

UNIVERSITE DE NANTES

UFR DES SCIENCES ET TECHNIQUES DES ACTIVITES
PHYSIQUES ET SPORTIVES

74^{eme} section

Dossier en vue de l'obtention de **l'Habilitation à Diriger des Recherches**

Caractérisation de la fonction neuromusculaire et de ses adaptations

Présenté le 22 décembre 2004 par

Christophe CORNU
Maître de Conférences

Laboratoire Motricité, Interactions, Performance (J.E. 2438)

Devant le jury suivant

Pr Josiane FONTAINE-PERUS, Université de Nantes	
Pr Francis GOUBEL, Université de Technologie de Compiègne	
Pr Pierre PORTERO, Université Paris XII,	rapporteur
Pr Michel POUSSON, Université de Bourgogne,	rapporteur
Dr Henry VANDEWALLE, Université Paris VI,	rapporteur

Ecole Doctorale Chimie Biologie

Année 2004

SOMMAIRE

<u>1- PRÉSENTATION DU CANDIDAT</u>	<u>p-4</u>
1-1 <u>État civil</u>	p-4
1-2 <u>Formation et Diplômes Universitaires</u>	p-5
1-3 <u>Parcours professionnel à l'Université</u>	p-6
1-4 <u>Responsabilités disciplinaires et pédagogiques</u>	p-6
1-5 <u>Autres activités administratives</u>	p-7
1-6 <u>Publications et Travaux scientifiques</u>	p-7
<u>2- ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT</u>	<u>p-8</u>
2-1 <u>Maître de Conférences des Universités</u>	p-8
2-2 <u>Attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER)</u>	p-11
2-3 <u>Vacataire puis moniteur universitaire (96h éq TD)</u>	p-11
<u>3- ENCADREMENTS D'ETUDIANTS</u>	<u>p-12</u>
<u>4- EXPOSÉ DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE</u>	<u>p-16</u>
4-1 <u>Historique</u>	p-16
4-2 <u>Présentation générale</u>	p-17
4-3 <u>Description des projets de recherche antérieurs (1996-2004)</u>	p-19
4-3-1 <u>Généralités</u>	p-19
4-3-2 <u>Axe « Compréhension du fonctionnement du système neuromusculaire »</u>	p-22
4-3-3 <u>Axe « Conception, fabrication et validation de nouveaux outils d'analyse »</u>	p-26
4-3-4 <u>Axe « Expertise et évaluation »</u>	p-28
4-4 <u>Projets de recherche en cours (2004-2005) et perspectives</u>	p-36
4-4-1 <u>Introduction</u>	p-36
4-4-2 <u>Généralités</u>	p-37
4-4-3 <u>Description des projets de recherche et perspectives</u>	p-39
4-4-3-1 <u>Etude développée à l'Institut de Myologie</u>	p-39
4-4-3-2 <u>Etudes développées à l'UFR STAPS de Nantes</u>	p-42
4-4-4 <u>Conclusion générale</u>	p-71

5- RECHERCHE DE SUBVENTIONS p-73

6- PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS p-74

- 6-1 Articles publiés et acceptés p-74
- 6-2 Chapitres de livre p-75
- 6-3 Articles en préparation p-76
- 6-4 Article revue Paris XII- Conseil Général p-76
- 6-5 Communications congrès p-77
- 6-6 Communications invités p-78
- 6-7 Mémoires de recherche et rapport d'expertise p-79
- 6-8 Mémoires de recherche des étudiants encadrés p-79

7- ACTIVITES ADMINISTRATIVES p-81

- 7-1 En rapport avec les activités de Recherche p-81
- 7-2 En rapport avec les activités pédagogiques p-82
- 7-3 Autres responsabilités p-85

8- ANNEXES p-87

- 8-1 Subventions des projets de recherche p-88
- 8-2 Aides aux Etudes p-133
- 8-3 Participation aux protocoles d'essais cliniques p-137
- 8-4 Pages de couverture des mémoires de recherche encadrés p-143
- 8-5 Page de couverture du rapport d'expertise réalisé pour la société LPG Systems p-154
- 8-6 Extraits du Programme d'Actions de l'UFR 2004-2007 p-155

1 - PRÉSENTATION DU CANDIDAT

1-1 ÉTAT CIVIL

Nom : CORNU

Prénom : CHRISTOPHE

Date et lieu de naissance : 13 avril 1968 à Nantes (44)

Nationalité : Française

Situation personnelle : Marié

Coordonnées personnelles : 22, rue Honoré de Balzac
44700 Orvault

Téléphone 02-40-63-67-40
06-81-49-99-22

Email chna.c@oreka.com

Coordonnées professionnelles : UFR STAPS-Nantes
Laboratoire Motricité, Interactions, Performance
(Jeune Équipe 2438)
BP 72206
25 bis, bd Guy Mollet
44322 Nantes cedex 3

Téléphone 02-51-83-72-22

Télécopie 02-51-83-72-10

Email christophe.cornu@staps.univ-nantes.fr

1-2 FORMATION ET DIPLOMES UNIVERSITAIRES

1999 Qualification à la fonction de Maître de conférences dans les sections CNU 74 (STAPS) et 66 (Physiologie)

1995/98 **Doctorat** : Département Génie Biologique, Division Biomécanique et Instrumentation Médicale - Université Technologique de Compiègne.

- Thèse financée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

- Spécialisation : Biomécanique musculaire

- Thèse soutenue le 15/12/1998 devant le jury d'examen suivant :

P^r M. Fardeau (**président**), P^r JF. Marini et D^r H. Vandewalle (**rapporteurs**),

P^r F. Goubel (**directeur de thèse**), P^r C. Pérot et P^r J. Van Hoecke.

- Mention : Très honorable avec les félicitations du jury.

1993/94 **D.E.A. de Biomécanique & Physiologie du Mouvement**,
Université d'ORSAY (PARIS SUD). Mention Bien.

1992/93 **Maîtrise de Physiologie Animale**, Faculté des Sciences de NANTES,
Mention Bien.

1991/92 **Licence de Biologie Cellulaire**, option Physiologie Animale,
Faculté des Sciences de NANTES. Mention Assez Bien.

1989/91 **D.E.U.G. Sciences de la Nature & de la Vie**, 1ère et 2ème année.
Faculté des Sciences de NANTES.

1986/87 Baccalauréat Mathématiques & Sciences Physiques (*Série C*).

1-3 PARCOURS PROFESSIONNEL A L'UNIVERSITE

- 2002/→ **Maître de Conférences**, UFR STAPS, Nantes
- 2000/02 **Maître de Conférences**, UFR SESS, Division STAPS, Paris XII-Val de Marne
- 1999/00 **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche**, à l'UFR-STAPS Nantes
- 1998/99 **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche**, à l'UFR-APS Paris X-Nanterre
- 1996/98 **Moniteur de l'enseignement supérieur** de l'Université de Technologie de Compiègne. C.I.E.S. de Lille
- 1996/98 **Allocataire de recherche du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**, Université de Technologie de Compiègne
- 1995/96 **Chargé d'enseignement** (vacataire) à l'Université de Technologie de Compiègne
- 1993/94 **Boursier au mérite universitaire** du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche

1-4 RESPONSABILITES DISCIPLINAIRES ET PEDAGOGIQUES

- 2004/→ **Co-Responsable pédagogique** du Master Recherche 1^{ère} année "Physiologie cellulaire et intégrée des activités physiques et modélisation du mouvement" de l'UFR STAPS Nantes
- 2004/→ **Responsable disciplinaire** des enseignements en Sciences de la Vie dans le plan de formation de l'UFR STAPS Nantes
- 2003/→ **Responsable pédagogique** de la licence STAPS (L3) spécialité Entraînement sportif de l'UFR STAPS Nantes
- 2002/→ **Responsable disciplinaire** des enseignements en Biomécanique dans le plan de formation de l'UFR STAPS Nantes
- 2001/02 **Responsable du diplôme** de la licence mention Entraînement sportif, option Haut niveau de l'INSEP/département STAPS Paris XII
- Fév-Sept 2000 **Co-responsable pédagogique** du DEUG 2^{ème} année de l'UFR STAPS Nantes

1-5 AUTRES ACTIVITES ADMINISTRATIVES

- 2004/→ **Membre élu du Conseil Scientifique** de l'UFR STAPS de Nantes
- 2004/→ **Membre de 3 commissions de spécialistes** 74^{ème} section : Université de Nantes, Université du Maine et Université Paris 12-Val de Marne.
- 2003/→ **Chargé de communication** de l'UFR STAPS de Nantes.
- 2001/→ **Secrétaire** de l'association loi 1901 « Institut de la performance humaine », Paris.
- 2001/03 **Membre de la commission de spécialistes** 74-66^{ème} section de l'Université Paris 13
- 1997/98 **Membre élu**, représentant les étudiants, au bureau du département de Génie Biologique de l'Université de Technologie de Compiègne

1-6 PUBLICATIONS ET TRAVAUX SCIENTIFIQUES

- Articles - 7 publiés (1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003) dans des revues internationales à comité de lecture indexées Pubmed.
- 2 acceptés (2004-2005) dans des revues internationales à comité de lecture indexées Pubmed.
- 2 publiés dans des revues nationales à comité de lecture (1999, 2003).
- 4 publiés dans une revue régionale (2001, 2002, 2003)

- Ouvrages : - 2 chapitres publiés dans des ouvrages collectifs (W. Herzog , Wiley and Sons, 2000; JP Didier, Springer, 2004).
- 1 article sélectionné dans : Year Book of Sports Medicine 2004, Elsevier (à paraître).

- Communications - 10 publiées dans des congrès internationaux (1996, 1997, 1999, 2000, 2001, 2003, 2004).
- 1 acceptée dans un congrès international (2004).
- 1 publiée dans un congrès national (2004).
- 4 conférences « invités » (1999, 2001, 2003).

Rapport d'expertise Système HF1 (LPG systems®), 2001.

Mémoires scientifiques Rapport de D.E.A. (1994), mémoire de thèse (1998).

2- ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Pendant la préparation de ma thèse, j'ai pu bénéficier d'un poste de moniteur universitaire puis d'attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER). Après une année supplémentaire post-thèse en tant qu'ATER, j'ai été recruté sur un poste de Maître de Conférence des Universités. Ces différents postes ont été occupés successivement à l'Université Technologique de Compiègne, puis à celles de Paris X-Nanterre, Paris XII-Val de Marne et Nantes.

Mes activités d'enseignement présentées succinctement ci-après sont clairement inscrites dans les domaines des Sciences de la Vie et de la Biomécanique à tous les niveaux du plan de formation universitaire et notamment dans le cadre de différents DEA (Master 2) depuis l'année 2000.

2-1 MAITRE DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Interventions dans les domaines des sciences de la vie et de la biomécanique (cours, travaux dirigés, travaux pratiques)

2-1-1 A L'UFR STAPS DE NANTES (2002/→)

Licence 1 : Mécanique et physique appliquée au mouvement, Physiologie (CM) Cinésiologie et bases biomécaniques (TD)

Licence 2 : Biomécanique du système neuro-musculaire (CM,TD), Adaptations physiologiques à l'exercice (CM, TD), Analyse posturale et mouvement (CM)

Licence 3 : Maturation du système neuromusculaire et biomécanique (CM), Adaptations physiologique et biomécanique à l'exercice (CM, TD), Evaluation des potentialités du sportif (CM, TD), Déterminants biomécaniques de la performance (CM, TD), Initiation à la recherche (TD, TP)

Master 1 « Physiologie cellulaire et intégrée des activités physiques et modélisation du mouvement »: Biomécanique du mouvement (CM, TD), Analyse biomécanique de la performance (CM), Adaptations physiologiques à l'entraînement (CM)

⇒ Faculté de chirurgie dentaire (Nantes) : Intervention sur la Biomécanique (2h CM) pour les étudiants de PCEO 2 depuis 2002.

⇒ Interventions extérieures :

- DEA Biomédical, option biomécanique (M2 BIOST) ENSAM, (Paris) : Biomécanique musculaire (3h CM) (2002/→)

- DEA/M2 Physiologie et biomécanique de la performance motrice (Angers) : Etude des propriétés mécaniques des muscles (3h CM) (2003/→)

- Correcteur et jury (DEUG 1-2 : biomécanique) : IFEPSA (Institut de formation en éducation physique et sportive d'Angers) (2002/→)

2-1-2 A L' UFR SESS DIVISION STAPS DE PARIS XII-VAL DE MARNE (2000-2002)

⇒ Interventions sur les trois sites de la division STAPS de Paris XII (Créteil, Melun-Sénart et INSEP) :

● Division STAPS de Paris XII (Créteil)

- DEUG 1 : Physiologie (CM, TD), Anatomie fonctionnelle (CM, TD), Diététique et traumatologie (CM)

- DEUG 2 : Neurophysiologie (CM), Biomécanique (CM)

- Licence Education et Motricité : Physiologie de l'exercice de l'enfant (2001)

● IUP Métiers du Sport (Melun Sénart)

- IUP 1 : Anatomie (CM)

● Institut National du Sport et de l'Education Physique (INSEP)

- DEUG 2 : Biomécanique (CM) (2001)

- Maîtrise Entraînement Sportif (option Haut niveau) : Adaptations biomécaniques des muscles, Méthodologie de la recherche en biomécanique (CM)

⇒ Faculté des Sciences Paris XII :

- DEUG Sciences de la Vie 1^{ère} année : Physiologie appliquée au sport (CM) (2000)

⇒ Formation continue (département STAPS, Paris XII) :

Participation au projet Sport Santé et Préparation Physique en association avec le Conseil Général du Val de Marne. Ce projet présentait trois axes :

- mise en place d'une revue distribuée gratuitement à tous les entraîneurs du Val de Marne (cf p. 76) : il s'agissait de diffuser les connaissances relatives à la conduite et à la gestion de l'effort et de l'entraînement ;
- action de suivi d'athlètes et d'entraînements sur le terrain ;
- action de formation et d'information dans les clubs sous forme de conférences-débats dans les structures sportives.

⇒ Interventions extérieures :

- DEA biomédical, option biomécanique, ENSAM (Paris) : Biomécanique musculaire (3h CM) (2000-2002)

- Licence Entraînement, UFR STAPS Nantes : Adaptations des propriétés mécaniques des muscles squelettiques à l'exercice (6h CM, TD)

- Maîtrise, UFR STAPS Paris V : Biomécanique (6h CM) (2002)

- Correcteur et jury (DEUG 1-2 : biomécanique) : IFEPSA (Institut de formation en éducation physique et sportive d'Angers) (2000-2002)

- Jury tronc commun Brevet d'Etat 3^{ème} degré (INSEP) (2000)

2-2 ATTACHE TEMPORAIRE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE (ATER)

2-2-1 A L' UFR STAPS DE NANTES (1999-2000) - 192h éq TD

- DEUG 1 : Méthodologie du travail universitaire (TD)
- DEUG 2 : Biomécanique musculaire (CM, TD), Physiologie (CM)
- Maîtrise : Biomécanique musculaire et adaptations à l'exercice (CM)

⇒ Collaboration avec le service de Médecine Physique et Réadaptation de l'Hôpital St Jacques de Nantes : Suivi du projet d'un étudiant de maîtrise (cf p. 15 et 29).

2-2-2 A L' UFR APS DE PARIS X-NANTERRE (1998-1999) - 192h éq TD

Interventions sur les trois sites de l'UFR APS Nanterre (Nanterre, Eaubonne, Poissy)

- DEUG 1 : Physiologie (CM, TD)
- DEUG 2 : Anatomie fonctionnelle (CM, TD)

2-3 VACATAIRE PUIS MONITEUR UNIVERSITAIRE (96H EQ TD) : à l'Université de Technologie de Compiègne (1995-1998)

Interventions dans deux unités d'enseignement (travaux dirigés et pratiques)

- 1^{er} cycle : Biophysique des systèmes biologiques (TD)
- 2^{ème} cycle : Physiologie de l'effort sportif (TD, TP)

3- ENCADREMENTS D'ETUDIANTS

Depuis l'année 2000, j'ai dirigé ou co-dirigé 12 étudiants dans le cadre de leur projet de recherche (3 en thèse de troisième cycle, 6 en DEA, 4 en maîtrise). Les pages de couverture des mémoires de recherche soutenus par les étudiants sont présentés en annexe 8-4 pages 143 à 151).

2004-2005

⇒ Antoine Nordez, **doctorant en deuxième année** à l'Ecole Doctorale Chimie-Biologie de Nantes, Codirecteur de thèse : J. Prioux

Sujet d'étude : Simulation du comportement de la fonction neuromusculaire soumise à différentes contraintes externes à l'aide d'un modèle musculo-squelettique spécifique.

Financement : ATV (96h TD), demande d'aide aux Etudes (Appel d'Offre AFM 2005)

⇒ Anthony Remaud, **doctorant en deuxième année** à l'Ecole Doctorale Chimie-Biologie de Nantes, Codirecteur de thèse : J. Prioux

Sujet d'étude : Réponses aiguës et adaptations chroniques de la fonction neuromusculaire à deux modalités de contractions dynamiques concentriques.

Financement : ATV (96h TD), demande d'aide aux Etudes (Appel d'Offre AFM 2005)

2003-2004

⇒ Sana Mansour, **doctorante en quatrième année** (Soutenance de thèse : prévue le 7 décembre 2004), inscrite à Paris 5, Codirecteur de thèse : P. Portero

Sujet d'étude : Etude de la motricité des membres inférieurs après reconstruction du ligament croisé antérieur utilisant le transplant tendineux droit interne/ demi-tendineux ou Fascia lata. Institut de Myologie, G.H. Pitié Salpêtrière, Paris.

Financement : Bourse Tunisienne (Pays d'origine) puis Allocation AFM (2 ans) ;
2004-2005 : ATER Université de Poitiers.

⇒ Antoine Nordez, **doctorant en première année** à l'Ecole Doctorale Chimie-Biologie de Nantes, Codirecteur de thèse : J. Prioux (cf ci-dessus)

⇒ Anthony Remaud, **doctorant en première année** à l'Ecole Doctorale Chimie-Biologie de Nantes, Codirecteur de thèse : J. Prioux (cf ci-dessus)

⇒ Frédéric Caillaud, **étudiant en maîtrise** STAPS Education et Motricité (Nantes)

Sujet d'étude : Effets aigus des étirements statiques sur les propriétés mécaniques des fléchisseurs du genou

2004-2005 : Préparation CAPEPS

⇒ Carole Fortis, **étudiante en maîtrise** STAPS Education et Motricité (Nantes)

Sujet d'étude : Revue de la littérature sur « Les méthodes d'évaluation des différents types de raideurs potentiellement exprimées au niveau d'un système musculo-articulaire »

2004-2005 : Préparation CAPEPS

2002-2003

⇒ Sana Mansour, **doctorante en troisième année**, inscrite à Paris 5, Codirecteur de thèse : P. Portero (cf p. 12)

⇒ Anthony Remaud, **étudiant en DEA** Physiologie et biomécanique de la performance motrice. STAPS, Université Rennes 2.

Sujet d'étude : Evolution des paramètres neuromusculaires au cours d'une séance d'entraînement standardisée : mode isotonique versus mode isocinétique.

⇒ Jennyfer Lecompte, **étudiante en DEA** Biomécanique et physiologie. Université Technologie de Compiègne. Codirecteur : P. Portero

Sujet d'étude : Etude des adaptations biomécanique et électrophysiologique des muscles croisant l'articulation du coude dans les sports de lancer : application au water polo.

2003/→ : Thèse à l'ENSAM (Paris)

2001-2002

⇒ Sana Mansour, **doctorante en deuxième année**, inscrite à Paris 5, Codirecteur de thèse : P. Portero (cf p. 12)

⇒ Mickael Jouan, **étudiant en DEA** Biomécanique et physiologie. Université Technologie de Compiègne. Codirecteur : F. Goubel.

Sujet d'étude : Evaluation des caractéristiques mécaniques musculaires dynamiques à partir des perturbations sinusoïdales chez l'enfant. Application à la dystrophie musculaire de Duchenne.

2002/→ : Expérience professionnelle au Canada

⇒ Marie Valérie Moreno, **étudiante en DEA** Biomécanique et physiologie. Université Technologie de Compiègne. Codirecteurs : F. Goubel, J.Y. Hogrel.

Sujet d'étude : Développement d'un ergomètre coude portable pour la caractérisation de certaines propriétés mécaniques musculaires.

2002/→ : Thèse à l'UTC, UMR-CNRS 6600.

⇒ Stevy Farcy, **étudiant en maîtrise** Entraînement Sportif, option Haut Niveau , Dpt STAPS Paris XII-INSEP.

Sujet d'étude : Comparaison des effets de deux modes d'entraînement (isocinétique versus isotonique) sur la fonction neuromusculaire.

2002/→ : Intégration de l'école d'ingénieur de l'UTC

2000-2001

⇒ Sana Mansour, **doctorante en première année**, inscrite à Paris 5, Codirecteur de thèse : P. Portero (cf p. 12)

⇒ Georges Abou Jaoude, **étudiant en DEA** Physiologie et Biomécanique de l'Homme en mouvement, Université Paris XI. Codirecteur : B. Maton.

Sujet d'étude : Etude de la raideur des muscles croisant l'articulation du coude chez l'adulte sain.

⇒ Caroline Jean, **étudiante en DEA** Physiologie et biomécanique de la performance motrice - STAPS, Université Rennes 2. Codirecteur : P. Portero.

Sujet d'étude : Pratique du VTT en conditions standardisées : influence du pneumatique, du terrain et de la vitesse. « Approche bioénergétique, mécanique et de perception de l'effort chez le pilote de VTT » .

2001/→ : Recrutée par le Ministère Jeunesse et Sport

⇒ Yves Allard, **étudiant en maîtrise** STAPS Education et Motricité (Nantes), Codirecteur : Dr M. Dauty

Sujet d'étude : Test de vitesse de marche sur 10 mètres chez des patients opérés d'une prothèse totale de genou : étude de fiabilité.

4- EXPOSÉ DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

4-1 HISTORIQUE

Mes travaux de recherche ont débuté en DEA au sein du Groupe Hospitalier de la Pitié-Salpêtrière (Paris) en 1994 sous la direction du Pr Michel Fardeau. Il s'agissait d'envisager une technique de quantification de la force musculaire sensible et reproductible chez les enfants atteints de dystrophie musculaire de Duchenne de Boulogne. Un premier outil permettant de mesurer la force musculaire des extenseurs et fléchisseurs des genoux chez ces patients a été développé au cours de mon année de stage de DEA. Ce travail a largement été approfondi ensuite dans le cadre d'un doctorat (1995-1998) réalisé au sein du Département Génie Biologique, UMR-CNRS 6600 de l'Université de Technologie de Compiègne sous la direction du Pr Francis Goubel. La phase de réalisation des protocoles expérimentaux s'est déroulée à l'Institut de Myologie (GH Pitié-Salpêtrière) dirigé par le Pr Michel Fardeau.

Après ma thèse, mon année d'Attaché temporaire d'enseignement et de recherche à l'UFR STAPS de Nantes (1999-2000) m'a permis de participer au développement de son équipe de recherche tout en gardant d'étroites relations avec l'Institut de Myologie.

Par la suite, mon recrutement en tant que maître de conférences au Département STAPS de Paris XII-Val de Marne (2000) qui ne disposait pas de laboratoire de recherche « Sciences de la Vie » rattaché à sa structure m'a permis de continuer à développer mon activité de recherche à l'Institut de Myologie.

Enfin, depuis 2002, date de mon recrutement à l'UFR STAPS de Nantes, mon activité de recherche s'effectue au sein de l'équipe d'émergence Motricité, Interactions, Performance dirigée par A. Guével depuis juin 2004. Cette équipe vient d'être labellisée jeune équipe (J.E. 2438).

La suite de ce document présente les différents axes de mon activité de recherche.

4-2 PRESENTATION GENERALE

Mon activité de recherche est centrée sur l'étude des adaptations biomécaniques et physiologiques du système neuromusculaire. Dans ce cadre, mes projets de recherche se sont développés selon les trois axes suivants :

- **la compréhension du fonctionnement du système neuromusculaire**, c'est à dire de l'effecteur et de sa commande, notamment d'un point de vue biomécanique. Pour ce faire, j'ai été amené à caractériser les propriétés mécaniques des muscles soumis à des contraintes particulières tant chez l'enfant que chez l'adulte : i) immobilisation relative, atrophie musculaire (dystrophies musculaires de Duchenne et de Becker ; apesanteur ; ligamentoplastie...); ii) hyperactivité (athlètes, protocole de rééducation et d'entraînements spécifiques...). L'ensemble de ce spectre de déconditionnement-reconditionnement doit permettre de mieux comprendre le rôle des structures constituant le système neuromusculaire et de discuter des causes potentielles à l'origine des adaptations objectivées.

- **La conception, la fabrication et la validation de nouveaux outils d'analyse**. La caractérisation des propriétés mécaniques des muscles chez l'Homme nécessite en effet l'utilisation de dispositifs spécifiques afin, non seulement de caractériser le générateur de force proprement dit mais aussi les systèmes de transmission de cette force nécessaires pour mobiliser le squelette et les charges additionnelles. Nous avons donc été amenés à développer spécifiquement certains ergomètres pour réaliser nos protocoles expérimentaux.

- Enfin, **l'expertise et l'évaluation d'outils** (de recherche, d'entraînements...) **et de protocoles** (d'entraînement, de traitement, de rééducation...). Sur la base de nos connaissances scientifiques et grâce aux outils dont nous disposons, il a été possible par exemple d'étudier l'innocuité de traitements thérapeutiques sur la fonction neuromusculaire, l'efficacité d'outils de renforcement musculaire ou de protocoles d'entraînement et de rééducation en fonction des objectifs poursuivis. Ces études permettent ensuite de réaliser certaines préconisations afin d'améliorer l'efficacité de ces outils et procédures spécifiques.

4-3 DESCRIPTION DES PROJETS DE RECHERCHE ANTERIEURS (1996-2004)

Après un bilan global des activités de recherche développées pendant ces 8 années, les différents projets réalisés seront succinctement décrits selon les trois axes cités précédemment.

4-3-1 GENERALITES

Globalement les activités de recherche effectuées pendant cette période incluant la réalisation de ma thèse, s'inscrivent dans le cadre de mon activité en tant qu'attaché temporaire de recherche et de maître de conférences jusqu'à cette année.

La majeure partie des projets développés pendant cette période s'intéresse à la caractérisation des propriétés mécaniques d'un système musculo-articulaire chez l'Homme grâce à la conception de nouveaux ergomètres permettant de réaliser des tests segmentaires au sein du laboratoire de Biomécanique et Instrumentation médicale (UMR CNRS 6600 - UTC) dirigé par le Pr F. Goubel. Cette étape s'est avérée nécessaire et primordiale compte tenu des contraintes mécaniques différentes auxquelles nous sommes confrontés selon les populations et les groupes musculaires testés. Par exemple, le mécanisme de blocage-libération d'un système mobile nécessite de trouver des solutions techniques différentes du point de vue mécanique si l'on s'adresse à un athlète développant des couples de force de 300 N.m ou si l'on s'adresse à des enfants atteints de dystrophie musculaire développant des couples de force maximaux inférieurs à 1 N.m. Ce type de transfert de technologie a toujours constitué une part importante des objectifs de mes travaux de recherche.

Très rapidement, il est apparu nécessaire, pour connaître et comprendre le fonctionnement global d'un système musculo-articulaire non seulement de caractériser le couple de force musculaire exprimé en périphérie (ce qui en soit reste chez l'Homme un exercice délicat), mais aussi de caractériser le comportement de l'ensemble des éléments permettant de transmettre la force générée au niveau des ponts d'actomyosine aux éléments squelettiques pour les mobiliser. Pour ce faire, des méthodes originales appliquées à l'Homme s'appuyant sur des modèles musculaires classiques ont été utilisées. Il

s'agit notamment de la méthode de la détente rapide et de celle des perturbations sinusoïdales permettant de caractériser des paramètres de raideur, de viscosité et d'inertie des systèmes mobilisés. Puisque le système neuro-musculaire présente une certaine plasticité, il ne semblait pas irraisonnable de penser que les paramètres mécaniques sus-cités soient eux mêmes sensibles aux modifications de contraintes fonctionnelles auxquelles ce système peut être soumis. Ainsi, ces techniques ont été pour la première fois utilisées avec succès sur des patients atteints de dystrophie musculaire de Duchenne, ce qui a permis notamment à la technique de la détente rapide d'être intégrée parmi les tests réalisés dans la phase initiale de certains protocoles de thérapies géniques. Le principal objectif de ces tests était de montrer l'innocuité de ces protocoles thérapeutiques sur la fonction musculaire. Par la suite, ces techniques ont été appliquées à différentes populations mettant en jeu spécifiquement le cycle étirement-détente comme les volleyeurs et les poloïstes par exemple. Parallèlement, la caractérisation des propriétés biomécaniques du générateur de force musculaire a également été réalisée s'agissant de l'étude de populations spécifiques (athlètes, sédentaires, patients) à la fois par des méthodes segmentaires mais aussi par des mesures globales (dynamique).

Mon année passée à l'UFR STAPS de Nantes en tant qu'ATER a été l'occasion de développer une orientation supplémentaire dans le domaine de la caractérisation de la fonction neuromusculaire concernant l'étude de différents modes de contraction musculaire. Ce travail, poursuivi ensuite à l'Institut de Myologie, a continué de se développer à l'UFR STAPS de Nantes.

Enfin, il est également apparu important de tenter, sur la base des modèles musculaires connus, de faire le lien entre les différentes techniques que nous utilisons et qui permettaient de caractériser des paramètres mécaniques *a priori* analogues. Par exemple, les paramètres de viscosité « musculaire » obtenus en contraction dynamique d'une part et en contraction quasi-statique d'autre part caractérisent-ils le même comportement ? Ou bien encore, est-il possible de déterminer par le calcul des relations caractéristiques de contractions en condition dynamique à partir de contractions quasi-statiques ? La réponse positive à cette dernière question permettrait d'envisager le

comportement dynamique qu'aurait le groupe musculaire testé chez des sujets incapables de réaliser ces tests comme les patients atteints de dystrophie musculaire de Duchenne qui, par contre, peuvent réaliser les tests quasi-statiques.

Par ailleurs, la représentativité de la mesure fonctionnelle globale réalisée au niveau d'un groupe musculaire grâce aux tests segmentaires par rapport aux comportements individuels des structures impliquées reste délicate à établir. De fait, j'ai commencé à m'intéresser à la possibilité de caractériser le comportement d'un muscle au cours d'une contraction in situ : Tout d'abord, par la mesure relativement classique de son activité électromyographique de surface pour les muscles superficiels et, ensuite, en validant chez l'Homme une technique plus originale d'élastographie impulsionnelle (décrite succinctement plus loin) permettant de caractériser par exemple la raideur d'un muscle du groupe musculaire. Ce travail initié à l'Institut de Myologie s'est poursuivi ensuite au laboratoire Motricité, Interactions, Performance.

En septembre 2002, mon arrivée dans l'équipe d'émergence de l'UFR STAPS m'a donc permis d'envisager un transfert d'une grande partie de mes activités antérieures au laboratoire le développement de nouvelles orientations dont je dégagerai les contours un peu plus loin. Comme il l'a déjà été dit, et indépendamment des outils et méthodes utilisés, le dénominateur commun à tous mes projets de recherche concerne la caractérisation et l'étude des adaptations du système neuromusculaire soumis à différentes contraintes. Je suis convaincu de l'intérêt que présente l'étude du système neuromusculaire sur l'ensemble du spectre des modifications de la demande fonctionnelle allant de l'hypo-activité (pathologie neuromusculaire, immobilisation réelle ou simulée...) à l'hyperactivité (différentes modalités d'entraînement). Je suis par ailleurs également convaincu de l'intérêt que présentent les travaux sur le muscle isolé pour mieux comprendre et interpréter nos données expérimentales obtenues chez l'Homme. De fait, un certain nombre de collaborations scientifiques (citées ci-après) ont été mises en œuvre ou initiées pendant cette période, quelle que soit la structure à laquelle j'étais rattaché, afin de répondre plus complètement à nos objectifs.

Tous ces éléments sont détaillés dans la suite de ce document. Ce dernier mentionne également les subventions obtenues pour la réalisation des projets présentés ci-après selon les trois axes décrits précédemment.

4-3-2 AXE « COMPREHENSION DU FONCTIONNEMENT DU SYSTEME NEUROMUSCULAIRE »

a) Sujet de l'étude : Quantification des propriétés mécaniques des muscles croisant l'articulation du coude droit par l'intermédiaire des techniques de la détente rapide, des perturbations sinusoïdales et mesure de force maximale en condition isométrique chez des enfants et adolescents sains et atteints de dystrophie musculaire de Duchenne (DMD) (1997-98).

Cette étude réalisée sur un ergomètre coude développé pendant ma thèse à l'Université de Technologie de Compiègne et implanté à l'Institut de Myologie a montré qu'il était possible de caractériser les enfants sains et DMD par certains paramètres viscoélastiques, notamment de raideurs musculaire et musculo-articulaire qui augmentent avec la faiblesse musculaire liée à l'aggravation de la maladie. Il a été proposé qu'une quantification de la raideur musculaire soit intégrée au suivi clinique des enfants DMD dans le cadre d'une consultation pluridisciplinaire.

Une subvention de 440 000 francs (environ 67 000 €) a été obtenue en réponse à un appel d'offre AFM 1996 pour la réalisation de l'ergomètre (annexe 8-1, p. 88).

L'étude préliminaire de ce travail a fait l'objet de la communication n° 11 (p.78). De plus, ce travail, dont une partie a été présentée au congrès Myologie 2000 (communication n°9, p.78) fait l'objet de la publication n°7 (p.74).

Par ailleurs, un continuum dans la relation raideur musculaire-force du biceps brachial obtenue pour les enfants sains à partir de nos données (compte tenu de la modélisation musculo-articulaire du coude), et pour des adultes sains testés dans d'autres études

utilisant la technique du quick-release a été montré. Cette étude fait l'objet de la publication n°6 (p.74).

b) Sujet de l'étude : Etude de la viscosité du muscle au cours de la contraction musculaire (1997).

L'objectif de cette étude, réalisée sur un ergomètre cheville à l'U.T.C., était d'envisager la viscosité musculaire des fléchisseurs plantaires selon deux approches chez de jeunes adultes sains. Ce travail a permis de calculer une viscosité « analogue » à partir de tests isocinétiques et de comparer celle-ci à la viscosité calculée à partir des tests de perturbations sinusoïdales. Nos résultats montrent que ces deux types de viscosité ont une origine différente. Ce travail fait l'objet de la publication n°8 (p. 74).

c) Sujet de l'étude : Etude de la raideur des muscles croisant l'articulation du coude chez l'adulte sain (1999-2000).

Ce projet a été mis en oeuvre à l'Institut de Myologie afin de discuter de l'évolution des propriétés mécaniques, essentiellement de la raideur musculo-tendineuse et de la raideur musculo-articulaire, avec l'âge des sujets en comparant ces données avec celles obtenues préalablement sur les enfants sains. Par ailleurs, l'effet potentiel de la manualité sur les valeurs de ces paramètres est également étudié. L'étude mécanique est couplée à une étude de l'activité électromyographique des biceps et triceps brachiaux. Cette étude permettait de poursuivre la discussion entamée après la publication n°6 (p.74). Elle montre qu'il n'y a pas d'incidence de la manualité sur les raideurs calculées et, par ailleurs, qu'il existe une différence significative entre les index de raideurs adultes et enfants sains pour les deux types de raideurs considérées.

Ce protocole a été réalisé par un étudiant en DEA de Biomécanique d'Orsay (Paris XI), co-encadré avec le Pr B. Maton.

d) Sujet de l'étude : Evaluation des caractéristiques mécaniques musculaires dynamiques à partir des perturbations sinusoïdales chez l'enfant. Application à la dystrophie musculaire de Duchenne (2001-2002)

L'objectif de ce projet issu d'une collaboration entre l'Institut de Myologie et l'U.T.C. était de quantifier les propriétés visco-élastiques des muscles croisant l'articulation du coude chez les patients atteints de dystrophie musculaire de Duchenne dans le cadre d'une consultation pluridisciplinaire. Notre approche originale devait permettre, grâce au développement d'un modèle mathématique, de déterminer des paramètres mécaniques du muscle en condition dynamique (relation couple-vitesse angulaire) à partir de données quasi-isométriques (perturbations sinusoïdales) chez des sujets incapables de réaliser des tests isocinétiques. Ce protocole a été réalisé par un étudiant en DEA Génie Biomédical de l'U.T.C., co-encadré avec le Pr F. Goubel. Les données issues de cette étude devraient être publiées. Elles confirment l'incapacité des enfants atteints de dystrophie musculaire, notamment les plus malades à développer un effort maximal en dynamique. Par ailleurs, cette étude montre qu'il est possible de caractériser le comportement mécanique en dynamique de sujets sains à partir de la technique des perturbations sinusoïdales, ce qui pourrait permettre d'envisager l'utilisation de cette modélisation à partir des mêmes données obtenues chez des enfants atteints de dystrophie.

e) Participation à des protocoles d'essais cliniques à visée thérapeutique (2001-2002)

Deux protocoles d'essais cliniques à visée thérapeutique sur la fonction musculaire ont été initiés en partie à l'Institut de Myologie. Les mesures que nous proposons pour évaluer la fonction musculaire ont été intégrées aux protocoles notamment pour vérifier l'innocuité des injections sur la fonction musculaire étudiée.

- **Etude Clinique du transfert d'un gène codant pour la dystrophine après injection intramusculaire d'ADN NU TG5001 chez des sujets atteints de myopathie de type Duchenne**

Projet de recherche, annexe 3 p. 45 : « *Protocole d'évaluation des muscles biceps brachial et radiaux - Force musculaire et EMG de surface* ». Il s'agissait de réaliser la mesure de force musculaire maximale des fléchisseurs et extenseurs des poignets droit et gauche sur des sujets atteints de dystrophie musculaire de Duchenne bénéficiant d'une thérapie génique. (annexe 8-3, p.137-139)

- **Etude de l'efficacité et de la tolérance du salbutamol dans la dystrophie musculaire facio-scapulohumérale (FSHD)**

Projet de recherche, annexe 5 p. 38 : « *Etude ancillaire : Protocole de mesure des propriétés élastiques musculaires* ». Il s'agissait de caractériser la raideur des fléchisseurs et extenseurs des coudes droit et gauche sur des patients atteints de la dystrophie musculaire Fascio-Scapulohumérale recevant des injections de Salbutamol. (annexe 8-3, p.140-142)

f) Sujet de l'étude : Evolution des paramètres neuromusculaires au cours d'une séance d'entraînement standardisée : mode isotonique versus mode isocinétique (2002-2003).

Cette étude a été développée au laboratoire Motricité, Interactions, Performance de l'UFR STAPS de Nantes sur la base d'une étude présentée ci-après (étude « i », p.32). Il s'agissait de comparer les effets de deux modalités de contractions standardisées afin d'explicitier les résultats de l'étude précédente en terme de fatigue neuromusculaire ou de sollicitation mécanique différenciée au cours d'une série de contractions. Les résultats montrent que contrairement à ce qui est attendu, les paramètres neuromusculaires associés aux deux modalités de contraction ne sont pas différents à quantité de travail externe équivalent. Cette étude réalisée par un étudiant en DEA de Physiologie et

Biomécanique de Rennes 2 fait l'objet de la communication n°2 (p. 77) présentée au congrès de la société de Biomécanique (Paris XII, 2004) et de la publication n° 1 (p. 76) en préparation pour la revue Journal of Athletic training. Par ailleurs, les stratégies de contraction mises en jeu dans les deux modalités de contraction doivent être explorées plus finement, ce qui explique le prolongement de ce projet (cf projet de recherche en cours).

Ce travail a été une des études supports d'une demande de subvention à la Direction Régionale et Départementale de la Jeunesse et des Sports (D.R.D.J.S.) des Pays de la Loire obtenue par le Laboratoire MIP en 2003-2004 (annexe 8-1, p.125).

4-3-3 AXE « CONCEPTION, FABRICATION ET VALIDATION DE NOUVEAUX OUTILS D'ANALYSE »

a) Sujet de l'étude : Conception et développement d'un ergomètre coude chez l'enfant (1996-97)

Ce projet, premier temps de mon projet de thèse, a consisté à concevoir et mettre en œuvre un dispositif permettant de quantifier les propriétés mécaniques d'une structure musculo-articulaire chez l'Homme. L'outil ergométrique, qui a été conçu au laboratoire de Biomécanique et instrumentation médicale (UMR-CNRS 6600, U.T.C.), permet de caractériser les paramètres de couple de force, de raideur musculaire, et de raideur, viscosité et inertie musculo-articulaires des muscles fléchisseurs (ou extenseurs) croisant l'articulation du coude (droit ou gauche) chez des enfants.

Les techniques implémentées sur cet outil dérivent de celles implémentées sur un ergomètre cheville fabriqué à l'Université de Technologie de Compiègne pour tester les cosmonautes à la Cité des Etoiles (Moscou). Il s'agit : i) de la mesure de force musculaire en condition isométrique ; ii) de la technique de détente rapide (quick-release) ; iii) de la technique des perturbations sinusoïdales ; iv) de la technique isocinétique.

Une demande de subvention d'environ 67 000 € (440 KF) a été réalisée auprès de l'Association Française contre les Myopathies (AFM) et obtenue par le laboratoire de

Biomécanique et instrumentation médicale (UMR-CNRS 6600, U.T.C.) pour ce projet (annexe 8-1, p. 88).

Cet outil, présenté dans la publication n°7 (p. 74), est implanté à l'Institut de Myologie (GH Pitié-Salpêtrière, Paris) où, lors de la seconde étape de ce projet, se sont déroulés les premiers tests sur les enfants. Il a été utilisé depuis dans plusieurs protocoles d'évaluation fonctionnelle.

b) Sujet de l'étude : Développement d'un ergomètre coude portable pour la caractérisation de certaines propriétés mécaniques musculaires (2001-2002)

Ce projet est né d'une sollicitation des équipes médicales de la consultation pluridisciplinaire de l'Institut de Myologie qui souhaitent disposer de tests simples, rapides et objectifs permettant de suivre l'évolution de pathologies neuromusculaires et de déterminer les effets potentiels d'un protocole de rééducation sur certains paramètres mécaniques du muscle. Notre objectif a donc été, sur la base de notre expérience, de concevoir un outil simplifié et transportable permettant de mesurer la force musculaire et les raideurs musculo-tendineuse passive et active d'un groupe musculaire. Cet outil devait nous permettre de quantifier ces paramètres à la fois sur des sujets présentant une atteinte neuromusculaire et sur des sujets sains sédentaires ou entraînés. De nouvelles solutions technologiques ont donc dû être développées pour répondre à ce cahier des charges. Ce projet s'est déroulé à l'Institut de Myologie en collaboration avec la société Bio2m (gradient-U.T.C.). Il a été réalisé par une étudiante du DEA Génie Biomédical de l'UTC co-encadrée avec Pr F. Goubel et J.Y. Hogrel.

Pour la réalisation de ce projet, j'ai obtenu une subvention d'environ 30490 € (200 KF) en réponse à l'appel d'offre AFM 2000 (annexe 8-1, p. 89). Cet ergomètre est actuellement implanté à l'Institut de Myologie (GH Pitié-Salpêtrière).

4-3-4 AXE « EXPERTISE ET EVALUATION » :

- D'OUTILS (DE RECHERCHE, D'ENTRAINEMENT...)
- DE PROTOCOLES (D'ENTRAINEMENT, DE TRAITEMENT, DE REEDUCATION...)

Globalement, cet axe peut être subdivisé en une première partie relative à l'étude de méthodes ou techniques d'évaluation de la fonction neuromusculaire (études « a » à « f ») et en une seconde relative à l'étude des adaptations neuromusculaires adossées à une pratique physique ou sportive spécifique (études « g » à « n »).

a) Sujet de l'étude : Etude la pertinence de l'utilisation des perturbations sinusoïdales pour caractériser l'évolution des propriétés mécaniques des muscles suite à une modification de la demande fonctionnelle (1996).

Ce travail réalisé à l'UTC a permis de montrer que l'utilisation de la technique des perturbations sinusoïdales permettait de quantifier l'influence d'un entraînement de type pliométrique (succession de cycles étirement-détente) sur les caractéristiques mécaniques musculo-articulaires des fléchisseurs plantaires de la cheville. Nous avons mis en évidence une diminution de la raideur musculo-articulaire avec l'entraînement de type pliométrique. Ce travail a fait l'objet de la publication n° 11 (p. 75).

b) Sujet de l'étude : Etude de la pertinence de l'utilisation de la technique de détente rapide (quick-release) pour caractériser l'élasticité musculaire des extenseurs des genoux d'une part et des fléchisseurs du coude d'autre part, chez des enfants et adolescents atteints de dystrophie musculaire de Duchenne (DMD) (1996-97).

Cette étude préliminaire de mon travail de thèse était destinée à montrer la faisabilité d'une part et l'intérêt d'autre part de l'utilisation de la méthode de la détente rapide pour caractériser les patients atteints de dystrophie musculaire. Pour cela, un aménagement du dispositif expérimental développé au cours de mon DEA (Paris XI, Orsay) implanté alors au pavillon Risler (consultation Pr M. Fardeau, GH Pitié-Salpêtrière) a été

réalisé. Cet aménagement nous permettait de caractériser la force et la raideur des fléchisseurs du coude et des extenseurs du genou. Ce travail indispensable avant de nous lancer dans la fabrication d'un outil coûteux, a permis de montrer que les enfants DMD étaient capables de réaliser les tests de détente rapide. Par ailleurs, cette étude a montré qu'il existait une relation entre le degré de faiblesse musculaire et l'index de raideur musculo-tendineux calculé. Ce travail a fait l'objet de la communication n°12 (p. 78) et de la publication n°10 (p. 75).

c) Sujet de l'étude : Etude de la reproductibilité de la vitesse de marche chez des sujets présentant une arthroplastie totale du genou (1999).

Ce projet a été réalisé dans le service de rééducation fonctionnelle du CHU de Nantes, en collaboration avec le laboratoire Motricité, Interactions, Performance, par un étudiant de Maîtrise STAPS mention Education et Motricité, co-dirigé avec le Dr M. Dauty. Ce travail a permis de montrer la reproductibilité de la mesure de vitesse maximale de marche déterminée par chronométrage manuel chez des sujets âgés après une opération du genou. Cette étude préalable à la détermination d'une vitesse objective permettant au praticien de décider de l'abandon des cannes anglaises au cours de la rééducation a fait l'objet de la publication n° 5 (p. 74).

d) Sujet de l'étude : Etude relative à l'utilisation du système HF1 : expertise physiologique et biomécanique (2001).

Ce projet mené à Valence (LPG Systems®) et à l'Institut de Myologie était porté par l'Institut de la Performance Humaine (IPH). Il consistait en l'étude des réponses physiologiques et biomécaniques de sujets utilisant le système de renforcement musculaire HF1 mis au point par la société LPG Systems®. Il s'agit d'un dispositif de renforcement musculaire des membres supérieurs et inférieurs et du tronc, le sujet étant placé sur un plateau inclinable et pouvant être mis en rotation. Notre principal objectif était d'établir

les précautions éventuelles d'utilisation de cet outil. Cette étude a été finalisée par un rapport d'expertise remis à la société LPG Systems® (annexe 8-5, p. 154).

e) Sujet de l'étude : Validation d'un outil d'élastographie impulsionnelle pour caractériser la raideur des muscles in vivo (2001-2002)

La problématique de cette étude est issue d'une collaboration entre l'Institut de Myologie et le laboratoire Ondes et Acoustique de l'Ecole Supérieure de Physique Chimie Industrielle (Pr M. Fink, Paris). Il s'agissait de valider les mesures de raideur des tissus mous de l'organisme, principalement des muscles, effectuées grâce à une nouvelle méthode d'élastographie impulsionnelle au cours de la contraction musculaire. Ceci a été réalisé au cours de la flexion isométrique du coude par la corrélation des résultats obtenus par trois mesures au cours d'un protocole original de rampe d'activité électromyographique du biceps brachial : deux mesures locales (activité électromyographique de surface et élasticité du muscle déterminée par le dispositif d'élastographie impulsionnelle) et une mesure globale (couple externe isométrique). Les résultats de cette étude qui montrent une corrélation entre le niveau d'activation du muscle et sa raideur transverse sont présentés dans la publication n° 1 (p. 74). Ces résultats permettent en outre d'envisager des applications pratiques et théoriques extrêmement intéressantes qui seront développées dans la partie projets de recherche en cours.

f) Sujet de l'étude : Effets des étirements statiques sur les propriétés biomécaniques du muscle (2003-2004)

Cette étude préliminaire au laboratoire MIP a été mise en œuvre pour évaluer la faisabilité d'expérimentations permettant de déterminer l'évolution de la viscoélasticité et de la force musculaire de structures soumises à différentes modalités d'étirements aigus (continu et intermittent) et chroniques. Nos principaux objectifs sur de tels projets sont les suivants : 1) étudier les effets aigus et chroniques des différents types d'étirements sur la fonction neuromusculaire puisque leurs rôles sont controversés (cf projet c, p. 66) ;

2) déterminer le comportement passif des muscles d'un point de vue mécanique afin de le confronter aux modèles mis en place par ailleurs (cf projet a, p. 43). Les résultats de cette étude menée sur les ischiojambiers par un étudiant de Maîtrise STAPS mention Education et Motricité, ont montré une diminution de la raideur et de la viscosité des structures musculo-articulaires testées immédiatement après des étirements statiques sans modification de la capacité de production de force musculaire en condition dynamique. Ces résultats devraient faire l'objet d'une communication et /ou d'une publication.

g) Sujet de l'étude : Comparaison de l'évolution de la raideur musculaire et de la raideur musculo-articulaire (au niveau de l'articulation de la cheville) respectivement quantifiées par la technique de la détente rapide et celle des perturbations sinusoïdales chez des sujets réalisant un entraînement de type pliométrique (1998).

Des données divergentes concernant l'évolution de la raideur musculo-tendineuse chez l'homme et sur muscle isolé sont décrites dans la littérature. De même, nos résultats antérieurs (étude « a », p. 28) obtenus sur l'évolution de la raideur musculo-articulaire suite à un entraînement pliométrique divergeaient par rapport aux données de la littérature concernant l'évolution de la raideur musculo-tendineuse après ce même type d'entraînement. Cette étude a donc été réalisée afin de vérifier si ces différences ne pouvaient pas être liées aux caractéristiques des protocoles expérimentaux utilisés, et notamment de l'entraînement pliométrique proprement dit (intensité, durée...). Nos résultats confirment les divergences d'évolution des paramètres de raideur entre eux et entre la raideur musculo-tendineuse déterminée chez l'homme et sur muscle isolé. Ces résultats ont été ensuite discutés en termes de structures potentiellement impliquées dans les adaptations observées. Cette étude présentée en communication orale (n°10, p. 78) au VIII^{ème} Congrès International de l'**A.C.A.P.S.** de Macolin (1999) a fait l'objet de la publication n°9 (p. 75).

h) Sujet de l'étude : Bioénergétique et VTT en conditions standardisées : influence du type de pneumatique et du terrain (2000-2001).

Ce projet peut paraître éloigné des préoccupations affichées concernant mes thématiques de recherche. Néanmoins, il m'a été proposé par le Pr P. Portero afin de traiter des aspects (bio)-mécaniques de ce travail. Aussi, à la suite d'une étude préalable réalisée en 1999/2000 et qui a fait l'objet de la communication n°8 (p. 78), l'objectif de cette étude était de quantifier le coût énergétique d'efforts standardisés réalisés par des « VTTistes », lié à l'utilisation de deux types différents de pneumatiques de VTT en fonction de différents types de revêtement. Pour ce faire des paramètres métaboliques ont été explorés grâce à l'utilisation d'un analyseur de gaz portable K4B2. Les paramètres mécaniques caractérisant l'effort réalisé ont été recueillis grâce à un système SRM® : ce système permet de déterminer la fréquence de pédalage, la puissance externe développée et la vitesse en situation de pratique sur le terrain. Cette étude, réalisée par une étudiante en DEA Physiologie et biomécanique de la performance motrice, Université Rennes 2 et co-dirigée avec P. Portero, a fait l'objet de la communication orale n°7 (p. 77) au congrès de l'**A.C.A.P.S.** de Valence (2001). Elle a également servi de base à la communication n°5 (p. 77) présentée au XIX^{ème} congrès international de la Société de Biomécanique à Dunedin (Nouvelle Zélande, 2003) et à un article en préparation n°5 (p. 76).

i) Sujet de l'étude : Effets de deux modes d'entraînement (isocinétique versus isotonique) sur la fonction neuromusculaire (2001-2002)

L'objectif de ce projet, né d'une collaboration entre l'Institut de Myologie et l'UFR STAPS de Nantes est d'étudier la pertinence de l'entraînement isocinétique par rapport à l'entraînement isotonique en considérant les adaptations biomécaniques et électromyographiques que ces deux types d'entraînement induisent sur le système neuromusculaire et leurs répercussions potentielles sur la rééducation et la performance. La standardisation des protocoles d'entraînement et d'évaluation constituait le problème

majeur de ce type d'étude. Aussi, les tests d'évaluation et l'entraînement ont été réalisés au moyen d'un seul et unique outil. De même, les deux types d'entraînement ont été quantifiés, notamment en terme de travail total externe et ajustés pour être d'intensité quasi identique. Cette étude préalable a été réalisée par un étudiant de Maîtrise « Entraînement, option haut niveau » de Paris XII-INSEP. A terme, ce projet devrait permettre d'apporter des réponses et solutions pratiques au monde sportif et médical dans le cadre du renforcement musculaire. Néanmoins, ce travail a permis de soulever de nombreuses questions à l'origine de la poursuite de ce projet (cf étude « f » p. 25, et projet b, p. 55).

j) Sujet de l'étude : Evaluation de la force et de la raideur musculo-tendineuse des fléchisseurs et extenseurs du poignet chez les volleyeuses (2001-2002)

Ce projet réalisé à l'Institut de Myologie avait pour but de quantifier et comparer les propriétés musculo-tendineuses des muscles croisant l'articulation du poignet (extenseurs et fléchisseurs) chez les adultes sains. Deux paramètres de « raideur », la souplesse articulaire (passive et active) d'une part et la raideur musculo-tendineuse d'autre part, ont été caractérisés pour chacune des fonctions chez des sujets sédentaires et volleyeuses de haut niveau afin de déterminer une adaptation chronique liée à la pratique intensive de cette activité. Les résultats montrent que les deux types de raideur caractérisés ne sont pas corrélés, qu'il n'y a aucune différence de raideur musculo-tendineuse intergroupe ou interfonction. Par contre, la sollicitation chronique des poignets liée à la pratique du volley augmente la souplesse active du poignet en extension semblant mettre en jeu des facteurs d'adaptation nerveuse plutôt que structurale. Cette étude a fait l'objet de la publication n°4 (p. 74). Cette dernière a également été sélectionnée pour être en partie publiée dans le « Year Book of Sports Medicine 2004 », édité par Elsevier (cf p. 75).

k) Sujet de l'étude : Etude des adaptations biomécanique et électrophysiologique des muscles croisant l'articulation du coude dans les sports de lancer : application au water polo (2002-2003)

Ce projet, issu d'une collaboration entre l'Institut de Myologie et l'UFR STAPS de Nantes, était destiné à caractériser les adaptations spécifiques du système neuromusculaire aux variations de la demande fonctionnelle. La pratique du waterpolo de compétition implique en effet, d'une part la mise en jeu bilatérale des membres supérieurs et, d'autre par l'utilisation préférentielle d'un membre supérieur dans le geste de lancer par la mise en jeu de cycles étirement-détente. Les résultats des mesures mécaniques et électrophysiologiques montrent une stratégie de recrutement musculaire spécifique aux poloïstes lors des mouvements d'extension du coude indépendamment de la latéralité. Ce projet a été réalisé par une étudiante du DEA Génie Biomédical de l'UTC, co-encadrée avec le Pr P. Portero. Il a fait l'objet d'une communication orale (n°3, p. 77) présentée à l'European College of Sport Sciences de Clermont Ferrand (2004).

l) Sujet de l'étude : Caractérisation des propriétés mécaniques des muscles rotateurs internes et externes de l'épaule chez des volleyeurs professionnels - incidences sur la performance au smash (2002-2003)

Cette étude réalisée à l'UFR STAPS de Nantes est issue d'une collaboration avec le laboratoire de Biomécanique de l'UFR STAPS de Rennes 2 (Pr P. Delamarche). Il s'agissait d'étudier les muscles stabilisateurs de l'épaule dont la mobilisation est importante pour les performances de haut niveau chez les athlètes sollicitant cette articulation. L'objectif de ce projet était donc de caractériser les propriétés mécaniques des muscles rotateurs internes et externes de l'épaule de volleyeurs professionnels et amateurs, et de sujets sédentaires afin de mettre en évidence les adaptations neuromusculaires liées à la pratique du volley-ball et certains déficits potentiellement induits par une pratique intensive de cette activité. Les premiers résultats de cette étude en phase finale d'analyse montrent

clairement un déficit des rotateurs externes chez les volleyeurs professionnels. Une publication est actuellement en cours de rédaction (n°4, p. 76).

Ce travail a été une des études support d'une demande de subvention à la DRDJS des Pays de la Loire obtenue par le Laboratoire MIP en 2003-2004 (annexe 8-1, p.125).

m) Sujet d'étude : Effets de différentes méthodes de renforcement musculaire, sur la force maximale, l'endurance de force et la performance en aviron (2003-2004)

Cette étude correspondait à une première approche de l'aviron qui constitue une pratique pour laquelle nous souhaitons développer une activité privilégiée compte tenu de son implantation dans la région Ouest (cf projet d, p. 70). Il s'agissait d'évaluer les effets d'une nouvelle programmation de l'entraînement en puissance sur la fonction neuromusculaire. Les premiers résultats, dont certains sont toujours en cours de traitement, montrent 1) qu'il semble y avoir des profils types « rameurs » concernant les relations caractéristiques de biomécanique musculaire (notamment couple de force-angle articulaire) ; 2) que l'entraînement puissance permet d'augmenter la force développée sans limiter l'endurance de force. Cette étude préliminaire réalisée par un étudiant de Licence STAPS, mention entraînement sportif et co-encadré avec R. Yquel (PhD) devrait faire l'objet d'une communication.

n) Participation au sujet d'étude : Caractérisation des sollicitations musculaires des extenseurs de la jambe lors de séquences codifiées d'entraînement en aviron.

Cette étude développée dans le cadre du projet global présenté plus loin (projet d, p. 70) et dont le porteur principal est A. Guével, tente de caractériser, à l'aide de l'électromyographie de surface, les niveaux d'activation des extenseurs de la jambe lors de séquences d'entraînement en aviron. Les résultats montrent une augmentation de l'activité électrique des muscles étudiés et de la puissance produite avec l'intensité de l'exercice. La réalisation de séquences d'entraînement à intensité maximale induit des niveaux élevés d'activation des extenseurs de la jambe (55 à 72% du niveau d'activation maximale isométrique). Ces séquences d'entraînement pourraient engendrer des adaptations

neuromusculaires proches de celles visées lors d'exercices de musculation en salle réalisés par les rameurs. Ce projet fait l'objet de la communication orale n° 1 (p. 77) acceptée à la 3^{ème} Journée Internationale des Sciences du Sport en novembre 2004 (INSEP, Paris).

4-4 PROJETS DE RECHERCHE EN COURS (2004-2005) ET PERSPECTIVES

4-4-1 INTRODUCTION

L'UFR STAPS de Nantes est une structure relativement jeune puisqu'elle a été créée en 1998. La politique de recherche a commencé d'être élaborée au sein de cette structure en 2000 grâce à la création d'une Commission Scientifique. La structuration de l'activité de recherche impulsée par la Direction de l'UFR a abouti à une reconnaissance locale de l'équipe « Motricité, Interactions, Performance » comme Equipe d'Emergence en 2001.

C'est dans ce contexte que mon recrutement (septembre 2002) s'est déroulé avec une volonté affichée par la Direction de l'UFR et l'équipe de recherche en place dirigée alors par J. Prioux que de permettre le développement de cette équipe tant du point de vue des locaux, des outils de recherche à acquérir ou à concevoir que du point de vue de sa structuration en vue d'obtenir une reconnaissance ministérielle. Cette équipe en émergence bi-disciplinaire (Physiologie- Psychologie) était constituée de 6 enseignants-chercheurs (3 de chaque champ disciplinaire).

De fait, dès mon arrivée en septembre 2002, j'ai été chargé de réfléchir aux actions permettant à l'équipe de se doter d'un ergomètre segmentaire indispensable au développement d'un des axes affichés dans le programme de l'équipe et en adéquation avec mes propres thématiques de recherche. Cet outil a finalement été livré dès décembre 2002, ce qui m'a permis d'engager rapidement certains projets relatifs à l'étude de la fonction neuromusculaire et de former des étudiants de 3^{ème} cycle.

Parallèlement, et collectivement autour du directeur du laboratoire, une réflexion s'est développée afin de déposer une demande de reconnaissance ministérielle Jeune Equipe pour le quadriennal 2004-2007. Cette demande vient d'aboutir favorablement puisque notre équipe est labellisée Jeune Equipe n°2438 pour deux ans. Le projet scientifique développé dans cette demande place la performance motrice au cœur de nos préoccupations (cf www.univ-nantes.fr/staps). Ainsi, la partie concernant l'axe physiologie de l'équipe développe le projet d'étude de la fonction musculaire et des contraintes physiologiques en relation avec la performance motrice avec deux thématiques principales : la caractérisation de la fatigue musculaire comme facteur limitant de la performance motrice d'une part et l'analyse des adaptations de la fonction musculaire aux exercices aigus et chroniques d'autre part. C'est donc dans ce cadre que j'entends poursuivre le développement de mes activités de recherche au sein de l'UFR. Par ailleurs, de récents changements au sein de l'équipe de recherche ont abouti à la nomination d'A. Guével à la direction de l'équipe « Motricité, Interactions, Performance » et, pour ce qui concerne le versant recherche en « Sciences de la Vie », à un resserrement thématique centré autour de l'étude de la fonction neuromusculaire. Ce dernier point met en adéquation le programme de l'équipe et les thématiques de recherche développées par les deux enseignants-chercheurs en Sciences de la Vie et permet également de répondre en partie aux critiques formulées par le ministère lors de l'étude du dossier de labellisation de l'équipe MIP.

4-4-2 GENERALITES

Depuis janvier 2004, un nouveau Conseil Scientifique a été constitué à l'UFR STAPS. J'ai souhaité m'y présenter et y ait été élu, ce qui me permet de participer activement au travail de proposition de structuration de la recherche au sein de cette UFR. Par ailleurs, j'ai accepté cette année de siéger au sein de 3 commissions de spécialistes en 74^{ème} section : A l'Université de Nantes, à l'Université du Maine et enfin à l'Université Paris XII-Val de Marne.

Depuis le début de l'année universitaire (2004-2005), j'encadre (outre l'étudiante en fin de thèse à Paris V, cf p.12) deux étudiants en deuxième année de thèse inscrits à

l'Ecole Doctorale Chimie-Biologie de Nantes et dirigés par le Pr J. Prioux. Ils sont intégrés sur deux projets plus globaux qui seront décrits ci-après. Le recherche de financement, à la fois pour les projets développés et pour les étudiants réalisant ces travaux, constitue une priorité. Aussi, pour chacun des projets et chacun des étudiants, une demande de financement d'une part (annexe 8-1, p. 91 et 109) et d'aide aux études d'autres part (annexe 8-2, p. 135, 136) ont été réalisées mi-octobre 2004 auprès de l'AFM. Globalement, la demande totale de subvention est de 40600 € pour les deux projets et d'environ 1068 €/mois pour chacun des deux étudiants. Une première demande avait été réalisée en novembre 2003. Malgré un avis scientifique favorable rendu pour ces projet, le conseil d'administration de l'AFM n'avait pas retenu ces projets. Un certain nombre de clarifications ont été apportées cette année afin de répondre aux critiques formulées laissant augurer la possibilité d'une réponse positive (annexe 8-1, p. 90). Notons par ailleurs qu'une demande d'allocation régionale avait été formulée en mai 2003 et refusée pour chacun des deux candidats.

Enfin depuis mon arrivée à l'UFR STAPS, j'ai pu développer ou mettre en place un certain nombre de collaborations scientifiques avec d'autres laboratoires internes ou externes à l'Etablissement. Il s'agit notamment :

- Du laboratoire GÉM (UMR - CNRS - 6183), Faculté des Sciences de Nantes (P. Casari, MCU)
- Du laboratoire Ondes et Acoustique, Ecole Supérieure de Physique Chimie Industrielle (ESPCI) de Paris (S. Catheline, MCU ; M. Fink, Pr)
- De l'Unité d'Anatomie Pathologie, UMR 703 INRA/ENVN, Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes (Y. Chérel, Pr)
- De l'Institut de Myologie, GH Pitié-Salpêtrière Paris (P. Portero, Pr)
- Du laboratoire de Mécanique des Fluides (UMR-CNRS 6598), Ecole Centrale Nantes, (JM Kobus, MCU)
- Du département Génie biologique UMR-CNRS 6600, UTC Compiègne (F. Goubel, Pr)
- Du laboratoire de Physiologie de biomécanique de l'exercice, Rennes 2 (B. Bideau, PhD ; P. Delamarche, Pr)

4-4-3 DESCRIPTION DES PROJETS DE RECHERCHE ET PERSPECTIVES

Cette partie sera développée en deux points inégalement traités : le premier, relativement succinct, concernera un projet d'étude développé à l'Institut de Myologie (Paris) ; le second sera consacré aux projets développés à l'UFR STAPS de Nantes en dégagant les perspectives qu'ils laissent augurer à moyen et à plus long termes.

4-4-3-1 Etude développée à l'Institut de Myologie - GH Pitié-Salpêtrière

Parmi mes projets de recherche en cours, une étude concerne globalement l'étude des adaptations pré- et post-opératoires de la motricité des membres inférieurs chez des sujets présentant une pathologie ligamentaire unilatérale. Cette étude est menée au sein du laboratoire de Physiologie de l'Institut de Myologie par une étudiante en fin de thèse inscrite à l'Université Paris V dont j'avais accepté le co-encadrement alors que j'étais titulaire à l'Université Paris XII-Val de Marne, et chercheur à l'Institut de Myologie. Malgré l'éloignement géographique depuis deux ans, la concertation sur ce projet a continué de se dérouler dans de bonnes conditions. La soutenance de thèse est prévue pour le 7 décembre 2004.

Pour cette étude, l'étudiante a tout d'abord bénéficié d'une bourse du Ministère Tunisien (pays d'origine). Une aide aux études a ensuite été demandée et obtenue d'un montant d'environ 13000 €/an (appels d'offre AFM 2002 et 2003) (annexe 8-2, p. 133, 134).

Cette étudiante vient d'obtenir un poste d'Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Université de Poitiers (2004-2005).

Titre de la thèse : Etude de la motricité des membres inférieurs après reconstruction du ligament croisé antérieur utilisant le transplant tendineux droit interne/ demi-tendineux ou Fascia lata. (annexe 8-4, p. 152)

Etudiante : Sana Mansour

Laboratoire d'accueil : Institut de Myologie, GH Pitié-Salpêtrière, Paris.

Etablissement : Paris V

Co-direction : Pr P. Portero, C. Cornu

Collaborations : Service Chirurgie Orthopédique du Pr Saillant (Dr E. Rolland) (GH Pitié Salpêtrière)

Objectifs et hypothèses

Les objectifs principaux de ce projet sont de quantifier les modifications neuromusculaires des muscles de la cuisse induites par la pathologie ligamentaire ou articulaire et l'immobilisation post-opératoire d'une part, et d'étudier les mécanismes compensatoires d'un déficit unilatéral du genou lors d'un mouvement symétrique et bilatéral (i.e. saut vertical) d'autre part.

On peut penser que la phase post-opératoire immédiate entraîne une sidération musculaire caractérisée par la diminution du niveau d'activation du quadriceps. A plus long terme, nous pouvons nous attendre, localement, à ce que la vitesse de propagation des potentiels d'action d'unités motrices soit diminuée et corrélée au degré d'atrophie musculaire et que l'architecture musculaire soit modifiée (diminution de l'angle de pennation des fascicules musculaires) en corrélation avec la diminution de la fonction. Enfin, plus globalement, le déficit unilatéral pourrait induire une modification de la programmation motrice.

Organisation générale de l'étude :

Cette étude est réalisée selon une approche multiparamétrique centrée sur l'évolution de paramètres mécaniques et de paramètres électromyographiques de surface (EMGs). Pour chacun des tests, des mesures bilatérales sont réalisées.

Notre protocole expérimental se décompose en deux phases :

1 Phase de caractérisation physiopathologique des patients ayant un déficit unilatéral du genou.

Cette phase comporte deux parties :

- La première porte sur la recherche et l'étude des sidérations musculaires du quadriceps fréquemment observées en phase postopératoire précoce chez des patients opérés par deux techniques différentes (DIDT : transplant droit interne, demi-tendineux ; FL : transplant fascia lata). A cet effet, l'électromyographie de surface a été utilisée

permettant de quantifier le niveau d'activation maximale du quadriceps.

Tous les sujets ont été testés quatre fois : une fois juste avant l'opération, une seconde fois juste après l'opération, une troisième fois après quatre jours après l'opération et enfin, une quatrième fois à la fin du séjour hospitalier.

- La deuxième partie concerne le suivi des paramètres mécaniques segmentaires (couple de force en conditions statique et dynamique) de la phase préopératoire à la phase de consolidation. Les mesures EMGs ont systématiquement été couplées aux mesures de couple de force musculaire.

2 Phase fonctionnelle :

Une approche globale (dynamique et cinématique) permettant de déterminer certains paramètres biomécaniques du saut vertical a été utilisée. Ce protocole couplant l'utilisation de deux plate-formes de force et de caméras infrarouges devait permettre de déterminer des différences potentielles entre le coté opéré et le coté non opéré en termes de paramètres mécaniques spécifiques du saut réalisé (force de décollage, force de contact, raideur globale des membres inférieurs,...) et de performance globale (hauteur de saut, puissance développée,...). De plus, l'étude EMGs réalisée simultanément devait permettre de déterminer la chronologie de mise en action des muscles au niveau des membres inférieurs. De plus, certains paramètres mécaniques et neuromusculaires ont également été explorés pendant la phase préparatoire précédant le saut (ajustements posturaux anticipateurs) indiquant d'éventuelles modifications de la programmation motrice.

Cette étude devait permettre (i) de mieux comprendre les mécanismes adaptatifs (segmentaires et fonctionnels) dans les processus de compensation au cours d'une action motrice bilatérale symétrique ; (ii) de suivre l'évolution des déficits fonctionnels au cours de la réadaptation ; (iii) de comparer la récupération fonctionnelle selon la technique opératoire utilisée.

Très globalement, les principaux résultats montrent qu'alors qu'aucune différence en terme de couple de force et d'activité sEMG des extenseurs du genou n'est observée entre le coté à opérer et le coté controlatéral avant l'opération, un effet "latéralité" est

constaté, indiquant des couples de force et des niveaux d'activité sEMG significativement plus élevés du côté du genou non-opéré immédiatement après l'opération. Par ailleurs, il apparaît que les patients mettent en place des stratégies motrices spécifiques conduisant à sécuriser le membre inférieur traumatisé au cours d'un saut vertical. Enfin, la récupération post-opératoire (trois et six mois post-opératoire) diffère selon la technique opératoire : il semble en effet que la récupération soit plus rapide chez les patients opérés par la technique utilisant le transplant Fascia lata.

Les résultats préliminaires de ce travail ont fait l'objet de deux communications dans des congrès internationaux (n° 4 et 6, p. 77). Un article est accepté pour publication dans une revue internationale indexée (publication n° 2, p. 74).

4-4-3-2 Etudes développées à l'UFR STAPS de Nantes

Dans ce cadre général de l'étude de la fonction neuromusculaire réalisée au laboratoire Motricité, Interactions, Performance, quatre projets de recherche présentant des interactions fortes sont actuellement développés.

Globalement, les deux premiers concernent « la simulation du comportement de la fonction neuromusculaire » et « les réponses aiguës et adaptations chroniques de la fonction neuromusculaire soumise à différentes modalités de sollicitations musculaires ». Ils font chacun l'objet d'un travail de thèse débuté en 2003-2004.

Les deux autres projets concernent respectivement « l'étude de la visco-élasticité des structures musculo-tendineuses et musculo-articulaires », très directement liée aux deux premiers projets sus-cités et « la recherche dans le domaine de l'aviron », projet multidisciplinaire sur l'aviron, activité nautique prédominante dans la région ouest, associant plusieurs composantes de l'Etablissement et le pôle Aviron basé à Nantes.

Dans la suite du document, chaque projet global sera développé en décrivant notamment les travaux engagés et les perspectives générales à plus long terme.

4-4-3-2-1 *Projet global a*: Simulation du comportement de la fonction neuromusculaire soumise à différentes contraintes externes à l'aide d'un modèle musculo-squelettique spécifique.

a) Présentation générale

Ce projet concerne le développement d'un nouvel axe sur la thématique « étude du système neuromusculaire » pour le laboratoire puisqu'il s'agit de développer un modèle musculo-squelettique adaptatif et évolutif d'un système mono puis bi- articulaire : ce modèle rhéologique devra prendre en compte le comportement spécifique de l'effecteur en fonction de la nature de la commande, du mode de contraction, de la co-contraction éventuelle des antagonistes, de la géométrie musculo-articulaire adjacente et de l'architecture musculaire... Le développement de cet axe correspond à une orientation logique de mes thématiques de recherche intégrant les différents modèles musculaires ou musculo-articulaires auxquels j'ai pu être confronté au cours de mes travaux antérieurs et la volonté de mieux comprendre par le biais de modélisations plus complexes le comportement des structures neuromusculaires dans différentes conditions de fonctionnement par l'utilisation de la simulation.

Le premier objectif de ce projet concerne la mise en place d'un modèle rhéologique du système musculo-articulaire global et l'intégration à ce modèle de données mécaniques musculo-tendineuses (force, raideur, viscosité, niveau d'activation...) caractérisées in vivo. Les résultats alors obtenus aux travers des calculs théoriques des résultantes de ces données seront confrontés aux paramètres externes caractérisés par les méthodes de mesures segmentaires. En fonction des résultats, le modèle pourra être réajusté.

De fait, ce projet est organisé en trois phases : la première concerne la définition du modèle, de ses paramètres d'entrée et de ses paramètres de sortie. La deuxième phase concerne l'acquisition in vivo des données permettant d'alimenter ce modèle. Celle-ci peut donner lieu à l'implémentation de nouvelles méthodes d'étude de la fonction neuromusculaire. La troisième phase consiste enfin en la validation du modèle défini.

Enfin, la dernière étape de ce projet global consistera en la mise en application du modèle généré. Dans ce cadre, plusieurs axes de recherche fondamentale ou appliquée peuvent être envisagés. Par exemple, la simulation des modifications fonctionnelles de l'ensemble musculo-squelettique considéré induites par différentes modalités de contraction permettrait de prédire les effets d'entraînements spécifiques et de les valider, a priori, en fonction des effets recherchés. L'optimisation des procédures d'entraînement en limitant la fatigue, les risques de traumatismes etc... grâce à l'utilisation du modèle mis en place pourrait être utilisée dans le cadre de la pratique sportive, notamment de l'aviron particulièrement développé à Nantes. Cette démarche pourrait également être développée considérant différents protocoles spécifiques de rééducation post-traumatique par exemple. Enfin, à terme, les modèles développés pourraient permettre d'identifier les structures mises causes dans certaines pathologies neuro-musculaires et/ou de simuler les effets potentiels de futurs traitements thérapeutiques (cellulaire ou génique) à venir pour traiter ces pathologies.

Une première étude a été initiée en 2003-2004 dans le cadre de ce projet au sein du laboratoire MIP faisant l'objet d'un travail de thèse.

b) Projet en cours

Titre : Développement d'un modèle musculo-articulaire caractérisant le comportement des structures impliquées au cours d'un mouvement mono-articulaire.

Etudiant : Antoine Nordez (deuxième année de thèse)

Laboratoire d'accueil : Motricité, Interactions, Performance (JE 2438).

Etablissement : UFR STAPS, Nantes. Ecole doctorale Chimie-Biologie.

Co-direction : Pr J. Prioux, C. Cornu

Collaborations :

- GÉM, Université de Nantes, P. Casari (MCU)
- ESPCI, Laboratoire Ondes Acoustique, Paris, S. Catheline (MCU)
- ENV, Unité d'Anatomie Pathologie - UMR 703 INRA/ENVN, Nantes, Y. Chérel (Pr)

Pour cette étude, une demande de subvention de 25600 € (annexe 8-1, p. 91 à 108) et une demande d'aide aux études (annexe 8-2, p. 135) ont été réalisées en réponse à l'appel d'offre AFM 2005.

- Généralités

Globalement la modélisation du système musculo-squelettique peut s'envisager chez l'homme de deux manières : l'utilisation de la dynamique inverse ou celle de la dynamique directe.

Classiquement, la méthode de dynamique inverse est utilisée en biomécanique pour étudier le mouvement chez l'homme. Elle consiste en l'application de l'équation fondamentale de la dynamique (équation de Newton-Euler) sur le système corps humain entier (fig. a). Il est relativement facile de déterminer les paramètres cinématiques et les couples de force externe chez l'homme. Par contre, la contribution de chacun des muscles du groupe musculaire considéré dans la fonction étudiée est extrêmement délicate à caractériser.

L'évolution des méthodes de calcul numérique a rendu possible le développement d'une autre approche : la méthode dynamique directe et de fait, la simulation (voir par exemple, Delp and Loan, 1995; Cheng et al., 2000; Pandy, 2001; Davoodi et Loeb, 2002; Lim et al., 2003; Rasmussen et al., 2003; Thelen et al., 2003). Avec cette méthode, les forces musculaires sont utilisées pour déterminer la cinématique du corps humain (fig. a).

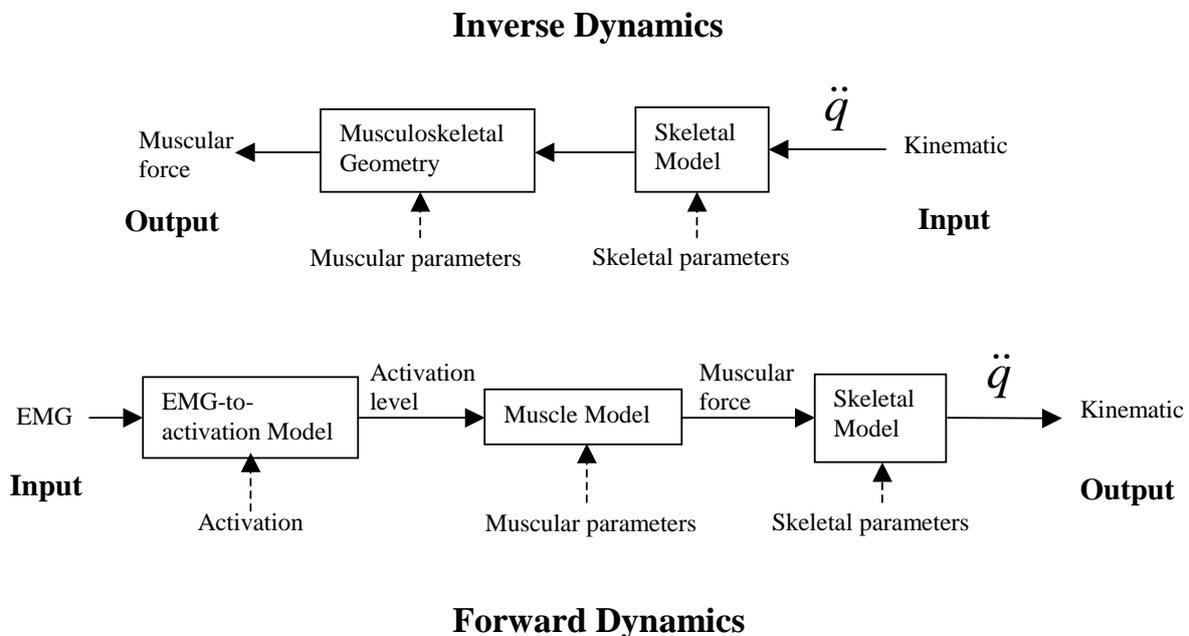


Figure a : Description schématique des principes de modélisation d'un système musculo-articulaire par les méthodes de dynamique inverse et de dynamique directe.

Notre objectif, pour cette étude, est d'utiliser le modèle de la dynamique directe. Le logiciel de simulation le plus fréquemment utilisé dans ce cadre est le logiciel SIMM[®] (**S**oftware for **I**nteractive **M**usculoskeletal **M**odeling) (Delp & Loan, 1995).

Ceci nécessite de déterminer des paramètres d'activation, des paramètres musculaires et des paramètres squelettiques caractéristiques du segment étudié pour alimenter le modèle considéré. Par exemple, les paramètres d'activation nerveuse peuvent être déterminés par des méthodes d'optimisation et de calibration pour chaque sujet (Lloyd and Bezier, 2003). Les paramètres musculaires (couple de force, raideurs, viscosité, inertie...) sont classiquement déterminés sur la base du modèle musculo-tendineux de Hill et peuvent être caractérisés en conditions active et passive à partir de protocoles standardisés réalisés sur des dynamomètres spécifiques (par exemple, Zajac, 1989 ; Goubel and Linsel-Corbeil, 1998, Cornu et al, 2001, 2001 b ; Desplantez et al, 1999, Gennisson JL et al, 2003, 2004). Enfin, les caractéristiques anatomiques (point d'insertions musculaires, pennation des muscles, typologie musculaire, volume, section transversale, géométrie osseuse...) peuvent soit être déterminées à partir des données classiques de la littérature (par exemple, Johnson et al, 1973 ; Edgerton et al, 1987 ; Perié & Hobatho, 1998), soit à partir d'imagerie notamment ultrasonore.

Enfin, notre modèle sera validé à partir d'une situation simple et réaliste en confrontant les résultats de ce modèle appliqué à une structure mono-articulaire à ceux obtenus sur un ergomètre segmentaire.

Nous disposons au laboratoire MIP d'un ergomètre segmentaire (Biodex[®] pro 3) et d'une chaîne d'acquisition portable (Myodata[®]) des signaux électromyographiques de surface (sEMG) ainsi que des logiciels permettant d'implémenter un modèle musculo-articulaire (Matlab[®], toolbox...). Nous envisageons d'acquérir un échographe et un système d'élastographie impulsionnelle (cf ci-après) notamment dans l'hypothèse d'une réponse positive à l'appel d'offre AFM 2005.

- Description de l'étude

Une des originalités du travail que nous avons mis en œuvre consiste en la tentative d'une caractérisation du niveau d'activation de tous les muscles sollicités qui représentent les entrées du modèle à développer. En effet, la plupart des modèles utilisés ne prennent pas en compte la totalité des muscles sollicités chez l'homme sain in vivo puisqu'en général, la méthode non invasive utilisée pour caractériser l'activité musculaire à entrer dans le modèle consiste en un recueil de l'activité électromyographique de surface (EMGs) (voir par exemple, Manal et al., 2002; Manal and Buchanan, 2003; Thelen et al., 2003; Lloyd and Besier, 2003). Or, cette technique ne permet pas d'appréhender le comportement des muscles profonds du segment considéré. Aussi, le développement d'une technique non invasive relativement récente, l'élastographie impulsionnelle (étude de la réflexion d'une onde mécanique impulsée), appliquée au muscle sain in vivo lors d'une étude que nous avons menée à l'Hôpital de la Pitié Salpêtrière (Gennisson et al, 2004) laisse entrevoir la possibilité de pallier ce problème. En effet, une relation entre le niveau d'activation caractérisé par EMGs et la raideur transverse du muscle caractérisée par l'élastographie impulsionnelle a été établie pour le biceps brachial. La caractérisation d'une telle relation permettrait, à partir de la détermination de la raideur des muscles profonds, d'estimer leur niveau d'activité. Aussi, une collaboration étroite établie avec le laboratoire Ondes et Acoustique de l'ESPCI (Paris) a permis de former à cette technique l'étudiant impliqué sur ce travail (2003-2004) et d'obtenir le prêt de cet outil pour une première série de tests décrits ci-après.

Phase 1 du travail : Afin de vérifier le résultat que nous avons décrit sur un muscle superficiel chez l'homme (Gennisson et al, 2004), et de ne pas formuler d'hypothèse trop forte concernant les entrées de notre modèle, il nous est apparu nécessaire de caractériser les évolutions relatives des niveaux d'activation et des paramètres biomécaniques (force, visco-élasticité) sur un muscle isolé en couplant les tests classiques de mécanique musculaire et les mesures d'élastographie impulsionnelle.

Par ailleurs, un autre objectif important de ces tests est de déterminer s'il est possible à partir des mesures de raideur réalisées par l'élastographie impulsionnelle de déterminer par calcul la force générée par le muscle et, si oui, dans quelles conditions limites.

Brièvement, l'élastographe impulsionnel décrit par ailleurs (Gennisson et al, 2003) se présente de la manière suivante : un transducteur ultrasonore est placé au milieu d'une tige montée sur un pot vibrant. Ce pot vibrant envoie dans le matériel testé une impulsion induisant la propagation d'ondes de compression et de cisaillement. Dans les tissus biologiques, ces ondes sont rapidement séparées (Catheline et al, 1999) et le déplacement induit par la vibration basse fréquence envoyée dans le tissu est calculé par un algorithme de cross-corrélation spécifique (Catheline, 1998). En appliquant la tige du pot vibrant parallèlement ou perpendiculairement à la direction supposée des fibres musculaires, l'onde de cisaillement déterminée est respectivement perpendiculaire et parallèle à cette même direction (Gennisson et al, 2003). Les modules de cisaillements transverse et longitudinal peuvent être calculés à partir de la détermination de la vitesse de propagation des ondes dans les tissus biologiques rencontrés (Gennisson et al, 2003).

Les contacts établis avec l'Unité d'Anatomie Pathologie du Pr Y. Chérel (UMR 703 INRA/ENVN) en 2003-2004 nous ont permis de disposer de muscles vivants de bœufs euthanasiés de volume et d'architecture semblables à ceux des muscles chez l'Homme pour faire nos tests.

Un dispositif permettant de tester *ex vivo* ces muscles de bœuf a par ailleurs été mis au point spécifiquement pour cette phase 1 (cf description, annexe 8-1, p. 100) : globalement, celui-ci permet de tester le muscle vivant grâce à une perfusion continue par du liquide de Ringer maintenu à température et oxygéné alors qu'il est soumis à différentes contraintes externes par un vérin. Ce dispositif permet de contrôler la longueur du muscle et de mesurer instantanément la tension produite. Ainsi, des tests de traction ou de relaxation peuvent être réalisés alors que le muscle est stimulé ou bien lorsqu'il est au repos (condition passive). Parallèlement, l'élastographe est placé au milieu du ventre du muscle afin de caractériser les raideurs transverse et longitudinale du muscle pour toutes les conditions expérimentales testées.

Il s'agit, dans un premier temps, de caractériser le comportement visco-élastique du muscle en condition passive. Les modifications du module d'élasticité de cisaillement seront corrélées à la tension passive du muscle en condition quasi-statique et pendant des épreuves de relaxation. Le comportement du muscle au cours de contractions isométriques sera également étudié en comparant l'évolution du module d'élasticité et de l'anisotropie du muscle avec la force musculaire produite pour différentes longueurs de muscle et différents niveaux d'activation. De fait, le comportement mécanique global du muscle en condition statique sera caractérisé. Les contractions en mode dynamique pourront ensuite être envisagées.

Chacune de ces expérimentations devrait permettre de déterminer le domaine de validité des hypothèses réalisées pour la mise en œuvre de notre modèle (notamment s'agissant de ses paramètres d'entrée). Ainsi, les relations suivantes pourront être déterminées : i) entre les raideurs musculaires longitudinale et transversale et la force ; ii) entre ces raideurs et la déformation du muscle ; iii) entre ces raideurs mesurées par élastographie impulsionnelle et la raideur longitudinale classiquement étudiée sur le muscle, notamment par la méthode de détente rapide. Enfin l'évolution potentielle de l'anisotropie du muscle avec le niveau de contraction pourra être caractérisée.

Les premiers résultats de cette phase initiale concernant le comportement passif du muscle doivent faire l'objet d'une publication en préparation (n°3, p. 76).

Phase 2 du travail : Cette phase concerne la caractérisation *in vivo* de l'évolution des paramètres visco-élastiques et morphologiques des structures musculo-tendineuses soumises à diverses contraintes. En effet, le comportement de ces structures est sensible aux modifications de la demande fonctionnelle (par exemple Basford et al, 2002; Maganaris et Paul, 2002 ; Cornu et al, 2001 ; Goubel, 2001 ; Kubo et al, 2001 ; Magnusson et al, 1998 ; Seger et al, 1998 ; Taylor et al, 1990).

Dans ce cadre deux actions sont envisagées. La première concerne l'étude des effets des étirements sur la production de force et la raideur musculo-tendineuse qui seront caractérisés à l'aide du dynamomètre isocinétique (Biodex 3 pro) et de l'élastographe. Ces mesures pourront être couplées à des mesures architecturales du complexe musculo-

tendineux si nous pouvons disposer d'un échographe. Cette action s'appuiera sur les résultats obtenus dans la première phase de cette étude et sur ceux obtenus au cours de l'étude « f » présentée ci-avant (p. 30), mise en place au laboratoire MIP dans le cadre d'un projet global développé plus loin (projet c, p. 66).

La deuxième action pourrait être engagée sur la base d'une collaboration avec l'unité d'Anatomie Pathologie (UMR INRA 703) de l'Ecole Vétérinaire de Nantes dirigée par le Pr Y. Chérel. En effet, nous avons montré que la dystrophie musculaire de Duchenne de Boulogne induisait une augmentation de la raideur musculo-tendineuse corrélée au degré de faiblesse musculaire chez ces patients (Cornu et al, 2001). De même, Basford et al (2002) ont montré qu'il était possible d'utiliser le module d'élasticité de cisaillement pour suivre les pathologies musculaires en routine clinique. Dès lors, il semblerait intéressant d'utiliser l'élastographie impulsionnelle pour tenter de caractériser de manière non-invasive l'évolution de la pathologie chez des chiens atteints de dystrophie musculaire et d'évaluer les effets d'éventuels traitements thérapeutiques chez ces animaux.

Phase 3 du travail : Cette phase réalisée simultanément aux deux premières concerne la mise en place de notre modèle à l'aide du logiciel SIMM[®]. Sur la base des études précédentes, l'élastographie devrait nous permettre de déterminer le niveau d'activation des muscles du groupe musculaire considéré (même des plus profonds) et peut-être, selon les résultats de la phase 1, de quantifier la force musculaire produite. Les insertions musculaires pourront être évaluées par des mesures anatomiques (Brand et al, 1982) afin de calculer les bras de levier, la longueur des muscles au cours de leur contraction (Hawkins, 1992). L'utilisation d'un échographe constituerait évidemment une méthode plus intéressante afin de caractériser les bras de levier des muscles impliqués au cours du mouvement considéré (par exemple Ito et al, 2000 ; Maganaris et al, 2000).

Enfin, plusieurs niveaux de validation devront être envisagés : notre modèle de calcul de force musculaire pourra être validé, considérant le complexe musculo-tendineux dans les conditions statique et dynamique, en utilisant le dispositif décrit ci-dessus grâce au vérin asservi qui permet de réaliser différents protocoles dynamiques sur muscle isolé. De plus, la validation de notre modèle pourra également être réalisée en confrontant les

données qu'il fournira à celles caractérisées par les mesures réalisées in vivo grâce à l'ergomètre segmentaire.

Une fois cette validation réalisée, la simulation de différentes conditions expérimentales ou cliniques pourra être réalisée.

- Références

Basford JR, Jenkyn TR, An KN, Ehman RL, Heers G, Kaufman KR, 2002. Evaluation of healthy and diseased muscle with magnetic resonance elastography. *Arch Phys Med Rehabil*, 83, 1530-6.

Brand RA, Crowninshield RD, Wittstock CE, Pedersen DR, Clark CR, van Krieken, F.M., 1982. A model of lower extremity muscular anatomy. *J Biomech Eng*, 104, 304-10.

Catheline S, 1998. Interferometrie-speckle ultrasonore: application à la mesure d'élasticité, Université de PARIS VII, 114 pp.

Catheline S, Wu F, Fink M, 1999. A solution to diffraction biases in sonoelasticity : the acoustic impulse technique. *J Acoust Soc Am*, 105, 2941-2950.

Cornu C, Goubel F, Fardeau M. Muscle and joint elastic properties during elbow flexion in Duchenne muscular dystrophy. *Journal of physiology*, 533.2, 605-616, 2001a.

Cornu C, Goubel F. Musculo-tendinous and joint elastic characteristics during elbow flexion in children. *Clinical Biomechanics*, 16: 758-764, 2001 b.

Cheng EJ, Brown IE, Loeb GE. Virtual muscle: a computational approach to understanding the effects of muscle properties on motor control. *Journal of Neuroscience Methods*, 101: 117-130, 2000.

Davoodi R, Loeb GE. A software tool for faster development of complex models of musculoskeletal systems and sensorimotor controllers in simulink. *Journal of applied Biomechanics*, 18: 357-365, 2002.

Delp SL, Loan JP. A graphic-based software system to develop and analyze models of musculoskeletal structures. *Computer in Biology and medicine*, 25: 21-34, 1995.

Desplantez A, Cornu C, Goubel F. Viscous properties of human muscle during contraction. *Journal of Biomechanics*. 32: 555-562, 1999.

Edgerton VR, Bodine SC, Roy RR. Muscle architecture and performance : stress and strain relationship in a muscle with two compartments arranged in series. In Marconnet P, Komi PV (eds). *Medicine and Sport Science: muscular function in Exercise and training*, 1987:12-23

Gennisson JL, Catherine S, Chaffai S, Fink M. Transient elastography in anisotropic medium: application to the measurement of slow and fast shear wave speeds in muscles. *Journal of Acoustical Society of America*, 114: 536-41, 2003.

Gennisson JL, Cornu C, Catheline S, Fink M, Portero P. Human muscle hardness assessment during incremental isometric contraction using transient elastography, *Journal of Biomechanics*, 2004 (sous presse)

Goubel F, 2001. Adaptation des propriétés mécaniques du muscle à l'entraînement. *Science & Sports*, 16, 196-203.

Goubel F, Linsel-Corbeil G. *Biomécanique. Eléments de mécanique musculaire*. Masson, 1998.

Hawkins D, 1992. Software for determining lower extremity muscle-tendon kinematics and moment arm lengths during flexion/extension movements. *J Biomech*, 22, 59-71.

Ito M, Akima H, Fukunaga T, 2000. In vivo moment arm determination using B-mode ultrasonography. *J Biomech*, 33, 215-8.

Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscles : an autopsy study. *J Neurol Sci* 1973; 18:111-129

Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T, 2001. Influence of static stretching on viscoelastic properties of human tendon structures in vivo. *J Appl Physiol*, 90, 520-7.

Maganaris CN, 2000. In vivo measurement-based estimations of the moment arm in the human tibialis anterior muscle-tendon unit. *J Biomech*, 33, 375-9.

Maganaris CN, Paul JP, 2002. Tensile properties of the in vivo human gastrocnemius

tendon. *J Biomech*, 35, 1639-46.

Magnusson SP, 1998. Passive properties of human skeletal muscle during stretch maneuvers. *Scand J Med Sci Sports*, 8, 65-77.

Manal K, Gonzalez RV, Lloyd DG, Buchanan TS. A real time EMG-driven virtual arm. *Computers in biology and medicine*, 32: 25-36, 2002.

Manal K, Buchanan TS. A one parameter neural activation to muscle activation model: estimating isometric joint moments from electromyograms. *Journal of Biomechanics*, 36: 1197-1202, 2003.

Lloyd DG, Besier TF. An EMG-driven musculoskeletal model to estimate muscle forces and knee joint moments in vivo. *Journal of Biomechanics*, 36: 765-776, 2003.

Pandy MG. Computer modeling and simulation of human movement. *Annual Review of Biomedical engineering*, 3: 245-73, 2001.

Périé D, Hobatho MC. In vivo determination of contact areas and pressure of the femorotibial joint using non-linear finite element analysis. *Clinical Biomechanics*, 13:394-402, 1998.

Rasmussen J, Damsgaard M, Surma E, Christensen ST, De Zee M. Designing a general software system for musculoskeletal analysis. IX International Symposium on Computer Simulation in Biomechanics. Sydney, Australia, 2-4 July, 2003.

Sejer JY, Arvidsson B, Thorstensson A (1998) Specific effects of eccentric and concentric training on muscle strength and morphology in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 79: 49-57

Taylor CD, Dalton JD, Seaber AV, Garrett WE, 1990. Viscoelastic properties of muscle-tendon units. The biomechanical effects of stretching. *Am J Sports Med*, 18, 300-309.

Thelen DG, Anderson FC, Delp SL. Generating dynamic simulations of movement using computed muscle method. *Journal of biomechanics*, 36: 321-328, 2003.

Zajac FE. Muscle and tendon: properties, models, scaling and application to biomechanics and motor control. *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 17: 359-411, 1989.

c) Conclusion :

L'atout majeur de ce projet de recherche fondamentale réside dans la possibilité que nous avons de coupler la modélisation du système musculo-squelettique et l'obtention des paramètres décrivant les caractéristiques mécaniques musculaires externes au sein d'un même laboratoire. Il réside également dans la mise en œuvre de collaborations scientifiques interdisciplinaires. Ce projet doit permettre de mieux comprendre le fonctionnement du système neuromusculaire et donc de mieux appréhender les mécanismes adaptatifs résultants de sollicitations particulières (entraînements, pathologie, rééducation...) en fonction des caractéristiques initiales de la structure étudiée. Il s'articule donc autour des axes suivants: caractérisation de paramètres mécaniques du système musculo-squelettique par la mise en place de protocoles expérimentaux, développement de modèle(s) mécanique(s) associé(s), et application de ce(s) modèle(s) à une situation de recherche spécifique. Dans le cadre de ce dernier point, plusieurs pistes pour certaines déjà évoquées précédemment peuvent être avancées: i) étudier les relations entre travail musculaire interne et travail mécanique externe selon les modes de contraction considérés, étudier les synergies agonistes-antagonistes selon les modalités de contractions; ii) prédire le comportement d'un groupe musculaire soumis à une activité particulière (hypoactivité, hyperactivité, fatigue neuromusculaire), diagnostiquer certaines pathologies neuromusculaires; iii) simuler à partir de la modification d'un paramètre mécanique du modèle, les modifications fonctionnelles de l'ensemble musculo-squelettique et de ce fait prédire les capacités mécaniques d'un groupe musculaire souffrant par exemple d'un traumatisme (déchirure, élongation...) ou bien après traitement thérapeutique (par exemple à partir de quel pourcentage de fibres régénérées, la fonction musculaire commence à être modifiée dans les pathologies neuromusculaires...); iv) implémenter de nouveaux protocoles expérimentaux permettant de réaliser *in vivo* des tests se rapprochant au mieux des conditions expérimentales sur muscle isolé.....

4-4-3-2-2 Projet global b : Réponses aiguës et adaptations chroniques de la fonction neuromusculaire soumise à différentes modalités de sollicitations musculaires.

a) Présentation générale

Ce projet s'inscrit directement dans l'étude de la fonction neuro-musculaire et de ses adaptations au travers de paramètres physiologiques et biomécaniques quantitatifs caractéristiques de la production de force (trophie, typologie, architecture...) et de la commande nerveuse (recrutement, inhibition, co-activation...) déterminant en partie le développement d'une action motrice. Une partie de ce projet, initialement développée en étroite collaboration par A. Guével à Nantes et moi-même à l'Institut de Myologie à partir de l'année 2001, se poursuit logiquement dans les mêmes conditions à l'UFR STAPS depuis que j'y ai été recruté.

Globalement, les caractéristiques de la contrainte mécanique imposée au système neuromusculaire sont analysées dans le but d'isoler celles ayant un effet optimal sur les adaptations nerveuses et structurales visées. En effet, les adaptations des propriétés mécaniques du muscle et des caractéristiques électrophysiologiques consécutives à diverses modalités de sollicitations musculaires (contractions spécifiques, étirements, entraînement, rééducation...) restent très partiellement étudiées notamment considérant la standardisation de ces sollicitations du point de vue de l'égalisation des charges de travail imposées aux sujets. De plus, beaucoup de mécanismes physiologiques à l'origine des adaptations fonctionnelles rapportées restent à mettre en évidence.

La description et la compréhension de ces adaptations spécifiques devraient permettre à la fois une meilleure connaissance de la physiologie intégrée du système neuromusculaire mais également d'envisager le développement de la performance motrice et la validation de procédures, adéquates et adaptées, d'entraînement physique ou de rééducation.

Une étude a été mise en oeuvre en 2003-2004 dans le cadre de ce projet au sein du laboratoire MIP faisant l'objet d'un travail de thèse.

b) Projet en cours

Titre : Réponses aiguës et adaptations chroniques de la fonction neuromusculaire induites par deux modalités de contraction musculaire concentrique : isotonique vs. isocinétique.

Étudiant : Anthony Remaud (deuxième année de thèse)

Laboratoire d'accueil : Motricité, Interactions, Performance (JE 2438).

Etablissement : UFR STAPS, Nantes. Ecole doctorale Chimie-Biologie.

Co-direction : Pr J. Prioux, C. Cornu

Pour cette étude, une demande de subvention de 15000 € (annexe 8-1, p. 109 à 124) et une demande d'aide aux études (annexe 8-2, p. 136) ont été réalisées en réponse à l'appel d'offre AFM 2005.

- Généralités

Les modes de contractions isocinétiques et isotoniques sont utilisés classiquement dans les domaines des activités physiques, de l'entraînement mais aussi de la rééducation fonctionnelle. Aussi, des études se sont attachées à décrire les effets chroniques d'exercices de type isocinétique ou isotonique sur le développement musculaire (par exemple, Enoka, 1988,1997; Moritani and deVries, 1979; Farthing and Chilibeck, 2003) montrant des adaptations nerveuses et structurales induites par ces exercices. Les caractéristiques mécaniques de ces deux modalités de contraction sont a priori différentes. Le mode isocinétique charge maximale le groupe musculaire sur tout le débattement articulaire considéré (par exemple, Smith MJ & Melton P, 1981 ; Schmitz RJ & Westwood KC, 2001) alors que le mode isotonique charge maximale le groupe musculaire uniquement aux angles extrêmes, pour lesquels celui-ci est mécaniquement plus faible, et sous maximale sur le reste du débattement articulaire considéré (par exemple, Smith MJ & Melton P, 1981 ; Kovalski et al., 1995). En raison de ces spécificités, il est raisonnable de penser que les adaptations induites par ces deux modalités de contraction doivent être différentes si l'on considère les relations classiques de la biomécanique musculaire comme les relations couple-angle et couple-vitesse (Caiozzo et al., 1981). Néanmoins, peu d'études ont tenté de comparer directement les effets de ces deux modalités de contractions (par exemple, Kovalski et al., 1995; O'Hagan et al., 1995) et

leurs résultats sont souvent contradictoires. Ceci peut s'expliquer par la difficulté à quantifier et donc à égaliser la quantité de travail total exercée dans chacune des modalités de contraction. Or, l'absence d'égalisation du travail total dans ce type d'études comparatives peut conduire à des conclusions divergentes quant aux effets relatifs de ces modalités de contraction sur la fonction neuromusculaire.

Dans un travail préliminaire (Remaud et al, 2004) nous avons décrit une méthode permettant de quantifier et d'égaliser le travail total externe au cours de contractions isotoniques et isocinétiques. Parallèlement, les premiers résultats nous ont permis de considérer de manière hypothétique un comportement différent en termes d'inhibition musculaire et de co-activation antagoniste au cours de ces deux modalités de contraction dynamique.

L'inhibition musculaire peut se définir comme l'incapacité du muscle à activer l'ensemble de ses unités motrices au cours d'un effort maximal volontaire (Suter and Herzog, 1997). Cependant, les mécanismes à l'origine de cette inhibition musculaire ne sont pas clairement identifiés. Il a été suggéré que ce phénomène était lié à la présence d'un système de régulation de la tension du muscle limitant l'activation musculaire au cours du développement de fortes tensions musculaires (Aagaard et al., 2000a). Cette réduction de la conduction nerveuse aurait pour origine les récepteurs articulaires, les organes tendineux de Golgi et les fuseaux neuro-musculaires (Colson et al., 1999; Aagaard et al, 2000a). D'autres mécanismes pourraient expliquer cette inhibition, ce qui a été montré concernant l'articulation du genou : il s'agirait des forces de compression au niveau de l'articulation fémoro-patellaire, et/ou de la sollicitation importante du ligament croisé antérieur induites par la contraction des muscles quadriceps au cours de l'extension du genou (Suter and Herzog, 1997). Récemment, Graven-Nielsen et al. (2002) se sont intéressés à la faiblesse musculaire associée à la douleur musculo-articulaire. Ils ont suggéré que l'inhibition musculaire était d'origine centrale puisque la force développée, déterminée par la technique de twitch-interpolation, n'était pas affectée par la douleur musculaire. Enfin, il semble que la capacité d'un sujet à activer maximale ses unités motrices au cours d'un effort maximal volontaire dépende de la tâche demandée (Enoka,

1997). Ainsi, Newham et al (1991) ont montré qu'une activation maximale était obtenue pendant une contraction isométrique alors qu'un déficit d'activation était observé au cours de contraction isocinétique particulièrement à des vitesses faibles. De plus, une diminution notamment de l'inhibition pré-synaptique a déjà été montrée après exercices physiques chroniques (Aagaard, 2003, Aagaard et al., 2002). Puisque les deux modalités isocinétique et isotonique diffèrent du point de vue de leurs caractéristiques mécaniques, on peut penser que des réponses ou adaptations différentes en terme d'inhibition musculaire se mettent en place.

Le mécanisme de co-activation (ou co-contraction) consiste en une activation simultanée des muscles agonistes et antagonistes au cours d'une contraction volontaire (Psek and Cafarelli, 1993; Weir et al., 1998). De fait, la co-activation des muscles antagonistes diminue la force résultante mesurée pour les agonistes au cours d'un effort selon le débattement articulaire considéré. Il a été suggéré que ce mécanisme de co-activation pouvait intervenir afin de distribuer les pressions au sein de l'articulation considérée et minimiser les dommages articulaires (Weir et al., 1998 ; Baratta et al., 1988). Par ailleurs, Aagaard et al. (2000b) ont quantifié le moment de force généré par les agonistes et les antagonistes au cours d'extensions de genou en isocinétique à faible vitesse en utilisant les relations couple de force-sEMG. Ils ont trouvé une activité significative des muscles ischio-jambiers (antagonistes) sur l'ensemble du débattement angulaire ce qui avait déjà été reporté dans d'autres études (Baratta et al., 1988; Hagood et al., 1990; Kellis et Baltzopoulos, 1997). Par exemple, ils montrent que la co-activation des ischio-jambiers atteint 15 à 53% de leur activité électromyographique maximale excentrique (Aagaard et al., 1995). Ainsi, la co-activation des ischiojambiers produit un couple de force de 15 à 40 N.m correspondant à 30 à 74% du couple d'extension net en position d'extension quasi complète du genou (10-30°/ à l'horizontale). De ce fait, la co-contraction des antagonistes au cours de l'extension du genou aurait un rôle de stabilisation de l'articulation du genou et de prévention des déplacements antérieurs du tibia au cours de ce mouvement (Aagaard et al., 2000b; Solomonow et al., 1987; Hagood et al., 1990; Baratta et al., 1988). Il a été suggéré qu'un réflexe médié par les ligaments croisés pourrait jouer un rôle dans cette co-

activation. Néanmoins la latence de ce réflexe semble trop importante pour permettre de prévenir les blessures (Krogsgaard et al., 2002). D'autres études soutiennent le concept de commande commune qui implique que le système nerveux central envoie simultanément des influx aux unités motrices agonistes et antagonistes (Weir et al., 1998; Mullany et al., 2002). Quoi qu'il en soit, il est probable que les schémas de co-contractions soient différents selon la modalité de contraction envisagée compte tenu notamment de leur caractère plus ou moins contraignant sur l'articulation considérée.

Nous chercherons au cours de cette étude à déterminer la pertinence de l'entraînement isocinétique par rapport à l'entraînement isotonique, compte tenu de la spécificité de ces deux modes d'entraînement, en considérant (1) les adaptations biomécaniques et électromyographiques que ces deux types d'entraînement induisent sur le système neuromusculaire et (2) leurs répercussions potentielles sur la rééducation et la performance motrice. A terme, ces travaux devraient permettre d'apporter des réponses et solutions pratiques au monde sportif et médical dans le cadre du renforcement musculaire et de la rééducation puisque dans ce cas, l'exercice musculaire constitue une contre mesure efficace et classiquement utilisée.

Enfin, le développement de l'imagerie ultrasonore permet désormais d'étudier l'architecture musculaire *in vivo*. Les études réalisées dans ce domaine caractérisent principalement la longueur des fibres musculaires, les angles de pennation et l'épaisseur des muscles au repos et au cours de la contraction (par exemple Abe T. et al, 2001 ; Fukunaga T. et al, 1997 ; Kawakami Y. et al, 1998). Néanmoins, peu d'auteurs ont étudié l'évolution de l'architecture musculaire avec l'entraînement. Récemment, Aagaard et al (2001) ont montré une augmentation de l'angle de pennation de 35,5% du vaste latéral du quadriceps après un entraînement en résistance de 14 semaines ce qui expliquait en partie, selon les auteurs, l'augmentation de force produite après entraînement. Ce paramètre doit donc être pris en compte au même titre par exemple que l'hypertrophie musculaire pour expliquer les gains de force musculaire observés après entraînement.

- Description de l'étude

Sur la base des travaux antérieurs que nous avons réalisé dans ce domaine, les protocoles utilisés pour caractériser les propriétés mécaniques et électromyographiques des muscles au cours des deux modalités de contractions seront standardisés du point de vue de la quantité de travail total développé et de la vitesse du mouvement réalisé.

La première phase de cette étude est déjà initiée. Il s'agit de caractériser les mécanismes d'inhibition musculaire et les co-activations antagonistes au cours de contractions isocinétique et isotonique standardisées d'extension de genou. Quelle que soit la modalité de contraction considérée, les tests sont réalisés sur le même ergomètre (Biodex® pro3) permettant de fixer la posture des sujets et de déterminer le couple externe développé, la quantité de travail réalisé et la vitesse de mouvement. Par ailleurs, l'activité électromyographique de surface des agonistes (vastus medialis, vastus lateralis and rectus femoris) et des antagonistes (biceps femoris caput longum and semitendinosus) est recueillie au cours de l'ensemble des tests réalisés afin de déterminer leur niveau d'activation et les processus de fatigue éventuellement induits par les contractions musculaires réalisées.

Les résultats de cette première phase devraient nous permettre de déterminer si les stratégies de co-activation et si les mécanismes d'inhibition mis en œuvre au cours de ces deux modalités de contractions sont différentes et peuvent expliquer les résultats observés lors de notre étude préliminaire.

La deuxième phase de ce travail concerne l'étude des effets chroniques de ces deux modes de contractions musculaires sur le développement de la force, les adaptations nerveuses et l'architecture musculaire. En effet, compte tenu des caractéristiques mécaniques spécifiques des deux modalités de contraction décrites précédemment, les entraînements isocinétique et isotonique standardisés devraient affecter différemment la fonction neuromusculaire et développer des adaptations spécifiques tant du point de vue musculaire (trophie, architecture...) que du point de vue nerveux (recrutement, co-

activation, coordination...).

Aussi, nous envisageons donc d'étudier les effets des deux types d'entraînement isotonique et isocinétique, standardisés en terme de quantité de travail et de vitesse de mouvement, sur la même population à 15 semaines d'intervalle. L'entraînement des extenseurs du genou durera 8 semaines pour chaque modalité de contraction. Il sera réalisé sur ergomètre Biodex® 3 pro et réévalué de telle sorte que chaque séance isocinétique soit équivalente (considérant les paramètres contrôlés) à la séance correspondante isotonique. Avant, pendant et après le protocole d'entraînement des tests isométriques, isocinétiques et isotoniques seront réalisés selon des protocoles standardisés sur l'ergomètre Biodex® 3 pro. Ils seront couplés à des mesures électromyographiques de surface des agonistes et antagonistes du mouvement. Ils pourront être également associés à des mesures pré- et post-entraînement de raideur musculaire par élastographie impulsionnelle et d'architecture musculaire au repos si nous pouvons disposer d'un échographe.

De fait, d'un point de vue fondamental, ces données nous permettront de déterminer les effets potentiels de chacun de ces modes de contraction sur les relations caractéristiques de la biomécanique musculaire et d'explicitier leurs spécificités éventuelles en terme d'adaptations musculaire ou/et nerveuse. Elles devraient de plus permettre d'apporter des informations intéressantes concernant l'optimisation des programmes de renforcement musculaire dans le domaine de l'entraînement sportif, mais aussi dans le cadre de la rééducation fonctionnelle ou des contre-mesures visant à lutter contre l'atrophie musculaire.

Par ailleurs, les données obtenues sur le système musculo-articulaire du genou soumis à ces sollicitations particulières pourront être utilisées dans le contexte de la validation d'un modèle développé dans le projet global a (p. 43) .

Le travail réalisé pour la mise en place de cette deuxième phase doit faire l'objet d'une publication en préparation (n°1, p. 76).

- Références

AAGAARD P (2003) Training-induced changes in neural function. Exerc Sport Sci Rev 32: 61-67

AAGAARD P, SIMONSEN EB, ANDERSEN JL, MAGNUSSON P, DYHRE-POULSEN P (2002) Neural adaptation to resistance training : changes in evoked V-wave and H-reflex responses. J Appl Physiol 92: 2309-2318

AAGAARD P, SIMONSEN EB, ANDERSEN JL, MAGNUSSON SP, HALKJÆR-KRISTENSEN J, DYHRE-POULSEN P (2000a) Neural inhibition during maximal eccentric and concentric quadriceps contraction : effects of resistance training. J Appl Physiol 89: 2249-2257

AAGAARD P, SIMONSEN EB, ANDERSEN JL, MAGNUSSON SP, BOJSEN-MØLLER F, DYHRE-POULSEN P (2000b) Antagonist muscle coactivation during isokinetic knee extension. Scand J Med Sci Sports 10: 58-67

AAGAARD P, SIMONSEN EB, TROLLE M, BANGSBO J, KLAUSEN K (1995) Isokinetic hamstring/quadriceps strength ratio : influence from joint angular velocity, gravity correction and contraction mode. Acta Physiol Scand 154: 421-427

ABE T, FUKASHIRO S, HARADA Y, KAWAMOTO K (2001) Relationship between sprint performance and muscle fascicle length in female sprinters. J Physiol Anthropol Appl Human Sci 20: 141-147

BARATTA R, SOLOMONOW M, ZHOU BH, LETSON D, CHUINARD R, D'AMBROSIA R (1988) Muscular coactivation - The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. Am J Sports Med 16: 113-122

BERGER W, QUINTERN J, DIETZ V (1985) Stance and gait perturbations in children : developmental aspects of compensatory mechanisms. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 61: 385-395

CAIOZZO VJ, PERRINE JJ, EDGERTON VR (1981) Training-induced alterations of the in vivo force-velocity relationship of human muscle. J Appl Physiol 51: 750-754

COLSON S, POUSSON M, MARTIN A, VAN HOECKE J (1999) Isokinetic elbow flexion and coactivation following eccentric training. J Electromyogr Kinesiol 9: 13-20

DE LUCA CJ (1984) Myoelectrical manifestations of localized muscular fatigue in humans. Crit Rev Biomed Eng 11: 251-279.

DESCHENES MR, GILES JA, Mc COY RW, VOLEK JS, GOMEZ AL, KRAEMER WJ (2002) Neural factors account for strength decrements observed after short-term muscle unloading. *Am J Physiol Integr Comp Physiol* 282: 578-583

DIETZ V (1987) Role of peripheral afferents and spinal reflexes in normal and impaired human locomotion. *Rev Neurol (Paris)* 143: 241-254

ENOKA RM (1997) Neural adaptations with chronic physical activity. *J Biomech* 30: 447-455

ENOKA RM (1988) Muscle strength and its development. New perspectives. *Sports med* 6: 146-168

FARTHING JP and CHILIBECK PD (2003) The effects of eccentric and concentric training at different velocities on muscle hypertrophy. *Eur J Appl Physiol* 89: 578-586

FUKUNAGA T, ICHINOSE Y, ITO M, KAWAKAMI Y, FUKASHIRO S (1997) Determination of fascicle length and pennation in a contracting human muscle in vivo. *J Appl Physiol* 82: 354-358.

GENNISSON JL, CATHERINE S, CHAFFAI S, FINK M (2003) Transient elastography in anisotropic medium: application to the measurement of slow and fast shear wave speeds in muscles. *J Acoust Soc Am* 114: 536-41

GENNISSON JL, CORNU C, STEFAN C, FINK M, PORTERO P (2004) Human muscle hardness assessment during incremental isometric contraction using transient elastography. *J Biomech*, (sous presse)

GRAVEN-NIELSEN T, LUND H, ARENDT-NIELSEN L, DANNESKIOLD-SAMSOE B, BLIDDAL H (2002) Inhibition of maximal voluntary contraction force by experimental muscle pain : a centrally mediated mechanism. *Muscle Nerve* 26: 708-712

HAGOOD S, SOLOMONOW M, BARATTA R, ZHOU BH, D'AMBROSIA R (1990) The effect of joint velocity on the contribution of the antagonist musculature to knee stiffness and laxity. *Am J Sports Med* 18: 182-187

KAWAKAMI Y, ICHINOSE Y, FUKUNAGA T (1998) Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *J Appl Physiol* 85: 398-404

KELLIS E, BALZPOULOS V (1997) The effect of antagonist moment on the resultant joint moment during concentric and eccentric efforts of the knee extensors. *Eur J*

Appl Physiol 76: 253-259

KOVALESKI JE, HEITMAN RH, TRUNDLE TL, GILLEY WF (1995) Isotonic preload versus isokinetic knee extension resistance training. Med Sci Sports Exerc 27: 895-899

KROGSGAARD MR, DYHRE-POULSEN P, FISCHER-RASMUSSEN T (2002) Cruciate ligament reflexes. J Electromyogr Kinesiol 12: 177-182

MERTON PA (1954) Voluntary strength and fatigue. J Physiol Lond 123: 553-564

MORITANI T and DeVRIES HA (1979) Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. Am J Phys Med 58: 115-130

MULLANY H, O'MALLEY M, St CLAIR GIBSON A, VAUGHAN C (2002) Agonist-antagonist common drive during fatiguing knee extension efforts using surface electromyography. J Electromyogr Kinesiol 12: 375-384

NEWHAM DJ, Mc CARTHY T, TURNER J (1991) Voluntary activation of human quadriceps during and after isokinetic exercise. J Appl Physiol 71: 2122-2126

O'HAGAN FT, SALE DG, MAC DOUGALL JD, GARNER SH (1995) Comparative effectiveness of accommodating and weight resistance training modes. Med Sci Sports Exerc 27: 1210-1219

PRIORI A, CINNANTE C, PESENTI A, GALLANTI A, CAPPELLARI A, SCARLATO G, BARBIERI S (2001) Decreased EMG inhibition following electrical stimulation over muscle tendons in myopathies. Clin Neurophysiol 112: 1931-1935

PSEK JA, CAFARELLI E (1993) Behavior of coactive muscles during fatigue. J Appl Physiol 74: 170-175

REMAUD A, CORNU C, GUÉVEL A (2004) Responses of the neuromuscular system to isotonic and isokinetic contractions. Arch Physiol Biochem 112: S163 (XXIe Congress of the French National Society of Biomechanics - Paris)

SOLOMONOW M, BARATTA R, ZHOU BH, SHOJI H, BOSE W, BECK C, D'AMBROSIA R (1987) The synergistic action of the anterior cruciate ligament and thigh muscles in maintaining joint stability. Am J Sports Med 15: 207-213

SUTER E, HERZOG W (1997) Extent of muscle inhibition as a function of knee angle. J Electromyogr Kinesiol 7: 123-130

WEIR JP, KEEFE DA, EATON JF, AUGUSTINE RT, TOBIN DM (1998) Effect of fatigue on

c) Conclusion

Le but de ce projet global est d'analyser les adaptations de la fonction neuromusculaire au travers de paramètres physiologiques et biomécaniques. De fait, il s'agit : de mieux comprendre les mécanismes responsables de la génération de force du point de vue des facteurs nerveux (inhibition ou facilitation de l'activation des muscles agonistes, niveau de co-activation des muscles antagonistes), et des facteurs structuraux (trophie musculaire, architecture...) témoins de la plasticité du système neuromusculaire selon la modalité de contraction considérée. Aussi, les différentes modalités d'entraînement spécifique ou de renforcement musculaire pourront être étudiées en fonction des effets précisément recherchés. A terme nous devrions être capables grâce à une meilleure connaissance scientifique dans le domaine de la physiologie intégrée, de préconiser des aménagements de procédures de renforcement musculaire existantes et d'en concevoir et/ou d'en valider d'autres compte tenu des objectifs affichés par les sujets. Ceci présente un intérêt majeur dans le cadre de la rééducation des patients atteints d'hypokinésie par exemple post-opératoire ou bien induite par une pathologie neuromusculaire mais aussi dans le cadre de l'amélioration des performances sportives grâce à la mise en oeuvre de protocoles d'entraînement adéquats.

4-4-3-2-3 Projet global c: Etude de la visco-élasticité des structures musculo-tendineuses et musculo-articulaires

a) Présentation générale

Ce projet d'étude des propriétés visco-élastiques musculaires très succinctement décrit ci-après constitue le prolongement direct du travail de recherche que j'ai mené jusqu'à présent. Il est intimement lié aux projets globaux a et b décrits ci-dessus et aurait pu être intégré à ce dernier.

Néanmoins, cet axe de recherche demeure fondamental et assez spécifique s'agissant de

l'étude de la fonction neuromusculaire. En effet, les propriétés biomécaniques des structures de transmission de la force produite au niveau des interactions actine-myosine conditionnent la production de force externe et les capacités du système musculo-tendineux à mobiliser par exemple les pièces osseuses auxquelles il est rattaché. Aussi, la caractérisation de la raideur musculo-tendineuse par la méthode de détente rapide, de la raideur musculo-articulaire par les méthodes des perturbations sinusoïdales ou l'utilisation de cycles d'étirements, de la raideur musculaire par l'élastographie impulsionnelle et enfin de la souplesse au cours de mes différents travaux m'a conduit à prendre conscience de l'importance fonctionnelle des paramètres de raideur et de viscosité mais aussi de la complexité à comprendre à quelle(s) structure(s) physiologique(s) ces différents comportements visco-élastiques faisaient référence. Compte tenu de l'intérêt de l'étude de ces paramètres dont on sait qu'ils sont sensibles aux modifications de la demande fonctionnelle, je souhaite développer spécifiquement des travaux sur cet axe qui devraient également contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes de production de force et de leurs adaptations potentielles.

Dans ce cadre, deux actions préliminaires ont été menées en 2004 au laboratoire MIP s'appuyant sur deux travaux de recherche de maîtrise.

b) Projets en cours et perspectives

- Le premier travail consistait en l'écriture d'une revue de la littérature sur « les différents types de raideur caractérisée in vivo : de leur méthode d'étude à leur signification physiologique ». Ce projet avait pour objectif d'identifier les différents types de raideurs « musculaires » caractérisées dans la littérature scientifique de telle sorte que malgré les différentes terminologies adoptées par les chercheurs impliqués dans ce domaine (bio-mécaniciens, médecins, kinésithérapeutes, physiciens...), une classification claire puisse être établie quant à la signification physiologique des comportements déterminés. Ce travail a été pour partie menée par C. Fortis, **étudiante en maîtrise STAPS Education et Motricité**.

- Le deuxième travail concernait l'étude sur les effets des étirements statiques sur les propriétés biomécaniques du muscle présentée ci-avant (étude « f », p. 30).

Le prolongement naturel de ce travail concerne l'étude des effets chroniques des étirements sur les propriétés visco-élastiques musculo-articulaires. En effet, à ce jour, beaucoup d'incertitudes demeurent s'agissant de la modalité d'étirements (statique, dynamique, facilitation proprioceptive neuromusculaire) la plus efficace pour améliorer la souplesse (Burke et al, 2001; Bandy et al, 1998 ; Magnusson et al, 1996), prévenir des blessures (Shrier, 1999 ; Gleim et McHugh, 1997) ou améliorer la performance (Worrel et al, 1994 ; Kokkonen et al, 1998 ; Herbert et Gabriel, 2002).

De même, une grande variabilité existe dans la littérature s'agissant du nombre de répétitions et/ou sur la durée des étirements nécessaires et suffisants afin d'observer des modifications du comportement musculo-articulaire en terme de souplesse, de raideur, de viscoélasticité ou de production de force par exemple (Magnusson et al, 1996, 1998, 2000 ; Taylor et al, 1990, Bandy et Irion, 1994 ; Bessel et McNair 2002). De plus les mécanismes à l'origine de ces adaptations potentielles restent mal connus.

Ce champ d'investigation constitue donc un axe important de recherche pour moi, également parce que les caractéristiques biomécaniques mises en jeu peuvent représenter des déterminants de la performance pour certaines pratiques sportives.

Références :

Bandy WD., Irion JM., Briggler M. (1998). *The effect of static stretch and dynamic range of motion training on the flexibility of the hamstring muscles.* J. Orthop. Sports Phys. Ther. 27, 295-300.

Bandy WD., Irion JM. (1994). *The effect of time on static stretch on the flexibility of the hamstring muscles.* Phys. Ther. 74, 845-850.

Bressel E., McNair PJ. (2002). *The effect of prolonged static and cyclic stretching on ankle joint stiffness, torque relaxation, and gait in people with stroke.* Phys. Ther. 82, 880-887.

Burke DG., Holt LE., Rasmussen R., Mackinnon NC., Vossen JF., Pelham TW. (2001). *Effects of hot or cold water immersion and modified proprioceptive neuromuscular facilitation flexibility exercise on hamstring length.* J. Athl. Train. 36, 16-19.

- Gleim GW., McHugh MP. (1997). *Flexibility and its effects on sports injury and performance*. Sports Med. 24, 289-299.
- Herbert RD., Gabriel M. (2002). *Effects of stretching before and after exercising on muscle soreness and risk of injury. Systematic review*. BMJ review 325.
- Kokkonen J., Nelson AG., Cornwell A. (1998). *Acute muscle stretching inhibits maximal strength performance*. Res. Q. Exerc. Sport 69, 411-415.
- Magnusson SP., Aagaard P., Nielson JJ. (2000). *Passive energy return after repeated stretches of the hamstring muscle-tendon unit*. Med. Sci. Sports Exerc. 32, 1160-1164.
- Magnusson SP. (1998a). *Passive properties of human skeletal muscle during stretch maneuvers. A review*. Scand. J. Med. Sci. Sports 8, 65-77.
- Magnusson SP., Aagaard P., Simonsen E., Bojsen-Moller F. (1998b). *A biomechanical evaluation of cyclic and static stretch in human skeletal muscle*. Int. J. Sports Med. 19, 310-316.
- Magnusson SP., Simonsen EB., Dyhre-Poulsen P, Aagaard P., Mohr T., Kjaer M. (1996a). *Viscoelastic stress relaxation during static stretch in human skeletal muscle in the absence of EMG activity*. Scand. J. Med. Sci. Sports 6, 323-328.
- Magnusson SP., Simonsen EB., Aagaard P., Sorensen H., Kjaer M. (1996b). *A mechanism for altered flexibility in human skeletal muscle*. J. Physiol. 497, 291-298.
- Magnusson SP., Simonsen EB., Aagaard P., Kjaer M. (1996c). *Biomechanical responses to repeated stretches in human hamstring muscle in vivo*. Am. J. Sports Med. 24, 622-628.
- Magnusson SP., Simonsen EB., Aagaard P., Dyhre-Poulsen P, Mchugh MP., Kjaer M. (1996d). *Mechanical and physiological responses to stretching with and without preisometric contraction in human skeletal muscle*. Arch. Phys. Med. Rehabil. 77, 373-378.
- Shrier I. (1999). *Stretching before exercise does not reduce the risk of local muscle injury : a critical review of the clinical and basic science literature*. Clin. J. Sports Med. 9, 221-227.
- Taylor DC., Dalton JD., Seaber AV., Garrett WE. (1990). *Viscoelastic properties of muscle-tendon units. The biomechanical effects of stretching*. Am. J. Sports Med. 18, 300-309.
- Worrell TW., Smith TL., Winegardner J. (1994). *Effect of hamstring stretching on hamstring muscle performance*. J. Orthop. Sports Phys. Ther. 20, 154-159.

- D'autres études peuvent être envisagées dans le cadre de ce projet global. L'étude des propriétés visco-élastiques et de leur évolution au cours de sollicitations spécifiques peut par exemple être réalisée pour différentes populations de sportifs ou dans le cadre de protocoles d'entraînement spécifiques. Elle peut également être envisagée pour des patients atteints de pathologies neuromusculaires dans le cadre de collaborations à développer avec certains services hospitaliers du CHU de Nantes.

Pour ce faire, nous pourrions envisager l'implémentation d'outils spécifiques permettant de caractériser certaines propriétés visco-élastiques musculaires sur la base de nos connaissances dans ce domaine (cf partie 4-3-3). Il est également envisageable à très court terme d'activer des collaborations scientifiques par exemple avec le laboratoire de Biomécanique et instrumentation médicale de l'U.T.C. (UMR-CNRS 6600, Compiègne) , l'Institut de Myologie (GH Pitié-Salpêtrière, Paris), ou bien encore avec le laboratoire Ondes et Acoustique (ESPCI, Paris) s'agissant du prêt de matériel existant.

Enfin, une collaboration internationale sur cet axe pourrait par ailleurs être envisagée avec l'Unité de recherche neuromusculaire du Pr P. McNair (School of physiotherapy, Auckland, New Zealand) avec qui je suis en contact dans le cadre de la caractérisation de la raideur de patients en phase de rééducation par la technique de la détente rapide.

4-4-3-2-4 Projet global d: Développement d'un projet de recherche dans le domaine de l'Aviron

a) Présentation générale

Le projet développé succinctement ci-après est né en 2003-2004 de la volonté de s'investir dans une discipline sportive prépondérante dans la région Ouest : l'aviron. Il est porté, au sein du laboratoire MIP, conjointement par A. Guével et moi même et a été présenté à Mr B. Boucher, responsable du pôle Aviron à Nantes, en avril 2004.

Ce projet de recherche présente quatre axes principaux, dont certains sont déjà initiés partiellement, qui veulent mettre en relation l'exigence et la rigueur indispensables à la réalisation de travaux scientifiques et la demande du milieu de l'entraînement d'un retour pragmatique vers la pratique. Aussi, ces différents axes peuvent être développés

dans différentes études soumises à la discussion avec les entraîneurs de telle sorte que nous puissions apporter des réponses à leurs questionnements potentiels et anticiper leurs besoins en terme de recherche appliquée au service de ce sport.

- **Le premier axe** de travail concerne la caractérisation des sollicitations physiologiques et mécaniques en aviron au cours de l'effort en situation de compétitions simulées (ou réelles) et au cours de différents exercices à l'entraînement. Il s'agit plus précisément d'évaluer les contraintes auxquelles est soumis l'organisme du rameur (sollicitations musculaires et métaboliques, fatigue neuromusculaire, etc...). Un premier travail a été mené en 2004 (cf étude « n » , p. 35) qui a donné lieu à la communication orale n°1 (p. 77).

- **Le deuxième axe** concerne l'étude et l'analyse des méthodes d'entraînement. Il s'agit par exemple de caractériser les adaptations neuromusculaires et cardiorespiratoires au cours d'exercices d'entraînement ou bien d'étudier l'intérêt des exercices intermittents en aviron. Dans ce cadre, un premier travail a été mené en 2004 (cf étude « m » , p. 35).

- **Un troisième axe** envisagé permettrait d'évaluer le potentiel physique du rameur notamment de haut niveau afin de caractériser ses capacités musculaires et métaboliques et d'être en mesure de réaliser un suivi longitudinal de cet athlète.

- **Enfin, le quatrième axe** est orienté vers des études d'analyse des contraintes mécaniques sur le matériel et des déterminants biomécaniques de la performance en aviron.

Le développement de ce projet pluridisciplinaire pourra nécessiter la mise en place de collaborations scientifiques dont certaines sont déjà initiées : par exemple avec le laboratoire de Mécanique des fluides (UMR CNRS 6598), Ecole Centrale Nantes (J.M. Kobus, S. Barre) ou avec l'Institut de recherche en génie Civil et Mécanique (UMR - CNRS - 6183), Université de Nantes (P. Casari).

4-4-4 CONCLUSION GENERALE

Mes projets de recherche présentés ci-dessus sont centrés sur la connaissance de la physiologie et de la biomécanique du système neuromusculaire et sur ses adaptations à la modification de la demande fonctionnelle. Ils s'inscrivent directement dans le programme de recherche du laboratoire. Ils mettent en avant plusieurs approches en interactions fortes permettant de mieux appréhender les mécanismes sous-jacents relatifs à la production de force selon les différentes modalités envisagées.

La plupart de ces projets sont d'ores et déjà réalisables en totalité au sein du laboratoire MIP. D'autres nécessitent encore pour être menés en autonomie d'acquérir certains matériels. Les efforts réalisés en terme de réponses aux différents appels d'offre laissent à penser que ces matériels pourront être acquis rapidement.

De plus, il apparaît indispensable de continuer à développer des collaborations scientifiques internes et externes à l'Etablissement. En effet, des travaux, pour lesquels des interactions importantes existent, peuvent être développés notamment avec les équipes de recherche travaillant sur le muscle isolé et la physiologie cellulaire (par exemple à la Faculté des Sciences ou à l'Ecole vétérinaire de Nantes) afin d'être en capacité d'interpréter plus finement les adaptations potentiellement mises en évidence. De même, des collaborations doivent pouvoir être établies avec certains services hospitaliers directement intéressés par l'évaluation de la fonction neuromusculaire (par exemple le service de Médecine du sport ou/et des laboratoires travaillant sur les pathologies neuromusculaires).

Ceci permettra à notre équipe de développer son rayonnement et d'accroître sa reconnaissance aux niveaux local, national et international.

5- RECHERCHE DE SUBVENTIONS

La recherche de subvention constitue une priorité pour notre jeune équipe afin de se développer dans les meilleures conditions. Aussi, les dossiers relatifs aux demandes d'équipements de laboratoire par l'Etablissement sont-ils traités collectivement et des projets de recherche sont mis en avant pour y répondre. Certaines réponses aux appels d'offres locaux par exemple émanant de la DRDJS sont traités collectivement de la même façon (cf exemple annexe 8-1, p. 125 à 132).

Par ailleurs, depuis 1996 nous avons obtenu environ 97500 € (640000 F) de subvention pour les projets de recherche dont j'avais la charge (annexe 8-1, p. 88 et 89). De plus, deux demandes de subventions en réponse à l'appel d'offre AFM 2005 sont en cours d'expertise : l'une d'un montant de 15000 € nous permettrait d'acquérir en cas de réponse positive une nouvelle chaîne d'acquisition EMG (annexe 8-1, p. 109) ; l'autre d'un montant de 25600 € nous permettrait notamment d'acquérir un échographe (annexe 8-1, p. 91). Les réponses à ces demandes devraient être connues au cours du premier trimestre 2005.

6- PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Les publications (point 6-1), chapitres d'ouvrages (point 6-2) et communications (point 6-5) sont présentés dans un document annexe.

6-1 ARTICLES PUBLIES ET ACCEPTES

- 1- JL. Gennisson , **C. Cornu**, S. Catheline, M. Fink, P. Portero. Human muscle hardness assessment during incremental isometric contraction using the transient elastography technique. *J. Biomech.*, 2004 (sous presse). **(IF 2003 = 2,00)**
- 2- S. Mansour, O. Maisetti, **C. Cornu**, P. Portero. Countermovement jump performance and lateral specificity in knee muscle function in elite high jumpers. *Isokinetics and exercise science*, 2005 (accepté). **(IF 2003 = 0,3)**
- 3- P. Portero et **C. Cornu** . Effets de la diminution de la demande fonctionnelle sur la morphologie et la mécanique musculaire. *Kinésithérapie, les annales*, 2003, 22 : 18-25.
- 4- **C. Cornu**, O. Maisetti, I. Ledoux. Muscle elastic properties during wrist flexion and extension in healthy sedentary subjects volley-ball players. *Int J Sport Med*, 2003, 24: 277-284. **(IF 2003 = 1,37)**
- 5- M. Dauty, **C. Cornu**, Y. Allard, MJ. Grandet, C. Dubois. Prothèse de genou : reproductibilité de la vitesse de marche. *Ann. Med. Phys. Readapt.*, 2002, 45 :147-53. **(Indexé pubmed, IF non disponible)**
- 6- **C. Cornu** and F. Goubel. Musculo-tendinous and joint elastic characteristics during elbow flexion in children. *Clin. Biomech.*, 2001, 16: 755-761. **(IF 2003 = 1,17)**
- 7- **C. Cornu**, F. Goubel, M. Fardeau. Muscle and joint properties during elbow flexion in Duchenne muscular dystrophy. *J. Physiol. Lond.*, 2001, 533: 605-616. **(IF 2003 = 4,35)**

- 8- A. Desplantez, **C. Cornu**, F. Goubel. Viscous properties of human muscle during contraction. J. Biomechanics, 1999, 32 : 555-562. (IF 2003 = 2,00)
- 9- **C. Cornu**, D. Lambertz, F. Goubel. Changes in muscle and joint stiffness induced by plyometric training. Symposium 5: Adaptations musculaires consécutives à diverses formes d'entraînement. Science & Motricité, 1999, 38-39 : 87-88.
- 10- **C. Cornu**, F. Goubel, M. Fardeau. Stiffness of knee extensors in Duchenne muscular dystrophy. Muscle & Nerve, 1998, 21 : 1772-1774. (IF 2003 = 2,28)
- 11- **C. Cornu**, I. Almeida Silveira, F. Goubel. Influence of plyometric training on the mechanical impedance of the human ankle joint. Eur. J. Appl. Physiol., 1997, 76 : 282-288. (IF 2003 = 1,49)

6-2 CHAPITRES DE LIVRE

P. Portero et **C. Cornu**. Adaptations du muscle à la diminution de la charge fonctionnelle. Les différents modèles de déconditionnement « du vol spatial à l'immobilisation plâtrée ». *In : Plasticité de la fonction motrice*. JP Didier, Springer ed., 2004, pp : 201-234.

D. Lambertz, **C. Cornu**, C. Pérot, F. Goubel. Adaptation of human ankle joint stiffness to changes in functional demand. *In : Skeletal Muscle mechanics : from mechanism to function*. Ed. W. Herzog, Wiley and Sons, 2000, pp : 409-428.

C. Cornu, O. Maisetti, I. Ledoux. Muscle elastic properties during wrist flexion and extension in healthy sedentary subjects volley-ball players. *In : Year Book of Sports Medicine 2004*. Ed. Roy J Shepard, Elsevier (à paraître décembre 2004, sous réserve).

6-3 ARTICLES EN PREPARATION

- 1- A. Remaud, C. Cornu, A. Guével. Methodological approach for the comparison of dynamic contractions: influences on the neuromuscular system. J. Athl. Training (IF 2003 = 1,19), soumission dernier trimestre 2004.
- 2- A. Remaud, C. Cornu. Acute and chronic responses of the neuromuscular system to different training modes. Review. Science et sport. (IF 2003 = 0,114), soumission dernier trimestre 2004.
- 3- A. Nordez, C. Cornu, P. Casari, S. Catheline. Investigations on the elastic behavior of passive skeletal muscle using transient elastography. J. Appl. Physiol. (IF 2003 = 3,02), premier trimestre 2005.
- 4- C. Cornu, B. Bideau, A. Nordez. Muscle activity and mechanical characteristics of shoulder rotators induced by intensive volleyball practice. Int J Sport Med, (IF 2003 = 1,37) premier trimestre 2005.
- 5- P. Portero et C. Cornu. Effects of velocity, ground and tire on energy expenditure during off-road bicycling. Int. J. Sport Med. (IF 2003 = 1,37), premier trimestre 2005.

6-4 ARTICLE REVUE PARIS XII- CONSEIL GENERAL

C. Cornu. Typologie musculaire et fonction. In: Sport, Santé et Préparation physique. Connaissances et recherches en matière d'entraînement et de protection du sportif. Sept 2001, 1 : 6-8.

C. Cornu. Le cross training : de la compétition à l'entretien physique. In: Sport, Santé et Préparation physique. Connaissances et recherches en matière d'entraînement et de protection du sportif. Juin 2002, 3 : 6-7.

C. Cornu. Fatigue des structures de l'appareil locomoteur et manifestations extérieures. In: Sport, Santé et Préparation physique. Connaissances et recherches en matière d'entraînement et de protection du sportif. Octobre 2002, 4 : 4-5

C. Cornu. Le tendon : organe transmetteur proprioceptif. In: Sport, Santé et Préparation physique. Connaissances et recherches en matière d'entraînement et de protection du sportif. Mars 2003, 5 : 6-7

6-5 COMMUNICATIONS CONGRES

- 1- A. Guével, A. Nordez, S. Boyas, V. Guihard, C. Cornu. Caractérisation des sollicitations musculaires des extenseurs de la jambe lors de séquences codifiées d'entraînement en aviron. 3^{ème} Journée Internationale des Sciences du Sport, INSEP Paris. In : Actes du congrès, 2004, p 89-90.
- 2- A. Remaud, C. Cornu, A. Guével. Responses of neuromuscular system to isotonic and isokinetic contractions. Société de Biomécanique, Paris XII. In Arch. Physiol. Biochem., 2004, supp 112 : p 279.
- 3- J. Lecompte, O. Maisetti, C. Cornu, P. Portero. Specific Adaptations of Elbow Muscles during Extension Movements in trained Water Polo Players. European College of Sports Science, Clermont-Ferrand (France). In : Book of abstracts, 2004, p 25.
- 4- S. Mansour, C. Cornu, O. Maisetti, P. Portero. Knee muscles mechanical and electromyographic parameters in high jumper athletes. International Society of Biomechanics, XIXth Congress. Dunedin (New Zealand). In : Book of abstracts, 2003, p 73.
- 5- C. Cornu and P. Portero. Ground and tyre effects on the External Mechanical parameters during standardized off-road bicycle efforts. International Society of Biomechanics, XIXth Congress. Dunedin (New Zealand). In : Book of abstracts, 2003, p 74.
- 6- S. Mansour, C. Cornu, I. Rose, P. Portero. Approche dissociée du comportement moteur et des paramètres mécaniques des membres inférieurs au cours de la détente verticale. IX^{ème} Congrès international de l'ACAPS. Valence (France). In : Actes du congrès, 2001.
- 7- C. Jean, C. Cornu, P. Portero. Bioénergétique et VTT en conditions standardisées : influence du type de pneumatique et du terrain. IX^{ème} Congrès international de l'ACAPS. Valence (France). In : Actes du congrès, 2001.

- 8- P. Portero, **C. Cornu**, M. Zazoui. Effects of velocity, ground and tire on energy expenditure during off-road bicycling. Pre-olympic congress, Brisbane, Australie. In : Book of abstracts, 2000, p 462.
- 9- **C. Cornu**, F. Goubel, M. Fardeau. Visco-elastic properties of elbow flexors in Duchenne muscular dystrophy. Congrès International de Myologie. Nice. In : Résumés des communications, 2000, p 134.
- 10- **C. Cornu**, D. Lambertz, F. Goubel. Changes in muscle and joint stiffness induced by plyometric training. VIII^{ème} Congrès international de l'ACAPS. Mâcolin (Suisse). In : Actes du congrès, 1999, pp 83-84.
- 11- **C. Cornu**, F. Goubel, M. Fardeau. Muscle elastic properties in children with Duchenne muscular dystrophy. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering. Nice. In : Med. Biol Engr. Compt. 1997, 35, Suppl Part 1, p 180.
- 12- **C. Cornu**, C. Vanhoutte, F. Goubel, J. Paulus, M. Fardeau. Evaluation de l'élasticité musculaire chez les enfants atteints de dystrophie musculaire de Duchenne. VI^{ème} Colloque sur les maladies neuro-musculaires. Versailles. In : Résumé des communications, 1996, p131.

6-6 COMMUNICATIONS INVITES

- 1- P. Portero et **C. Cornu**. De l'espace au lit du malade. Troisième journée de Myologie, symposium : Muscle et microgravité. Pitié-Salpêtrière, Paris, mai 2003.
- 2- **C. Cornu** et P. Portero. Adaptation du muscle à la diminution de la demande fonctionnelle. Conférence interface INSERM / SOFMER : Plasticité de la fonction motrice : un nouveau concept. Perspectives de recherche. XVI^{ème} Congrès National de la Société Française de Médecine Physique et de Réadaptation, Bordeaux, 2001.
- 3- **C. Cornu** et P. Portero. Les effets des étirements musculo-tendineux : Mythe ou réalité ?. Journée « Rencontre en Rééducation sur le thème : Le Sport après 40 ans ». Les Sables d'Olonne, 2001.
- 4- F. Goubel and **C. Cornu**. Functional testing in DMD children. Journées « DMD gene therapy », Pitié-Salpêtrière, Paris, 1999.

6-7 MEMOIRES DE RECHERCHE - RAPPORT D'EXPERTISE

- 1- Mémoire de thèse : Quantification de l'évolution des propriétés mécaniques d'un ensemble musculo-articulaire chez l'Homme. Application à l'étude de la dystrophie musculaire de Duchenne. **Université de Technologie de Compiègne, 1998.**
- 2- Mémoire de Diplôme d'Etude Approfondie (D.E.A.) : Développement d'une étude dynamométrique de la force musculaire de sujets atteints de dystrophie musculaire en vue d'une application à l'évaluation des thérapies cellulaires et géniques. **Orsay (Paris XI), Biomécanique et physiologie du Mouvement, 1994.**
- 3- Rapport d'expertise : Etude relative à l'utilisation du système HF1 : Expertise physiologique et biomécanique. P. Portero, K. Ollivier, **C. Cornu**, Institut de la Performance Humaine (IPH), 2001.
Promoteur de l'expertise : LPG Systems®

6-8 MEMOIRES DE RECHERCHE DES ETUDIANTS ENCADRES

Les pages de couverture des mémoires des étudiants ayant soutenu leur projet de recherche sont présentées en annexes (8-4, p. 102 et svtes)

Maîtrise

- Test de vitesse de marche sur 10 mètres chez des patients opérés d'une prothèse totale de genou : étude de fiabilité (2000-01). **Yves Allard**. Maîtrise « Education et Motricité », UFR STAPS de Nantes.
- Comparaison des effets de deux modes d'entraînement (isocinétique versus isotonique) sur la fonction neuromusculaire (2001-02). **Stevy Farcy**. Maîtrise « Entraînement Sportif, option Haut Niveau », UFR STAPS Paris XII-INSEP.
- Effets aigus des étirements statiques sur les propriétés mécaniques des fléchisseurs du genou. (2003-2004). **Frédéric Caillaud**. Maîtrise « Education et Motricité », UFR STAPS de Nantes.
- Les méthodes d'évaluation des différents types de raideurs potentiellement exprimées au niveau d'un système musculo-articulaire. **Carole Fortis**. Maîtrise « Education et Motricité », UFR STAPS de Nantes.

DEA

- Etude de la raideur des muscles croisant l'articulation du coude chez l'adulte sain (2000-01). **Georges Abou Jaoude**. DEA Physiologie et Biomécanique de l'Homme en mouvement, Université Paris XI. Co-direction avec le P^r B. Maton.
- Pratique du VTT en conditions standardisées : influence du pneumatique, du terrain et de la vitesse. « Approche biénergétique, mécanique et de perception de l'effort chez le pilote de VTT » (2000-01). **Caroline Jean**. DEA Physiologie et biomécanique de la performance motrice - STAPS, Université Rennes 2. Co-direction avec le P^r. P. Portero.
- Evaluation des caractéristiques mécaniques musculaires dynamiques à partir des perturbations sinusoïdales chez l'enfant. Application à la dystrophie musculaire de Duchenne (2001-02). **Mickael Jouan**. DEA de biomécanique et de physiologie. Université Technologie de Compiègne. Co-direction avec le P^r F. Goubel.
- Développement d'un ergomètre coude portable pour la caractérisation de certaines propriétés mécaniques musculaires (2001-02). **Marie Valérie Moreno**. DEA biomécanique et de physiologie. Université Technologie de Compiègne. Co-direction avec le Dr JY Hogrel.
- Evolution des paramètres neuromusculaires au cours d'une séance d'entraînement standardisée : mode isotonique versus mode isocinétique (2002-03). **Anthony Remaud** . DEA physiologie et biomécanique de la performance motrice. STAPS, Université Rennes 2.
- Etude des adaptations biomécanique et électrophysiologique des muscles croisant l'articulation du coude dans les sports de lancer : application au water polo (2002-2003). **Jennyfer Lecompte**. DEA de biomécanique et de physiologie. Université Technologie de Compiègne. Co-direction avec le P^r P. Portero.

7- ACTIVITES ADMINISTRATIVES

Tout au long de mon parcours universitaire, j'ai été amené à prendre certaines responsabilités administratives. L'acceptation de ces tâches au service d'un collectif m'apparaît indispensable s'agissant notamment de la structuration et du bon fonctionnement de la recherche et plus globalement de l'UFR. Aussi, je développerai les activités administratives dont j'ai eu, ou continue d'avoir, la charge en rapport avec les activités de recherche d'une part, avec les activités pédagogiques d'autre part et enfin, plus généralement au sein de l'UFR STAPS de Nantes.

7-1 EN RAPPORT AVEC LES ACTIVITES DE RECHERCHE

1- Chargé de mission au sein de l'équipe de recherche de l'UFR STAPS (J.E. 2438), depuis Juin 2004 :

L'équipe de recherche (MIP) s'est structurée de telle sorte que chacun de ses membres assure plus particulièrement certaines tâches administratives. Dans ce cadre, quatre missions principales m'ont été confiées. Il s'agit 1) de définir une stratégie de valorisation de la recherche réalisée au sein du laboratoire ; 2) de mettre en œuvre avec la DRASS les conditions optimales de réalisation de protocoles expérimentaux au sein du laboratoire ; 3) d'être le référent au sein du laboratoire pour les questions relatives au dépôt de dossier de recherche auprès du CCPPRB ; 4) d'être le référent au sein du laboratoire pour les questions relatives à la mise en place de conventions avec d'autres structures (laboratoires, entreprises...).

2- Membre du Conseil Scientifique de l'UFR STAPS de Nantes depuis février 2004.

Le conseil scientifique a pour mission de coordonner et de structurer la recherche au sein de l'UFR et d'en valoriser la recherche développée. J'ai par ailleurs été nommé représentant du conseil scientifique auprès de la cellule de valorisation de la recherche de l'Université de Nantes.

3- Membre des Commissions de spécialistes 74^{eme} section depuis mars 2004 :

- de l'UFR STAPS de Nantes (suppléant)
- du Département STAPS du Mans (titulaire)
- du Département STAPS de Paris XII (suppléant)

4- Membre suppléant de la commission de spécialiste de la 74^{eme} section de l'Université Paris XIII (octobre 2001-avril 2004)

5- Secrétaire de l'Institut de la Performance Humaine (IPH) (depuis Novembre 2001)

Il s'agit d'une association loi 1901 créée en 2000 qui réunit un collège de chercheurs et de cliniciens capables de mener à bien différentes missions d'expertise dans les domaines de la physiologie, la biomécanique, l'ergonomie, le sport et la santé. Cette association a pour objectif de mettre en relation des industriels et des experts pouvant répondre à leurs besoins.

7-2 EN RAPPORT AVEC LES ACTIVITES PEDAGOGIQUES

1- Co-Responsable pédagogique du Master Recherche 1^{ere} année "Physiologie cellulaire et intégrée des activités physiques et modélisation du mouvement" de l'UFR STAPS Nantes depuis Juin 2004.

- ⇒ **Mission en relation avec l'équipe pédagogique :** organiser les conditions matérielles et pédagogiques des enseignements.
- ⇒ **Mission en relation avec les étudiants :** organiser l'information concernant les enseignements, établir un dialogue avec les représentants étudiants

- ⇒ **Mission en relation avec la direction et la scolarité** : suivre les dossiers concernant l'année de formation considérée, veiller au bon déroulement des stages obligatoires, de proposer au directeur d'éventuelles modifications aux règlements, contrôles des connaissances

2- **Responsable disciplinaire** des enseignements en Sciences de la Vie dans le plan de formation de l'UFR STAPS Nantes depuis juin 2004.

- ⇒ **mission pédagogique** : s'assurer de la cohérence transversale (interdisciplinaire) et longitudinale (intra-spécialité) du plan de formation pour les enseignements en physiologie et en biomécanique (en relation avec les enseignements en entraînementsportif).
- ⇒ **mission administrative** : proposer le cas échéant la candidature de vacataire en cas d'enseignement non couvert, suivre leurs interventions, servir de relai d'informations entre l'administration et le vacataire, centraliser et transmettre les demandes d'équipement pédagogique à la direction.

3- **Responsable pédagogique de la licence mention entraînement sportif** : UFR STAPS de Nantes depuis septembre 2003 et du **niveau L3, spécialité « entraînement sportif »** depuis mars 2004.

- ⇒ Les missions associées à cette fonction sont les mêmes que celles décrites précédemment (point 1, p. 82).
- ⇒ Le niveau L3 spécialité « entraînement sportif » fait partie des formations pour lesquelles nous travaillons à l'évaluation en contact avec Mr F. Schoefs, chargé de mission auprès du Président de l'Université de Nantes pour l'Evaluation des formations et de la politique scientifique, et pour laquelle nous disposons d'une enveloppe budgétaire (BQR).

⇒

4- Responsable disciplinaire de la Biomécanique sur le plan de formation : UFR STAPS de Nantes depuis le 1^{er} septembre 2002.

- ⇒ **mission pédagogique** : s'assurer de la cohérence transversale et longitudinale du plan de formation concernant les enseignements d'anatomie, de cinésiologie, de biomécanique, de mécanique et physique appliquée au mouvement et d'analyse biomécanique des gestes sportifs, en relation avec les enseignements de physiologie et d'entraînement
- ⇒ **mission administrative** : proposer le cas échéant la candidature de vacataire en cas d'enseignement non couvert, suivre leurs interventions, servir de relai d'informations entre l'administration et le vacataire, centraliser et transmettre les demandes d'équipement pédagogique à la direction.

5- Responsable du diplôme de la LICENCE option entraînement sportif INSEP / PARIS XII (depuis Juin 2001).

Dans ce cadre, mon premier objectif était de m'assurer de la conformité de la formation Licence INSEP avec les exigences universitaires Paris XII. Par ailleurs, mon rôle consistait à mettre en place le cahier de l'étudiant et d'assurer le bon déroulement de l'année tant du point de vue des enseignants que des étudiants (collaboration avec Mme D. Boutroy).

6- Co-responsable pédagogique du DEUG 2^{ème} année à l'UFR STAPS de Nantes (Février -Septembre 2000).

A ce titre, différentes missions m'étaient confiées : i) répondre aux attentes éventuelles des étudiants et des professeurs; ii) organiser les examens, la collecte et l'affichage des notes; iii) préparer la rentrée DEUG 2 "2000" et, en collaboration avec les responsables des filières "Licences" pour leur permettre de préparer leur rentrée, prévoir l'orientation future des étudiants alors en DEUG 2.

7-3 AUTRES RESPONSABILITES

1- Chargé de communication

Depuis mars 2003, la direction de l'UFR STAPS de Nantes m'a confié un certain nombre d'actions de communication.

Il s'agit notamment :

- ⇒ **De l'organisation de manifestations récurrentes** : Les Portes Ouvertes, la Foire Internationale de Nantes, Formathèque. Dans ce cadre, l'édition d'une plaquette sur l'UFR (en relation avec le service communication de l'Etablissement), de posters, de documents vidéo sur la recherche au laboratoire et sur l'UFR STAPS ... ont été réalisés.

- ⇒ **De missions ponctuelles**. A ce titre notamment deux actions m'ont été confiées :
 - **la coordination de la réalisation d'un Programme d'Action de l'UFR STAPS pour le plan quadriennal 2004-2007**. Ce document de travail permet sur la base du programme d'actions de l'Etablissement d'identifier un certain nombre d'actions et de moyens associés permettant de développer l'UFR. Les principaux volets abordés concernent le développement de la formation, de la recherche et la structuration de l'UFR. Ce programme d'actions a été validé par le conseil d'administration de l'UFR STAPS le 9 septembre 2004 (cf annexe 8-6, p. 155 à 158).

 - **L'organisation de la Conférence des directeurs**. Cette action concernait la mise en oeuvre des moyens et des conditions du bon déroulement de la conférence des directeurs des UFR STAPS français au sein de l'Etablissement. Cette conférence préparée collaboration avec le service administratif de l'UFR s'est déroulée les 24, 25 et 26 Novembre 2004.

2- Coordonateur d'un projet de prescription d'activité physique pour les patients atteints d'obésité (depuis juin 2004): Ce projet initialement développé par A. Guével et J. Prioux, et qui est toujours en cours, est réalisé en collaboration avec le service d'Endocrinologie, Maladies métaboliques et nutrition dirigé par le Pr Krempf au CHU de Nantes. Il est par ailleurs soutenu par la DRDJS des Pays de la Loire et la DDASS de la Loire Atlantique. Il consiste à accueillir les patients volontaires atteints d'obésité et à leur préconiser certains exercices ou certaines activités physiques. Une chargée de mission a été recrutée afin de réaliser cette tâche. Mon rôle dans ce projet a consisté à coordonner le travail de cette chargée de mission dans le cadre du développement d'un réseau de structures sportives susceptibles d'accueillir ces patients et dans la réalisation de documents types (questionnaires, lettres d'information...). Par ailleurs, il a été d'organiser ces consultations au sein de l'UFR STAPS, en relation avec la direction de l'UFR, notamment par la mise à disposition de locaux, de matériels et d'un secrétariat pour les prises de rendez-vous.

8- ANNEXES