ces résultats sont en opposition avec ceux mis en évidence dans d'autres expériences, mais les auteurs de ces expériences ont imposé des épreuves de

fatigue sur un muscle en ischémie artificielle (garrot) (8). Il est difficile de déterminer le siège de cette fatigue; il semblerait que ce soit l'expression d'un dysfonctionnement de l'ensemble nerf-jonction neuromusculaire-muscle. La fatigue touche certainement les fibres musculaires elles-mêmes, mais il existe aussi une défaillance du processus d'excitation. Ce serait une moins bonne propagation de l'influx nerveux à travers la fibre musculaire (2) (12) . Mais on abordera la question en restant beaucoup plus général, en parlant de fatigue totale. On évoquera autant la fatigue psychique ou émotionnelle dûe au stress, que la fatigue physique. Cette fatigue physique avec d'une part la fatigue de la jonction neuromusculaire et d'autre part la fatigue des éléments contractiles par accumulation d'acide lactique, par ischémie dûe à la contraction et par déplétion des réserves énergétiques musculaires. Pour en revenir à notre expérimentation, sur 56 quadriceps 34 semblent être sujets à une fatigue en fin d'épreuve, puisque ces 34 quadriceps fémoraux développent une force musculaire supérieure pour le 4ème test de 1ère partie par rapport au 4ème test de la 2ème partie (qui sont pourtant identiques). De plus, on peut noter que beaucoup de sujets ont des courbatures le lendemain de l'effort (surtout au niveau du vaste interne), mettant là aussi en évidence une fatigue.

D'autre part, on peut se demander s'il existe une différence de force volontaire entre les 2 quadriceps fémoraux (droit et gauche). On observe, dans nos résultats, une variation de 2kg seulement entre la moyenne de force des membres "dominants" et des membres "pied d'appel", ce qui n'est bien sûr pas significatif. De son côté, Y. Chatrenet a réalisé une évaluation comparative droite/gauche de la force maximale du quadriceps chez 82 sujets sains. Il en ressort que là aussi la supériorité du quadriceps du membre dominant est statistiquement non significative (différence de 10%). Pour ce qui est des résultats sous électrostimulation, on n'observe, là encore, aucune différence notable entre les 2 membres.

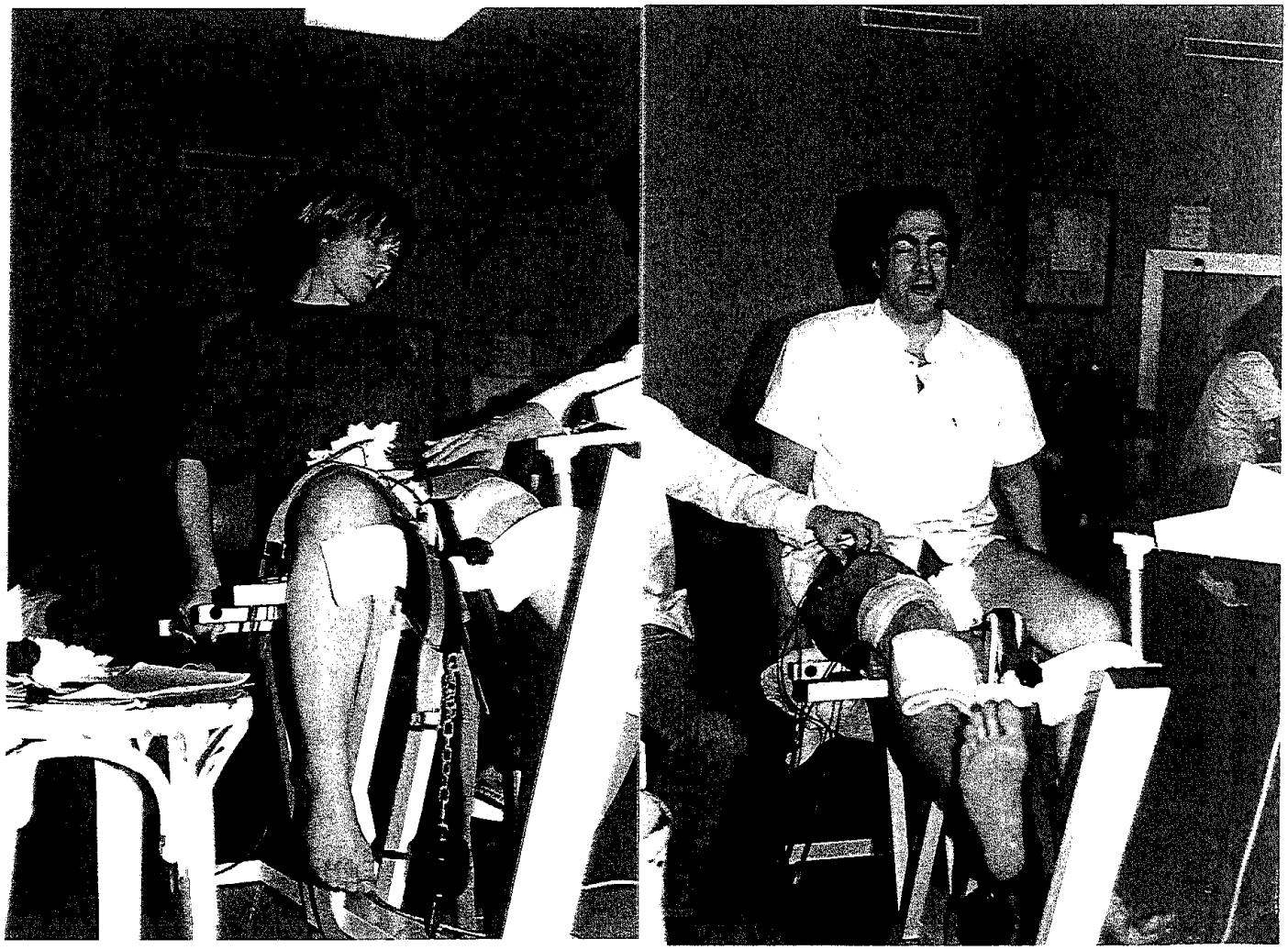


Fig .6 :Expression de la fatigue

4.3. Cas particuliers:

Dans un premier temps, il y a le cas particulier des personnes ayant un rapport P supérieur à 100 %. Ceci concerne 8 quadriceps fémoraux. La force qu'ils développent sous électrostimulation est supérieure à celle qu'ils développent en volontaire. Comment

interpréter ce phénomène ? L'explication peut venir du manque d'entrainement. En effet, les sujets n'ayant pas l'habitude de recruter toutes leurs unités motrices, ne sont pas capables de développer une force musculaire importante, par manque de synchronisation. Mais on peut penser que ce déficit de force volontaire provient d'un mauvais échauffement (incorrectement réalisé ou trop court). Il est possible que certains sujets aient besoin d'un temps de préparation physiologique et psychologique plus important que d'autres.

Dans un deuxième temps, il y a les personnes ayant un rapport P inférieur à 50 %. C'est le cas de 2 quadriceps. On peut là aussi se poser des questions quant à cette variation des réponses par rapport aux résultats généraux. La recherche du point moteur a-t-elle été bien réalisée ? Il est clair que pour des courants ayant des paramètres identiques, le placement des électrodes peut faire énormément varier les réponses musculaires aux stimulations électriques. Il est donc très important de rechercher minutieusement le point moteur. D'autre part, on peut se demander si dans certains cas on n'aurait pas un recrutement parasite des antagonistes (ischios-jambiers) à cause de la propagation du courant à travers le membre stimulé par l'intermédiaire de la sueur à la surface de la peau. Des auteurs(22) ont d'ailleurs montré qu'à l'occasion d'un entrainement du quadriceps par électrostimulation on avait un gain de force du quadriceps et des fléchisseurs du genou. Mais ce recrutement des antagonistes pourrait aussi provenir d'une contraction réflexe à la suite de l'écrasement qu'ils subissent sur la chaise lors de la contraction du quadriceps.

5. CONCLUSION

En rééducation fonctionnelle, l'application de ce type de courant avec une telle intensité paraît difficilement transposable, du fait de l'importance de la contraction et de l'effet nociceptif procuré. Par contre, à des intensités moins importantes, les effets dans le cadre de l'entretien musculaire sont développés, en particulier, dans la lutte contre l'amyotrophie. En post-opératoire immédiat par exemple, on prévient l'atrophie musculaire grâce à l'électrostimulation de longue durée (24),(10),(13). Chez les sportifs, il y a des ouvertures importantes en terme de musculation, d'augmentation de la masse et de la force musculaire, d'accéleration du mouvement dans le temps (6)(10)(23). Il faut bien sûr préciser que l'électrostimulation ne présente aucun danger pour l'athlète: on ne parle à aucun moment de dopage! Le sportif ne la subit jamais passivement, elle demande autant d'efforts qu'un entrainement classique. Il est clair que pour progresser le sportif doit souffrir... On peut dire que c'est une technique complémentaire mais pas une recette miracle. On peut conclure en notant que tout au long de ce travail on aura eu le regret de ne pas savoir exactement quelle type de fibres on est arrivé à exciter. Un progrès considérable dans le domaine sportif serait d'arriver à développer un type de fibres musculaires plutôt qu'un autre en variant simplement les paramètres du courant... A ce sujet les recherches sur la Résonance Magnétique Nucléaire par spectroscopie seraient-elles en mesure de nourrir nos espoirs?

BIBLIOGRAPHIE

(1) AX. BIGARD , F. CANON , CY. GUEZENNEC

Conséquences histologiques et métaboliques de l'E.S.

Science et sport 6, 275-292 , 1991

(2) BIGLAND RITCHIE B. , JONES D.A , WOODS

Excitation fréquency and muscle fatigue :électrical réponses during human volontary and stimulated contractions.

Exp Neurol 64 , 414-427 , 1979

(3) BRODART R. , GOBELET C.

Données actuelles en E.S. fonctionnelle

principes théoriques Vol.1 , MEdicompex, Genève

(4) BUSKO K.

Proba optimalizaji parametrow pradu stymulacyjnegoujywanegow treningusily

Kultura Fizyczna 7/8 , 19-21 ,1989

(5) CABRIC M. , APPELL H.J. ,RESIC A.

Fine strutural changes in électrostimulated human skeletal muscle.

Eur J appl Phisiol 57 , 1-5 , 1988

(6) COMMETTI G.

l'E.S. dans l'entrainement des sportifs

(7) DAVIES C.T. , DOOLEY P. , MC DONAGH M.J. , WHITE M.J.

Adaptation of mecanical properties of muscle to high force training in man.

J. Phisiol 365 , 277-284 , 1985

(8) GARLAND S.J. , GARNER S.H. , MC COMAS

Relationship beetween numbers and fréquencies of stimuli in human muscle fatigue .

J.Appl. Phisiol 65 ,89-93 ,1988

(9) GILLES NOEL , ALAIN Y. BELANGER

Relation entre force macimale volontaire , force tétanique et douleur lors de l'E.S. du quadriceps fémoris

Physiothérapie canada ,Vol 29, n°6, 377-383, 1987

(10) GREMION G., LACRAZ A. , MEUNIER C. , FOURTIQ G. ,

CHANTRAINE A.

. Traitement des amyotrophies

(11) HUDLICKA O.

Cappilary agrowth : role of mecanical factors

N. Phisiol Sci 3 , 117-120 ,1988

(12) HULTMAN E. , SJOHOM H. , JADEHOLM EKI , KRYNICKI J.

Evaluation of methode for electrical stimulation of human skeletal muscle in situ

Pflugers Arch 390 , 139-141 , 1983

(13) KERKOUR , MEIER , MANSUY

Chirurgie du genou : E.S. programmable

Annales de réadaptation et de médecine physique 33 , 55-61 , 1990

(14) KOTS Y.M. ,

Amélioration de la force musculaire par stimulation électrique

Revue soviétique théorie et pratique de la culture physique , 3-4

(15) KRAMER J.F.

Effect of electrical stimulation current fréquencies on isometric knee extension torque .

Phys Ther 67 , 31-38 .

(16) LLYOD . DE DOMENICO , STRAUSS ET SINGER

Large analyse de la littérature ,1986

(17) MC NEAL . BAKER

Effect of joint angle électrodes and waveform on electrical stimulation of the quadriceps and hamstrings .

Ann. BiomecanicalEngineering 16 , 299-310 ,1988

(18) PORTMANN , MONTPETIT

Effects de l'entrainement par electrostimulation isométrique et dynamique sur la force de contraction musculaire

Sciences et sports 6 , 193-203 , 1991

(19) POUGHEON, THEPAUT MATHIEU

Réponse du système neuromusculaire à une E.S appliquée de manière prolongée

Kiné Scient. 308 , 7-13 , 1992

(20)POUGHEON , THEPAUT MATHIEU

Variation de la réponse musculaire selon différents type de courants

Kine Scient. 308 , 1992

(21) SJOHOLM , SAHLIN , EDSTROM , HUTTMANE

Quantitative estimation of aerobic and oxydative energy metabolism and contraction characteristics in intacts human skeletal muscle in réponse to electrical stimulation

Clinical Phisiol 3 , 227-239 ,1983

(22) SOO , CURRIER , THRELDELD

Augmenting voluntary torque of healthy muscle by optimization of electrical stimulation

Phys Ther 68 ,333-337 , 1988

(23) TOSCHI , FAYOLLE

La stimulation excito motrice des fibres F.T. du muscle Triceps Brachial. Son influence sur la force et la vitesse de contraction musculaire

(24) VANDERTHOMMEN , CONSTANT , CRIELAARD

Intérêt de l'electrostimulation de base fréquence après arthroscopie du genou

Kiné Scient.308 , 1992

Les courants excito moteurs de base fréquence

Ann. Kiné 10 , 481-484 ,1991

DICOMPEX SA File name: Date: Tue Feb 05 14:20:37 1991

GENERAL PARAMETERS

mber of sequences: 27 * Selection seq. allowed: Yes
eatment time : 0 h 54min * ********** FILE TEXT **********
lid sequence time: 0 h 54min *
********* LABEL CARD ********** *

SEQUENTIAL PARAMETERS

equence number :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ode :	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
uration min:	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ulse - shape :	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ulse - frequency Hz:	50	50	50	50	20	30	50	65	80	20
ulse - width us:	100	200	300	400	100	100	100	100	100	200
ontraction - agonist s:	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
- antagonist s:										
ise time - agonist s:	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
- antagonist s:										
all time - agonist s:	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
- antagonist s:										
ime between agonist and antagonist :										
est time s:	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
elaxation frequency Hz:										
ntalgic - active s:										
- inactive s:										
ontraction with trig. :	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
utomatic commutation :	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes

SEQUENTIAL PARAMETERS

equence number :	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ode :	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
uration min:	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Pulse - shape :	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ulse - frequency Hz:	30	40	50	65	80	20	30	40	50	65
ulse - width us:	200	200	200	200	200	300	300	300	300	300
ontraction - agonist s:	7	7	7	8	7	7	7	7	7	7
- antagonist s:										
ise time - agonist s:	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
- antagonist s:										
all time - agonist s:	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
- antagonist s:										
ime between agonist and antagonist :										
est time s:	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
elaxation frequency Hz:										
ntalgic - active s:										
- inactive s:										
ontraction with trig. :	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
utomatic commutation :	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

LEGEND

ode #1:Continuous Pulse - width #1:Monophasic asymmetric
#2:Synchronous #2:Biphasic asymmetric
#3:Alternate #3:Biphasic symmetric
#4:Slope #5:Motor point #4:Monophasic symmetric

********** SEQUENTIAL PARAMETERS **********

quence number	:	21	22	23	24	25	26	27
de	:	2	2	2	2	2	2	2
ration	min:	2	2	2	2	2	2	2
lse - shape	:	3	3	3	3	3	3	3
lse - frequency	Hz:	80	20	30	40	50	65	80
lse - width	us:	300	400	400	400	400	400	400
ntraction - agonist	s:	7	7	7	7	7	7	7
- antagonist	s:							
se time - agonist	s:	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
- antagonist	s:							
ll time - agonist	s:	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
- antagonist	s:							
me between agonist and antagonist	:							
est time	s:	49	49	49	49	49	49	49
elaxation frequency	Hz:							
ntalgic - active	s:							
- inactive	s:							
ontraction with trig.	:	No	No	No	No	No	No	No
utomatic commutation	:	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No

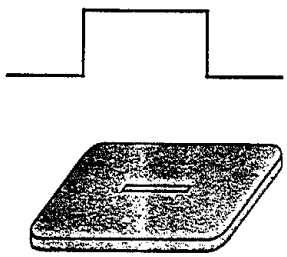
********** LEGEND **********

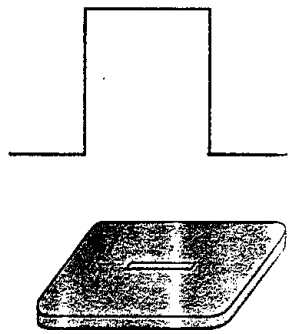
ode #1:Continuous
#2:Synchronous
#3:Alternate
#4:Slope
#5:Motor point

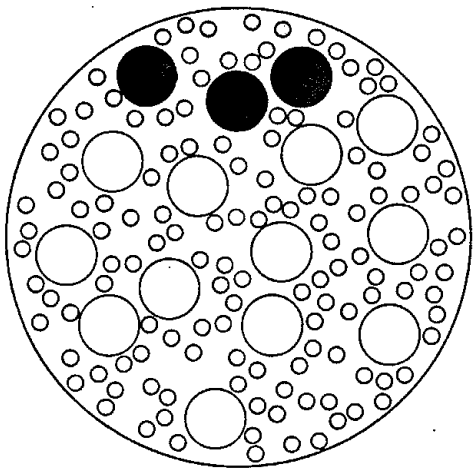
Pulse - width #1:Monophasic asymmetric
#2:Biphasic asymmetric
#3:Biphasic symmetric
#4:Monophasic symmetric

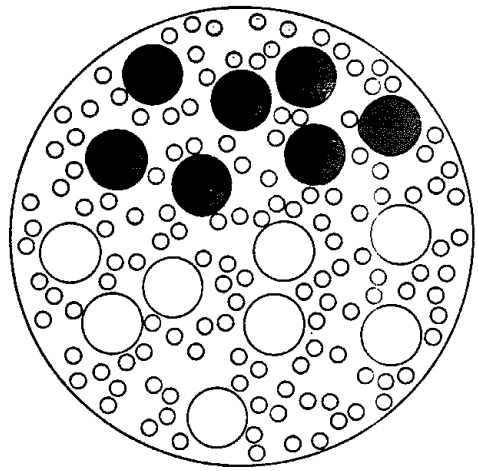
Annexe I

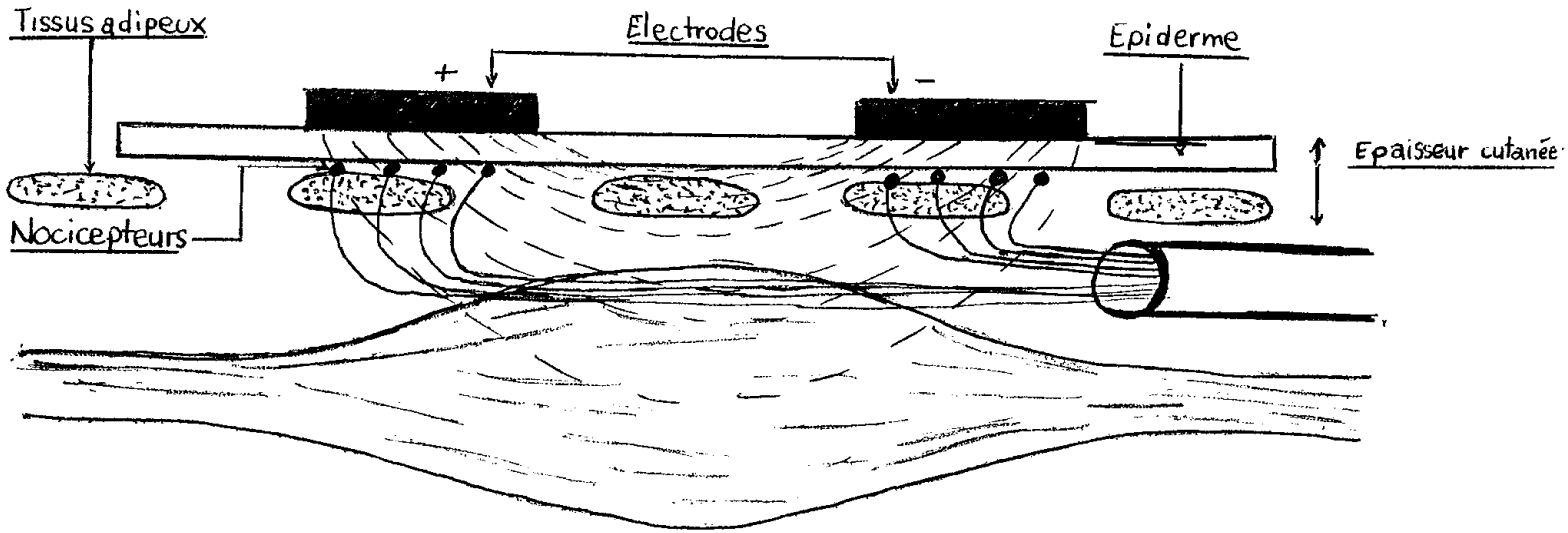
Annexe II

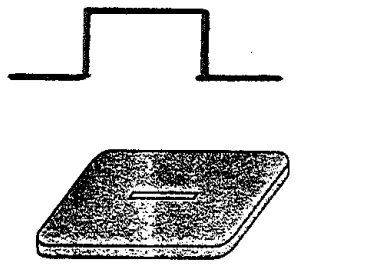
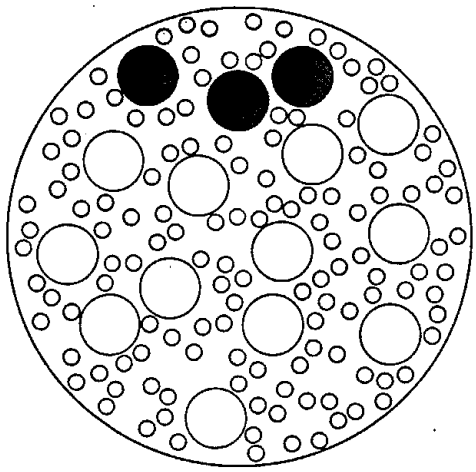
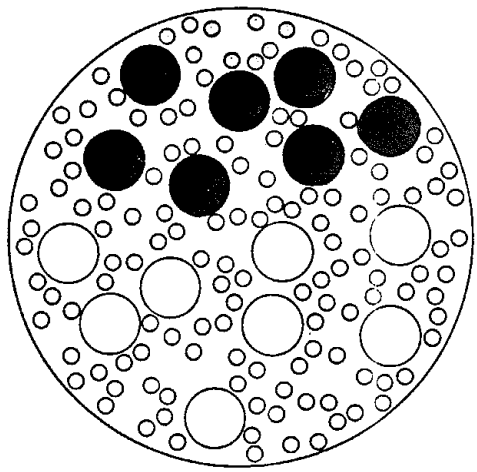









Tissus adipeux
Electrodes
Epiderme
+
−
Epaisseur cutanée
Nocicepteurs

Annexe III

Annexe IV