
Programme scientifique

Jeune équipe – JE 2438
« Motricité, Interactions, Performance »

Afin de dépasser le cloisonnement scientifique, et d'appréhender la complexité de la motricité humaine en fonction de la multidisciplinarité requise, le programme de recherche du laboratoire « *Motricité, Interactions, Performance* » (JE 2438) se focalise sur l'étude des processus neuromusculaires, moteurs et psychologiques inhérents à l'activité humaine individuelle ou collective et à la performance (sensori)motrice et sportive.

S'appuyant sur l'idée que la performance motrice résulte d'une coalition de contraintes, les thématiques développées visent à répondre à la question de la production et de l'apprentissage du mouvement dans un environnement physique et social par l'analyse et la modélisation des différents mécanismes neuromusculaires, cognitifs et psychologiques (et de leurs interactions) engagés lors des activités physiques et sportives. Aussi les principaux axes de recherche concernent, notamment, *les adaptations de la fonction musculaire à l'exercice* et l'analyse de la *dynamique de l'activité et des processus psychologiques en sport*. Les méthodes d'investigation sont celles de la physiologie et de la biomécanique musculaire, de la psychologie expérimentale et sociale, et de l'ergonomie cognitive. Enfin l'identification, la compréhension et la signification des facteurs responsables de l'optimisation et/ou des limites de la motricité humaine offrent des perspectives d'enrichissement (i) des contenus de formation en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives, et (ii) des conceptions d'aides favorisant la qualité d'intervention des différents acteurs du monde sportif.

En résumé, le programme scientifique de la Jeune Equipe « *Motricité, Interactions, Performance* », s'articule autour de 2 axes de recherche :

Adaptations de la fonction neuromusculaire à l'exercice (aigu et chronique)

- Coordinations musculaires et performance motrice
- Propriétés mécaniques du muscle et production de force
- Plasticité musculaire et contraintes chroniques

Mots clés : Système neuromusculaire, Electromyographie, Stimulation électrique, Echographie, Ergomètre segmentaire, Viscoélasticité, Entraînement, Expertise

Dynamique de l'activité et des processus psychologiques en sport

- Dynamique des coordinations motrices et processus de contrôle
- Dynamique des expériences subjectives et activité motrice

Mots clés : Activité, Complexité, Contraintes, Dynamique, Historicité, Transformation

Axe 1 - Adaptations de la fonction neuromusculaire à l'exercice (aigu et chronique)

Cet axe de recherche s'attache à étudier de la fonction musculaire et ses adaptations au travers de paramètres physiologiques et biomécaniques quantitatifs caractéristiques de la production de force dans différentes conditions (aigues et chroniques) et de la commande nerveuse mise en jeu au cours de l'action motrice. Ce travail sera réalisé chez l'Homme et pourra trouver un développement au travers de modèles animaux : ceci permettrait de dépasser le stade de la physiologie intégrée pour aller vers l'explication fine des adaptations cellulaires à différents modèles d'exercice.

Plus précisément, ce premier axe est constitué de trois thématiques. L'étude des *coordinations musculaires et de leurs incidences sur la performance motrice* s'intéresse à la fois aux sollicitations de la fonction musculaire propre à un geste sportif ou à une action motrice, et à la fatigue musculaire et aux conditions de son expression. Il s'agit, notamment au travers de l'étude des paramètres électromyographiques, de dégager des patrons d'activation intra- et inter-musculaires au cours d'une action motrice, de les modéliser et de tenter de déterminer les facteurs prédictifs de la survenue de la fatigue. D'autre part, l'étude des *propriétés mécaniques des muscles et de leur incidence sur la production de force* s'intéresse à la caractérisation des facteurs musculaires intrinsèques déterminants pour la génération de force et au développement de modèles musculo-squelettiques. Il s'agit, au travers de paramètres biomécaniques musculo-articulaires, de mieux comprendre et de modéliser les parts relatives du générateur de force proprement dit et des systèmes de transmission de la force au squelette en fonction des conditions de réalisation de l'action motrice. Ces deux premières thématiques peuvent particulièrement déboucher sur des études transversales en phase avec le deuxième axe de l'équipe dans le cadre de travaux sur les interactions psychophysiologiques associées à la motricité et à la performance. Enfin, l'étude de la *plasticité musculaire consécutive à diverses modalités de sollicitations chroniques* permet d'appréhender les adaptations neuromusculaires induites par des procédés de développement de la force utilisés dans le domaine sportif et notamment, les effets de la modalité de travail isocinétique sur les propriétés mécaniques et électrophysiologiques des muscles. Globalement, les caractéristiques de la contrainte mécanique imposée sont analysées dans le but d'isoler celles ayant un effet optimal sur les adaptations nerveuses et musculaires visées. La description et la compréhension des sollicitations physiologiques résultantes permettront de développer la performance motrice experte et de valider des procédures adéquates d'entraînement physique.

Coordinations musculaires et performance motrice

Les coordinations musculaires participent à l'efficacité du muscle et conditionnent son rendement. Elles constituent en ce sens un facteur influant sur la performance motrice. Nous étudions les coordinations musculaires du point de vue de l'organisation des interactions inter-musculaires engagées dans la production de force à l'origine du mouvement ou de la motricité du sportif. Il s'agit d'analyser et de comprendre la nature des patrons de recrutement des muscles mobilisés par le système nerveux central dans la réalisation d'une action motrice, de les modéliser et de suivre les modifications induites par certains phénomènes déterminant la performance motrice tels que la fatigue musculaire, ou encore l'effet de l'expertise.

L'exploration des *sollicitations de la fonction musculaire propre à un geste sportif ou à une action motrice* constitue pour notre équipe un préalable à l'étude de déterminants de la performance sportive telles que la fatigue musculaire induite par le maintien ou la répétition d'une contraction musculaire, ou encore à l'étude des effets de méthodes d'entraînement de la fonction musculaire (cf. axe de recherche « [Plasticité musculaire et contraintes chroniques](#) »). La mobilisation du système neuromusculaire comme effecteur du mouvement ou du maintien de la posture nécessite d'être étudiée par le biais d'une caractérisation biomécanique et électromyographique lorsque les connaissances descriptives du système considéré ne sont pas ou insuffisamment connues. La spécialisation sportive et le niveau d'expertise constituent des variables influant sur les formes et niveaux de sollicitation de la fonction musculaire auxquelles nous nous intéressons particulièrement. Par exemple, nous avons décrit les sollicitations des muscles extenseurs et fléchisseurs de la jambe induites par diverses

modalités d'entraînement utilisées en aviron à haut niveau (Guével, Nordez, Boyas, & Cornu, 2005¹). Cette étude a permis de déterminer l'évolution du rapport entre les muscles agonistes et antagonistes croisant l'articulation du genou. De plus, cette étude a permis de démontrer, pour un geste technique qui s'effectue en chaîne fermée, que le niveau d'activité des fléchisseurs est important et qu'ils deviennent fonctionnellement extenseurs pour un angle de genou ouvert. Certains de ces travaux s'accompagnent d'un transfert des connaissances scientifiques émergentes vers des savoirs pratiques et technologiques qui visent à aider l'entraîneur dans sa conception et mise en œuvre de méthodes d'entraînement pertinentes. De plus, ces projets de recherche nous amènent à réaliser des développements technologiques en collaboration avec des structures de recherche spécialisées en « Génie Mécanique »² et/ou des entreprises consacrant une part de leur activité au développement technologique.

La performance motrice est limitée dans la durée, de façon variable selon l'intensité de l'exercice physique, par l'apparition de la fatigue. *L'étude de la fatigue musculaire et des conditions de son expression* retient notre intérêt car elle constitue un facteur limitant en sport, comme dans certaines activités professionnelles ou dans des situations de la vie courante. Notre implication se situe au niveau de la fatigue musculaire, phénomène complexe dépendant des caractéristiques de la tâche motrice exécutée (Guével, Hogrel, & Marini, 2000³), et qui peut être d'origine centrale (nerveuse) ou périphérique (musculaire). La question de la fatigue d'origine attentionnelle (centrale) et/ou d'origine musculaire est également appréhendée dans le champ de la psychologie expérimentale au travers de l'analyse de la dynamique des coordinations motrices et des processus de contrôle (cf. Axe 2, « [Dynamique des coordinations motrices et processus de contrôle](#) »). Positionnant la performance motrice au cœur de nos réflexions, notre démarche s'est centrée à la fois sur les mécanismes physiologique et biomécanique à l'origine de l'apparition de la fatigue musculaire, sur les conditions (caractéristiques de la tâche notamment) dans lesquelles elle survient et enfin sur les mécanismes physiologiques et biomécaniques qui tendraient à la compenser ou à repousser son moment d'apparition (stratégie de recrutement inter et intramusculaire pour l'exécution ou le maintien dans le temps d'une tâche motrice, etc.). Aussi, l'identification et la spécification des niveaux de coordination des patrons de recrutement des muscles engagés lors de toute réalisation motrice permettent une modélisation et une exploration précise des mécanismes centraux et périphériques médiateurs du phénomène de fatigue musculaire (e.g., Heuer & Schulna, 2002⁴). Cette notion renvoie à la question de la production et de la régulation des (de)synchronisations des phénomènes étudiés dans ce projet de recherche : des coordinations inter/intra-musculaires, des coordinations inter-segmentaires (cf Axe 2, « [Dynamique des coordinations motrices et processus de contrôle](#) »), aux coordinations inter-personnelles (stratégies d'influence coopérative et/ou compétitive) (cf Axe 2, « [Dynamique des expériences subjectives et activité motrice](#) »).

Notre approche s'appuie en particulier sur l'utilisation de l'électromyographie de surface (EMGs technique non *invasive* de recueil d'une activité électrique musculaire globale). Les modifications des paramètres temporels et spectraux issus du traitement du signal EMGs interviennent précocement et avant tout signe mécanique. L'analyse de ces modifications permet d'étudier les origines neuromusculaires de la fatigue et les processus physiologiques particulièrement affectés. Le recueil et traitement des signaux EMGs en cours de contraction permet alors de prédire la capacité de travail musculaire de manière plus ou moins pertinente actuellement, selon le régime de contraction associé à l'action motrice étudiée (Maïsetti, Guével, Legros, & Hogrel, 2002a⁵, b⁶). Par exemple, très

¹ Guével, A., Nordez A., Boyas, S., & Cornu, C. (2005). Characterization of muscular requests of leg extensors during codified training sequences of rowing. Soumis à *Journal of Sport Sciences*.

² Laboratoire « GéM – Institut de recherche en génie civile et mécanique » UMR CNRS 6183 – Université de Nantes ; Laboratoire de Mécanique des Fluides UMR CNRS 6598 – Ecole Centrale de Nantes (France)

³ Guével A., Hogrel J.Y., & Marini J.F. (2000). Fatigue of elbow flexors during repeated flexion-extension cycles : effect of movement strategy. *International Journal of Sports Medicine*, 21, 492-498.

⁴ Heuer, H., & Schulna, R. (2002). Phasing of muscle activity during rapid finger oscillations. *Journal of Motor Behavior*, 34, 277-289.

⁵ Maïsetti, O., Guével, A., Legros, P., & Hogrel, J.Y. (2002a). SEMG power spectrum changes during a sustained 50 % Maximum Voluntary Isometric Torque do not depend upon the prior knowledge of the exercise duration. *Journal Electromyography Kinesiology*, 12, 103-109.

peu de travaux se sont intéressés à cette problématique dans le cadre de régime de contraction concentrique. Pourtant ce mode de contraction est mis en jeu dans de nombreuses actions motrices en sport et dans la vie courante.

Nous situons également notre réflexion et nos travaux sur l'influence de la modification des patrons de recrutement des muscles engagés conjointement dans une action motrice qu'elle soit mono- ou pluri-segmentaire. Il s'agit alors de caractériser et modéliser ces patrons de recrutement, leur niveau de coordination et leur modification en situation de fatigue musculaire menée jusqu'à épuisement. Nous avons étudié le maintien de la position de rappel en dériveur solitaire en voile Olympique (Maïsetti, Guével, Iachkine, Legros, & Brisswalter, 2002⁷) et mis en évidence le groupe musculaire (*rectus abdominis*) particulièrement affecté quel que soit le niveau d'expertise lors du maintien de cette posture (Maïsetti, Boyas, & Guével, 2005⁸). Néanmoins, cette technique de recueil EMGs ne peut suffire à elle seule pour décrire les mécanismes de la fatigue neuromusculaire et de son apparition même si les modifications EMGs précèdent les événements mécaniques. Les études EMGs seront donc couplées à l'analyse des modifications mécaniques des muscles considérés (couple de force, viscoélasticité musculo-tendineuse, etc.) induites par la fatigue. Dans ce cadre, nous avons étudié l'évolution de la raideur musculaire localisée au cours d'une épreuve isométrique sous maximale menée jusqu'à épuisement (Nordez, Cornu, Casari, & Catheline, 2005⁹). Cette étude réalisée en collaboration avec deux laboratoires de mécanique¹⁰ et d'acoustique¹¹ a permis de montrer qu'il n'y avait pas de corrélation entre le niveau d'activation EMGs et la raideur musculaire au cours de ce type d'épreuve et que le muscle présentait une raideur plus faible en condition de repos immédiatement après ce protocole de fatigue. Ceci permet d'envisager l'incidence des modifications de propriétés mécaniques associées à ce type d'épreuve (e.g., architecture musculaire, mouvement de la jonction myotendineuse) sur la capacité de production de force parallèlement aux modifications de la commande nerveuse. Par ailleurs, la méthodologie de recueil EMGs trouve ses limites en particulier dans l'étude des mécanismes à l'origine de la survenue de la fatigue musculaire. Ainsi, selon le questionnaire qui émergera à certaines étapes de ce programme, nous pourrions avoir recours à des méthodologies complémentaires telles que la spectroscopie de résonance magnétique (SRM), l'échographie, ou encore la stimulation électrique ou musculaire.

L'une des finalités appliquées de ce projet est la mise au point de technologies novatrices permettant le suivi de la fatigue musculaire localisée en situation d'évaluation et d'entraînement musculaire (dans des conditions standardisées). Ceci permettrait de doter les sportifs, entraîneurs, rééducateurs, thérapeutes d'éléments objectifs pour suivre les effets de l'entraînement et adapter, en améliorant leur efficacité, les procédés d'entraînement et les protocoles de rééducation proposés à des patients. Ceci permettrait d'envisager une meilleure rationalisation des méthodes d'entraînement et de rééducation en relation étroite avec l'optimisation de la performance motrice ou le retour à des capacités fonctionnelles permettant de retrouver une motricité « normale ». Cette perspective d'application sera également investie dans le secteur clinique et en particulier pour l'évaluation fonctionnelle de patients atteints de dégénérescences musculaires (myopathies). Dans ce cadre, le développement de nouveaux outils d'analyse EMGs ou des propriétés mécaniques des muscles sera poursuivi.

⁶ Maïsetti, O., Guével, A., Legros, P., & Hogrel, J.Y. (2002b). Prediction of endurance capacity of quadriceps muscles using surface EMG spectral analysis during voluntary submaximal isometric contraction. *European Journal Applied Physiology*, 87, 509-519.

⁷ Maïsetti, O., Guével, A., Iachkine, P., Legros, P., & Brisswalter, J. (2002). Le maintien de la position de rappel en dériveur solitaire, aspects théoriques et propositions méthodologiques pour l'évaluation de la fatigue musculaire associée. *Science et Sports*, 17, 234-246.

⁸ Maïsetti, O., Boyas, S., & Guével, A. (2005). Specific neuromuscular responses of high skilled laser sailors during a multi-joint posture sustained until exhaustion. Soumis à *International Journal of Sports Medicine*.

⁹ Nordez, A., Cornu, C., Casari, P., & Catheline, S. (2005). Assessment of muscle hardness changes induced by submaximal fatiguing isometric contraction until exhaustion. Soumis au *Journal of Biomechanics*.

¹⁰ Laboratoire « GÉM – Institut de recherche en génie civile et mécanique » UMR CNRS 6183, Université de Nantes (France)

¹¹ Laboratoire Ondes et Acoustique, UMR CNRS 7587, Ecole Supérieure de Physique Chimie Industrielle, Université Paris VII (France)

Propriétés mécaniques du muscle et production de force

La capacité du système musculo-tendineux à produire un niveau de force externe dépend de l'aptitude intrinsèque des fibres musculaires à générer une force spécifique mais également des propriétés viscoélastiques globales du muscle et du tendon transmettant cette force spécifique au squelette (Desplantez, Cornu, & Goubel, 1999¹²). Nous étudions ces déterminants de la production de force en fonction de différentes modalités de contraction afin, par exemple, de caractériser leur importance relative selon les spécialités sportives (Cornu, Nordez, & Bideau, 2005¹³) ainsi que leurs adaptations à l'entraînement. Au delà d'une meilleure connaissance de la physiologie et de la biomécanique du système musculo-tendineux, ces travaux devraient permettre de développer des préconisations en terme d'optimisation de la production de force qu'il s'agisse d'actions à visée thérapeutique, ou de réadaptation fonctionnelle, ou encore de renforcement musculaire dans le cadre de la pratique sportive.

Cette thématique de recherche est à mettre en lien avec certaines hypothèses associées au processus de contrôle engagés dans la dynamique des coordinations motrices (cf Axe 2, « *Dynamique des coordinations motrices et processus de contrôle* »). En effet, il a été démontré que la modification du couplage activation EMGs/cycle de mouvement et/ou des propriétés viscoélastiques des effecteurs jouait un rôle non négligeable dans la production de mouvements efficaces et stables. Dans ce cadre, les mouvements rythmiques biologiques ont été conçus comme des oscillateurs auto-entretenus avec une modélisation de leurs caractéristiques essentielles. En particulier, une fonction de raideur caractérise les propriétés élastiques du système, et une fonction d'amortissement exprimant la façon dont l'énergie est dissipée (pour cause de friction) et activement réinjectée pour entretenir le mouvement oscillatoire (Delignières, Nourrit, Deschamps, Lauriot, & Caillou, 1999¹⁴ ; Deschamps, Nourrit, Caillou, & Delignières, 2004¹⁵). Mise en relation avec l'évolution du coût attentionnel associé au mouvement, la détermination des caractéristiques des fonctions de raideur et d'amortissement est utilisée pour rendre compte des interactions entre les dynamiques centrale et périphérique.

La force musculaire développée dépend spécifiquement de certaines caractéristiques structurales des muscles sollicités. Par exemple, les meilleurs sprinters présentent au niveau des muscles quadriceps des fibres musculaires ayant des longueurs de fascicules plus importantes et des angles de pennation plus faibles. Ces facteurs sont en partie déterminés génétiquement mais peuvent également être modifiés par des sollicitations particulières. En effet, la nature de la contraction musculaire elle-même (le type, l'intensité, le nombre) modifie l'architecture musculaire instantanément mais également à court terme ce qui peut induire des mécanismes de potentialisation de la force ou de fatigue musculaire. De même, l'hypertrophie musculaire induite par certains types d'entraînement peut s'accompagner d'une augmentation de l'angle de pennation permettant d'augmenter le nombre de fibres musculaires rattachées au tendon. Ceci contribuerait à l'amélioration de la force musculaire post-entraînement. L'étude des facteurs musculaires intrinsèques déterminants pour la génération de force vise à caractériser la part relative de ces facteurs (surface de section transversale, longueur des fascicules, angles de pennation, etc.) dans la performance et dans les gains ou déficits de force associés à une sollicitation particulière aiguë ou chronique (différentes modalités de contractions ou d'entraînement, épreuve de fatigue, immobilisation, etc.).

L'architecture musculaire confère également au muscle des propriétés mécaniques intrinsèques qu'il est difficile d'isoler *in vivo* de celles du tendon. Ces propriétés mécaniques musculo-tendineuses dites viscoélastiques permettent de transmettre la force générée aux pièces osseuses et conditionnent donc la production de couple externe développé. La caractérisation de ces propriétés viscoélastiques

¹² Desplantez, A., Cornu, C., & Goubel, F. (1999). Viscous properties of human muscle during contraction. *Journal of Biomechanics*, 32, 555-562.

¹³ Cornu, C., Nordez, A., & Bideau, B. (2005). Shoulder rotators mechanical properties and surface electromyographic activities changes with intensive volleyball practice. Soumis au *British Journal of Sport Medicine*.

¹⁴ Delignières, D., Nourrit, D., Deschamps, T., Lauriot, B., & Caillou, N. (1999). Effects of practise and tasks constraints on stiffness and friction functions in biological movements. *Human Movement Science*, 18, 769-793

¹⁵ Deschamps, T., Nourrit, D., Caillou, N., & Delignières, D. (2004). Influence of a stressing constraint on stiffness and damping functions of ski simulator's platform motion. *Journal of Sport Sciences*, 2, 867-874.

peut être réalisée passivement, c'est à dire sans que les muscles ne soient activés (par exemple dans le cas des étirements), ou bien lorsque que les muscles sont contractés. Il a par ailleurs été montré que ces propriétés étaient sensibles aux sollicitations musculaires aiguës et à diverses modalités d'entraînement (Cornu, Almeida Silveira, & Goubel, 1997¹⁶; Cornu, Maisetti, & Ledoux, 2003¹⁷). De fait, il apparaît indispensable d'étudier les propriétés viscoélastiques musculo-tendineuses impliquées dans la transmission de la force musculaire afin de mieux comprendre les adaptations induites par certaines pratiques (étirements) et disciplines sportives (ou entraînements) et leur part relative dans la production de force globale développée en périphérie. A ce jour, beaucoup d'incertitudes demeurent s'agissant de la modalité d'étirements (statique, dynamique, facilitation proprioceptive neuromusculaire), du nombre de répétitions et/ou de la durée des étirements nécessaires et suffisants permettant d'observer des modifications du comportement musculo-articulaire en terme de souplesse, de raideur, de viscoélasticité ou de production de force par exemple. 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, également parce que les caractéristiques biomécaniques mises en jeu peuvent représenter des déterminants de la performance pour certaines pratiques sportives. Aussi, un travail a déjà été engagé en collaboration avec une équipe internationale¹⁸ afin d'étudier l'influence des modalités de traitement de données sur les adaptations des propriétés viscoélastiques observées (Nordez, Cornu, & Mc Nair, 2005a)¹⁹. Il est par ailleurs probable que les effets des étirements dépendent du degré d'étirement préalables des structures mobilisées. Aussi, une autre étude visant à déterminer l'influence de ce facteur sur les adaptations des propriétés viscoélastiques induites par les étirements a été menée (Nordez, Cornu, & McNair, 2005b)²⁰. Elle montre que, paradoxalement, la part relative du comportement des structures passives dans la production de force est limitée par rapport à celle des facteurs nerveux. Par ailleurs, nous avons montré que les propriétés élastiques du système musculo-tendineux sont corrélées au degré de faiblesse musculaire chez l'Homme atteint de dystrophie musculaire (Cornu, Goubel, & Fardeau, 2001)²¹. Dans ce cadre, ce champ d'investigation pourrait être approfondi par des études sur le modèle animal. En particulier, une collaboration avec l'Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes²² permettrait d'engager ce type de travail chez le chien atteint de dystrophie neuromusculaire. Un des objectifs de ce travail serait d'évaluer l'effet de traitements thérapeutiques cellulaire ou génique sur la récupération de la fonction musculaire.

Le développement et la validation de modèles musculo-squelettiques grâce au couplage de la modélisation du système musculo-squelettique et de l'obtention des paramètres décrivant les caractéristiques mécaniques musculaires externes constituent une thématique complémentaire développée au sein du laboratoire. Son intérêt réside également dans la mise en œuvre de collaborations scientifiques pluridisciplinaires déjà effectives dans le cadre de la co-direction d'un étudiant en thèse avec un enseignant-chercheur du GéM²³. Il s'agit de développer un modèle musculo-squelettique à partir de la connaissance des propriétés biomécaniques des différents éléments constitutifs et de l'alimenter par des données « d'entrées » originales associées à d'autres issues de la littérature. Classiquement, ces données sont issues de l'analyse EMGs de surface des muscles superficiels. Les données architecturales et de caractérisation des propriétés viscoélastiques nous

¹⁶ Cornu, C., Almeida Silveira, I., & Goubel, F. (1997). Influence of plyometric training on the mechanical impedance of the human ankle joint. *European Journal of Applied Physiology*, 76, 282-288.

¹⁷ Cornu, C., Maisetti, O., & Ledoux, I. (2003). Muscle elastic properties during wrist flexion and extension in healthy sedentary subjects and volley-ball players. *International Journal of Sport Medicine*, 24, 277-284.

¹⁸ Neuromuscular research unit, School of Physiotherapy, Auckland University of Technology, Private Bag 92006, Auckland (New Zealand).

¹⁹ Nordez, A., Cornu, C., & Mc Nair, P. (2005). Acute effects of static stretching on passive viscoelastic properties and isokinetic flexion of the knee joint. En revision dans *Clinical Biomechanics*.

²⁰ Nordez, A., Cornu, C., & Mc Nair (2005). Acute effects of a short static stretching protocol on strength production capacities during isokinetic knee flexions and extensions. Soumis à *European Journal of Applied Physiology*.

²¹ Cornu, C., Goubel, F., & Fardeau, F. (2001). Muscle and joint properties during elbow flexion in Duchenne muscular dystrophy. *Journal of Physiology (London)*, 533, 605-616.

²² Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes, Unité d'Anatomie Pathologique, UMR 703 INRA/ENVN.

²³ Laboratoire « GéM – Institut de recherche en génie civile et mécanique » UMR CNRS 6183, Université de Nantes (France)

permettent d'envisager d'autres modalités d'entrées pour ce type de modèle. La collaboration poursuivie avec le laboratoire Ondes et Acoustique (ESPCI), nous permettra d'utiliser des paramètres de raideur musculaire déterminée à l'aide de l'élastographie impulsométrique (Gennisson, Cornu, Catheline, Fink, & Portero, 2005²⁴) qui pourrait être corrélée au niveau de force musculaire (Nordez, Cornu, Casari, & Catheline, 2005). Cette méthode devrait permettre de caractériser également le comportement des muscles les plus profonds. Notre objectif est de comprendre le fonctionnement du système neuromusculaire et donc de mieux appréhender les mécanismes adaptatifs résultants de sollicitations particulières (entraînements, pathologie, rééducation, etc.) 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 spécifiques, développement d'un modèle mécanique associé, et application de ce modèle à une situation de recherche spécifique. De fait, cet axe ouvre des perspectives de travaux multiples tels que par exemple, la simulation du comportement d'un groupe musculaire soumis à une activité particulière (e.g., hypoactivité, hyperactivité, fatigue neuromusculaire) dans le cadre de protocoles de rééducation ou de programmes de renforcement musculaire ou bien encore dans le cadre de l'implémentation de nouveaux protocoles expérimentaux permettant de réaliser *in vivo* des tests se rapprochant au mieux des conditions expérimentales sur muscle isolé.

Plasticité musculaire et contraintes chroniques

L'acte moteur est particulièrement dépendant de la contraction musculaire et par conséquent du fonctionnement du système neuromusculaire. Celui-ci possède des caractéristiques physiologiques et biomécaniques évolutives (i.e. plasticité musculaire), résultat de modifications structurales et fonctionnelles des cellules musculaires et des cellules associées d'une part et d'adaptations nerveuses d'autre part. Nous étudions les *adaptations neuromusculaires induites par des procédés de développement de la force utilisés dans le domaine sportif*.

Les modifications structurales sont déterminées au travers de paramètres architecturaux (e.g., longueur des fascicules, angle de pennation) décrits dans la partie relative à la thématique « *Propriétés mécaniques du muscle et production de force* » et pour lesquels nous possédons les méthodes d'investigation (i.e., échographie musculaire). Par ailleurs, les adaptations structurales résultent de modifications de l'expression protéique induites par des contraintes mécaniques appliquées à ces structures. Ainsi, nous pourrions étendre nos investigations à l'étude des modifications protéiques et moléculaires consécutives à l'entraînement. Ceci nécessite des analyses histologiques, biochimiques et moléculaires de fragments de tissu musculaire. De tels travaux pourront être réalisés dans le cadre de collaborations interne²⁵ et externe²⁶ à l'Etablissement.

Les adaptations nerveuses sont étudiées au travers de l'analyse de l'évolution des signaux EMGs tel qu'il y est fait référence dans la partie « *Coordinations musculaires et performance motrice* ».

Notre réflexion porte actuellement sur *l'étude des effets de la modalité de travail « isocinétique » sur les propriétés mécaniques du muscle et leurs évolutions*. La modalité d'exercice musculaire visant à imposer une contrainte mécanique en dynamique à vitesse constante (« isocinétisme ») est particulièrement utilisée dans le domaine de la rééducation fonctionnelle. La caractéristique principale de ce type de condition d'entraînement consiste à imposer au groupe musculaire mobilisé une contraction maximale sur tout le décours du mouvement segmentaire. Cette contrainte mécanique particulière est une condition que l'on ne rencontre pas dans les situations de mobilisation d'une charge constante, que l'on nomme modalité « isotonique ». Peu d'études se sont attachées à comparer de manière satisfaisante les effets, sur les propriétés mécaniques des muscles et leur commande, des modes d'entraînement concentrique isocinétique et concentrique isotonique. En

²⁴ Gennisson, J-L., Cornu, C., Catheline, S., Fink, F., & Portero, P. (2005). Human muscle hardness assessment during incremental isometric contraction using the transient elastography technique. *Journal of Biomechanics*, 38, 1543-1550.

²⁵ UMR CNRS 6204, Unité de Biotechnologie, Biocatalyse et Biorégulation, Pr. Fontaine Pérus, Université de Nantes (France)

²⁶ UMR CNRS 6600, Génie Biologique, Université de Technologie de Compiègne, Pr. Goubel (France)

revanche, ces deux modes d'entraînement ont été largement étudiés de manière isolée. Par ailleurs, les études ayant tenté de comparer un entraînement isocinétique et un entraînement isotonique présentent des résultats très différents et contradictoires. Les recherches les plus récentes tendent à montrer une supériorité en terme de gain de force de l'entraînement isotonique sur l'entraînement isocinétique associée à une plus grande hypertrophie musculaire, alors que des travaux plus anciens ont obtenu des résultats opposés. Néanmoins, le travail total réalisé au cours des deux entraînements n'a jamais été égalisé ce qui pourrait expliquer les différences d'adaptation entre les deux modes d'entraînement. Dans ces conditions, il paraît difficile de conclure à la supériorité d'un type d'entraînement sur l'autre pour induire des gains de force. C'est pourquoi, nous nous sommes attachés à mettre en œuvre et valider une méthodologie (Remaud, Cornu, & Guével, 2005²⁷) permettant d'égaliser le travail externe et la vitesse de mouvement lors des actions motrices prescrites en mode isotonique et isocinétique, afin d'éviter l'écueil souligné ci-avant. De plus, les adaptations des propriétés mécaniques du muscle et des caractéristiques électrophysiologiques consécutives à ces procédures d'entraînement comparées ont été très partiellement étudiées. Enfin, les mécanismes physiologiques à l'origine des adaptations fonctionnelles rapportées restent à mettre en évidence. Aussi, un travail visant à étudier les effets spécifiques d'un entraînement de type isotonique par rapport à ceux induits par un entraînement isocinétique est en cours de réalisation. Il s'agit notamment de quantifier les adaptations relatives en termes d'inhibitions nerveuses, de co-activations potentielles, et leurs spécificités biomécaniques en considérant notamment les relations couples de force – angles articulaires et couple de force – vitesse. Les perspectives de ce projet nous amèneront à étudier (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.

Enfin, les méthodes d'entraînement ou de rééducation imposées au sportif ou au patient visent l'amélioration du rendement ou de l'efficacité de la fonction musculaire et plus globalement de la performance motrice. Nombreuses sont celles qui n'ont pas fait l'objet d'une validation expérimentale. Notre objectif à terme serait alors de répondre à cette interrogation et de préciser les processus physiologiques explicatifs impliqués dans le remodelage protéique et/ou nerveux. Par exemple, nous nous sommes particulièrement intéressés récemment à la comparaison des effets de deux modalités d'entraînement de la force (endurance de force vs puissance musculaire) sur les caractéristiques biomécaniques des rameurs après une période de six semaines d'entraînement. Les principaux résultats montrent une plus grande efficacité de l'entraînement en puissance sur l'amélioration de la production de force des rameurs sans altération de leur capacité d'endurance de force (Remaud, Nordez, Yquel, Verbecke, & Cornu 2005²⁸).

A terme, nos travaux devraient permettre d'apporter des réponses et solutions pratiques aux milieux sportif et médical dans le cadre du renforcement musculaire et de la réadaptation puisque dans ce cas, l'exercice musculaire constitue une contre mesure efficace et classiquement utilisée.

²⁷ Remaud, A., Cornu, C., & Guével, G. (2005, sous presse). Methodological approach for the comparison of dynamic contractions: influences on the neuromuscular system. *Journal of Athletic Training*.

²⁸ Remaud, A., Nordez, A., Yquel, R., Verbecke, X., & Cornu, C. (2005). Effets de deux méthodes de développement de la force sur les capacités de production de force de rameurs de haut-niveau. *Actes du Ier Congrès Sport et Recherche en Pays de la Loire, Nantes, 23-24 mars 2005*.

Axe 2 - Dynamique de l'activité et des processus psychologiques en sport

Cet axe de recherche vise la compréhension et la caractérisation de l'historicité des interrelations entre l'individu et son environnement physique et social, en positionnant l'étude dynamique des différents processus inhérents à ces interactions comme thématique centrale. En effet, dans de nombreuses activités quotidiennes, sportives ou artistiques, le pratiquant doit faire face simultanément à diverses contraintes pesant sur le fonctionnement autonome et interactif de multiples systèmes cognitifs (attention, mémoire, information, etc.), psychologiques (perception de la situation, personnalité, connaissances, etc.) et biologiques (métabolique, neuromusculaire, etc.). Aussi, renvoyant à l'ensemble des processus mis en jeu pour répondre aux exigences de la situation, l'activité de l'individu et ses transformations au cours du temps peuvent être appréhendées à différents niveaux d'organisation, et sur différentes échelles temporelles, permettant la mise en évidence des propriétés macro- et microscopiques des systèmes étudiés (par exemple le niveau des coordinations motrices produites par le système neuro-musculo-squelettique ou encore les perceptions individuelles conscientes, telles que le sentiment de compétence, émanant de la dynamique du Soi).

En outre, la causalité circulaire entre les différents niveaux d'organisation de ces systèmes ne pose aucune priorité ontologique d'un niveau d'organisation sur l'autre dans la compréhension des processus par lesquels se forme, se stabilise ou se transforme l'interaction acteur-environnement. Ce positionnement nous permet d'envisager dans un second temps *l'étude des processus d'influence circulaire et interactive entre différents systèmes* (systèmes sensoriels et moteurs, spécifiques à la performance motrice, et les systèmes psychologiques et cognitifs, en relation plus directe avec l'(es) individu(s) et leur activité). Par exemple, considérant les activités duelles et/ou collectives, telles que les sports de raquette ou encore l'aviron, en tant que systèmes dynamiques auto-organisés, la performance issue de l'activité des protagonistes n'est plus analysée dans une logique de sommation des comportements élémentaires des joueurs impliqués, mais comme un système complexe composé de sportifs en interaction, coopérative ou concurrentielle. Aussi, il s'agit d'analyser les effets de contraintes cognitives et des conditions de pratique (apprentissage, entraînement, compétition, etc.) sur la dynamique des coordinations motrices complexes, conjointement à la dynamique du bien-être psychologique, la synchronisation cognitive et le partage de connaissances des acteurs.

Dynamique des coordinations motrices et processus de contrôle

En plaçant résolument le comportement (moteur) humain au centre d'un système de contraintes susceptibles de limiter ses formes d'organisation et ses configurations dynamiques possibles, le premier objectif de ce projet est de mettre en évidence *les principes et les lois de contrôle régissant l'acquisition, le contrôle et la régulation des habiletés motrices complexes telles que celles rencontrées dans le domaine du sport et des activités physiques*. Au travers de l'analyse des coordinations motrices inter-segmentaires ou inter-individuelles (aviron, natation synchronisée, etc.), il s'agit, à ce niveau d'organisation, de mettre en évidence des principes et des régularités de fonctionnement autonome du système étudié.

Dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires, l'étude d'indices macroscopiques capturant les relations spatio-temporelles entre les composants du système d'action (i.e. segments, articulations, etc.), permet de définir les patrons de coordination en fonction du rôle fonctionnel des groupes musculaires impliqués (contraintes neuromusculaires) ou encore en fonction de la direction de mouvement (contraintes directionnelles). Face à cette coalition de contraintes (mécaniques, énergétiques, neurales, attentionnelles, cognitives, etc.), il a été largement démontré que l'organisation d'un mouvement flexible et finalisé résulte de l'agencement optimal de l'ensemble des degrés de liberté du système neuro-squeletto-musculaire effecteur. La compréhension du processus d'assemblage des degrés de liberté moteurs, perceptifs, cognitifs et psychologiques, constitue en conséquence l'un des axes d'investigation privilégiés des membres de l'équipe en relation avec ce premier objectif²⁹.

Dans cette même perspective, les relations entre la stabilité des coordinations motrices et certains processus psychologiques et physiologiques sont appréhendées en distinguant d'une part, les processus cognitifs centraux comme *l'attention*, et d'autre part, les processus périphériques tels que la gestion *des ressources musculaires*. Les travaux actuels sur le coût *en attention*, associé à l'activité du système nerveux central (SNC) nécessaire à la production motrice et son efficacité, montrent l'intérêt majeur de cette orientation d'étude.

²⁹ e.g., numéro spécial en 2004 de *Journal of Motor Behavior* (volume 36) consacré à l'importance des facteurs perceptivo-cognitifs dans le contrôle moteur.

Par exemple, il a été largement démontré que le fonctionnement efficient (*vs.* les dysfonctionnements) des processus de coordination et de contrôle (inter-segmentaires et inter-personnels), essentiels à la flexibilité du comportement humain, dépendait (positivement ou négativement) de leur interaction avec le fonctionnement d'entités cognitives telles que l'attention ou encore la mémoire (*e.g.*, Riley, Baker, Schmit, & Weaver, 2005³⁰). Ainsi, d'un point de vue plus structurel, il s'agit d'identifier et de décrire la nature des liens existants entre le contrôle de la motricité et le fonctionnement cognitif de nature attentionnelle, en s'appuyant sur la comparaison de sujets sains et de malades parkinsoniens (Morris, Ianseck, Smithson, & Huxham, 2000³¹). En effet, associée à des perturbations au niveau du fonctionnement cognitif (Thomas-Ollivier, Reymann, Schüick, Lieury, & Allain, 1999³²), la maladie de Parkinson se caractérise par des symptômes moteurs (tremblement, akinésie et rigidité) non sans conséquence sur le contrôle et l'apprentissage moteur (*e.g.*, Swinnen, Steyvers, Van den Bergh, & Stelmach, 2000³³). Aussi, des travaux menés en collaboration avec le Groupe de Recherche en Neurochirurgie Fonctionnelle du CHR de Rennes³⁴ se focalisent sur l'influence d'une stimulation cérébrale profonde du noyau sous-thalamique sur le traitement attentionnel sélectif d'une information émotionnelle. En effet, des études actuelles montrent une nette amélioration des symptômes moteurs suite à une stimulation cérébrale profonde de certaines zones du cerveau impliquées dans le contrôle de la motricité comme le noyau sous-thalamique. Ce niveau d'analyse devrait permettre d'étoffer notre connaissance sur les processus attentionnels et leur dynamique, nécessaires, entre autres, aux processus de contrôle de la motricité humaine.

En outre, l'investigation des facteurs de flexibilité comportementale a mis en évidence l'influence de la mobilisation et de la gestion des ressources attentionnelles sur la stabilité des réalisations motrices, et sur les processus d'acquisition et d'optimisation des coordinations inter-segmentaires (relations spatio-temporelles entre plusieurs segments, articulations, systèmes, etc.). Plus précisément, il ressort de ces travaux que la stabilité temporelle des patrons de coordination constitue la dimension significative essentielle à la modélisation des structures synergétiques et de leurs propriétés biomécaniques et neuromusculaires. En lien avec certaines hypothèses soulevées plus précisément dans l'axe de recherche « *Coordinations musculaires et performance motrice* », la littérature montre globalement que des facteurs tels que le degré de co-activation des muscles homologues, les patrons de recrutement des muscles ou les changements dans la force musculaire jouent un rôle important dans la dynamique du couplage inter-segmentaire nécessaire au mouvement. Par exemple, des modifications des synergies musculaires de par l'apprentissage ont été observées, preuve d'adaptations plus efficaces tant au niveau périphérique qu'au niveau central (*e.g.*, Carson & Riek, 2001³⁵). Aussi ces différentes variables, telle que la production de force des muscles engagés dans une tâche motrice, se doivent d'être intégrées, au moins pour une part, au niveau central, renforçant l'importance de nouveaux modèles des coordinations inter-segmentaires (Ridderikhoff, Peper, Carson, & Beek, 2004³⁶). Ce dernier objectif nous amène à considérer, d'un point de vue théorique et méthodologique, la perte de stabilité comme un indice pertinent pour la conception, la connaissance et l'étude spécifique et complémentaire des différents niveaux d'organisation impliqués dans le couplage acteur-environnement.

Dans cette logique, des études en cours ont pour objectifs de capturer la dynamique des processus centraux informationnels et attentionnels, et d'appréhender la possible contribution interactive des ressources musculaires périphériques sur la stabilité du comportement moteur. Au regard de l'analyse de la quantité d'activité électrique musculaire (*via* l'EMGs) et la co-variation entre la stabilité motrice et le coût attentionnel, l'augmentation de la variabilité des patrons de coordination serait davantage liée à une dégradation de la dynamique centrale qu'à des sollicitations périphériques plus accrues (Murian &

³⁰ Riley, M. A., Baker, A. A., Schmit, J. M., & Weaver, E. (2005). Effects of visual and auditory short-term memory tasks on the spatiotemporal dynamics and variability of postural sway. *Journal of Motor Behavior*, 37, 311-324.

³¹ Morris, M., Ianseck, R., Smithson, F., & Huxham, F. (2000). Postural instability in Parkinson's disease: a comparison with and without a concurrent task. *Gait and Posture*, 12, 2005-216.

³² Thomas-Ollivier V., Reymann J.M., Schüick S., Lieury A., & Allain A., (1999). Procedural memory in recent-onset Parkinson's disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 10, 172-180.

³³ Swinnen, S. P., Steyvers, M., Van Den Bergh, L., & Stelmach, G. E. (2000). Motor learning and Parkinson's disease : refinement of within-limb and between-limb coordination as a result of practice. *Behavioural Brain Research*, 111, 45-49.

³⁴ Groupe de Recherche en Neurochirurgie Fonctionnelle - Service de Neurologie CHR Pontchaillou. Rennes.

³⁵ Carson, R. G., & Riek, S. (2001). Changes in muscle recruitment patterns during skill acquisition. *Experimental Brain Research*, 138, 71-87.

³⁶ Ridderikhoff, A., Peper, C. E., Carson, R. G., & Beek, P. J. (2004). Effector dynamics of rhythmic wrist activity and its implications for (modelling) bimanual coordination. *Human Movement Science*, 23, 285-313.

Deschamps, 2005a,³⁷ 2005b³⁸; Murian, Deschamps, & Bardy, 2005³⁹; Murian & Deschamps, 2005c⁴⁰). Ces premiers résultats nous amènent à reconsidérer le rôle et l'analyse des coordinations musculaires au niveau des effecteurs (e.g., axe 1, « *Coordinations musculaires et performance motrice* ») dans la modélisation et la compréhension de la performance motrice (Murian & Deschamps, 2005d⁴¹).

Ce niveau d'analyse (i.e. le comportement moteur) se prête également à l'étude de comportements collectifs. En effet, les différentes signatures des patrons de coordination inter-segmentaire (couplages, attracteurs, transitions abruptes, fluctuations critiques, relations stabilité-coût attentionnel, etc.) ont aussi été observées dans des tâches de mouvements rythmiques visuellement coordonnés entre deux personnes, accréditant l'hypothèse d'un processus organisateur analogue de la coordination, que celle-ci implique un ou plusieurs systèmes nerveux couplés par des flux informationnels (perceptif, auditif, haptique, etc.) (e.g., *Temprado & Laurent, 2004*⁴²). En outre, les récents résultats expérimentaux et les modèles prédictifs de la stabilité comportementale issue de la force de couplage entre différents composants d'un système ont aussi démontré l'importance de la contrainte mécanique (*Schmidt, Bienvenu, Fitzpatrick, & Amazeen, 1998*⁴³) capturant la différence entre les fréquences propres des oscillateurs impliqués dans la coordination. Cette capture rend possible la détermination de la force de couplage entre les effecteurs impliqués, et ce selon différentes configurations du système de contraintes. Aussi, au delà de la compréhension de comportements individuels isolés, la problématique des coordinations inter-personnelles (relations spatio-temporelles entre deux ou plusieurs personnes) constitue un des enjeux majeurs de la connaissance des conditions de la performance sportive. Notre objectif à ce niveau d'analyse (i.e. organisation des degrés de liberté moteurs et perceptifs) est *de se focaliser d'une part sur la nature, la configuration et la disponibilité des flux et couplages informationnels mis en jeu pour répondre aux exigences coopératives et/ou compétitives entre les individus et d'autre part, de valider la mesure de la force de couplage issue des modèles mathématiques et prédictifs de la stabilité des coordinations motrices*. Il s'agit en particulier d'appréhender les processus de contrôle, de propagation (positive ou négative) et de régulation des informations véhiculées par l'environnement et/ou les différents acteurs de la situation (apprentissage ou optimisation), et leurs effets sur la stabilité comportementale et l'efficacité énergétique associée.

Ce dernier point nous permet d'interroger plus directement la place et le rôle des variables perceptives et sensorielles sur les différents liens possibles entre *information, énergie* et *stabilité* des patrons de coordination : de la spécification de la dépense énergétique par l'information véhiculée par la perception de la situation résulterait l'action motrice stable et efficace. Par exemple, des études menées en collaboration avec le Centre de Recherche en Sciences du Sport de l'Université de Paris XI Orsay⁴⁴ se focalisent actuellement sur le phénomène de transition marche/course classiquement observé dans la locomotion humaine. Il s'agit d'identifier les conséquences de la manipulation de l'information *via* le flux optique à la fois au niveau de la dépense énergétique et de la stabilité des patrons de locomotion. Pour cela, les sujets sont placés face à un flux optique ajouté *visuellement* plus rapide ou plus lent par rapport à la vitesse de déplacement du sujet sur le tapis roulant. Dans cette même logique, l'étude de relations entre la dépense énergétique et l'organisation motrice est menée au travers de l'effet de l'expertise en marche à pied sur la transition marche/course : l'expertise modulerait la dynamique intrinsèque du système locomoteur, en modifiant le nombre et la stabilité des attracteurs (i.e. marche « normale », marche sportive et course).

³⁷ Murian, A., & Deschamps, T. (2005a). Contribution interactive des processus centraux (attentionnels) et périphériques (solicitations musculaires) sur la stabilité des patrons de coordination bimanuelle. *Actes du XIème Congrès International des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives*, Paris, 26-28 octobre 2005.

³⁸ Murian, A., & Deschamps, T. (2005b). Central vs peripheral dynamics interactions on coordination stability: First steps to new models. Poster Session Abstracts. *Psychophysiology*, 42, S30-S134.

³⁹ Murian, A., Deschamps, T., & Bardy, B. G. (2005). Is the degradation with time of bimanual coordination only supported by the central dynamics? Soumis à *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.

⁴⁰ Murian, A., & Deschamps, T. (2005c). Muscular loading increases the attentional demands in a bimanual coordination task. Soumis à *Journal of Motor Behavior*.

⁴¹ Murian, A., & Deschamps, T. (2005d). Muscular and attentional contribution to bimanual coordination. Poster Session Abstracts. *Psychophysiology*, 42, S30-S134.

⁴² Temprado, J-J, & Laurent, M. (2004). Attentional load associated with performing and stabilizing a between-persons coordination of rhythmic limb movements. *Acta Psychologica*, 115, 1-16.

⁴³ Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A., & Amazeen, P. G. (1998). A comparison on intra- and interpersonal interlimb coordination : coordination breakdowns and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24, 884-900.

⁴⁴ UPRES EA 1609, Centre de Recherche en Sciences du Sport, Université de Paris XI Orsay (France)

Dynamique des expériences subjectives et activité motrice

Au-delà de leurs intérêts pour l'analyse de la dynamique des coordinations motrices, les progrès dans la connaissance des systèmes complexes et autonomes depuis une quinzaine d'années ont aussi renouvelé les perspectives d'étude d'autres phénomènes psychologiques abordés alors dans une perspective holistique et dynamique. Ce programme de recherche vise l'analyse de la dynamique globale de l'activité (individuelle et/ou collective) et de ses transformations à un niveau d'organisation de la cognition permettant de rendre compte de sa dimension phénoménologique (c'est-à-dire, donnant lieu à une expérience significative pour l'acteur). Cette orientation, qui constitue le deuxième objectif de ce programme, fera l'objet de travaux portant sur deux niveaux d'analyse complémentaires. Il s'agira, d'une part, de caractériser la dynamique du système sujet/environnement (e.g., sportifs/situations compétitives, élèves/cours d'EPS) en tant que totalité organisée et génératrice de significations pour les acteurs, et d'autre part, de décrire la dynamique des expériences subjectives (ou construits psychologiques) caractérisant, dans ce même système, les processus d'adaptation psychologique individuels.

Ces orientations de recherche s'appuient sur un faisceau d'hypothèses théoriques concernant les propriétés d'auto-organisation et d'autonomie des systèmes vivants. Une partie de ces hypothèses concrétise le paradigme de l'enaction (Varela, 1989⁴⁵) en ce qui concerne l'analyse des pratiques humaines quotidiennes, grâce à la notion de conscience préreflexive, interprétée comme effet de surface des interactions asymétriques entre l'acteur et son environnement (y compris social) à un instant t (Theureau, 1992⁴⁶, 2004⁴⁷). La conscience préreflexive est conçue dans ce cadre comme une propriété émergente du couplage structurel acteur-environnement, qu'il est possible de documenter et d'analyser empiriquement grâce à la prise en compte des phénomènes qui sont montrables, racontables, et commentables par l'acteur au cours de son activité (actions, communications, focalisations, interprétations et sentiments significatifs pour lui), et qui constituent son « cours d'action ». De façon congruente avec cette approche, les hypothèses théoriques liées au paradigme des systèmes dynamiques non linéaires sont également fécondes pour appréhender l'activité (psychologique) individuelle (Vallacher & Nowak, 1997⁴⁸). Dans cette optique, le Soi (ou l'estime globale de soi – dimension consciente du sujet), est alors considéré comme une propriété émergente d'un système complexe dynamique (Delignières, Fortes, & Ninot, 2004⁴⁹) et dont l'état à l'instant t dépend des expériences vécues par le sujet (significations, importances).

Dans la perspective ergonomique du « cours d'action » (Theureau, 1992, 2004), l'activité individuelle est abordée en termes de « cours d'action individuel », accordant une place centrale à l'analyse de l'histoire de la conscience préreflexive de l'acteur au cours de son activité. L'activité collective (ou « cours d'action collectif ») est quand à elle conçue comme émergeant de l'articulation dynamique de « cours d'action individuels », produisant des configurations typiques d'activité collective plus ou moins stables et récurrentes au cours du temps, en relation avec les contraintes vis-à-vis desquelles elles s'organisent. Cette perspective de recherche vise à construire des modèles qualitatifs de l'activité individuelle et collective, soit au niveau de l'organisation globale du cours d'action (structures significatives de l'activité), soit au niveau de son organisation locale (phénomènes intentionnels, perceptifs et de mobilisation/construction de connaissances au cours de l'activité). Deux objets d'étude sont privilégiés dans ce programme : *la dynamique des relations de coopération et de concurrence dans les tâches sportives coopératives et compétitives* (en contexte fédéral, en milieu scolaire, etc.), et *la dynamique « participative » (ou socialement distribuée) des apprentissages*, en éducation physique et sportive.

Les travaux que nous développons actuellement relativement à ces deux objets d'étude font apparaître leur fécondité, tant du point de vue scientifique que de celui des orientations pour la conception de situations sportives qu'ils sont susceptibles d'inspirer. Par exemple, l'analyse de l'activité de pratiquants experts dans des situations sportives coopératives et/ou compétitives (en voile Olympique et en tennis de table) a mis en évidence que les formes typiques d'activité collective dans ces situations sont relativement indépendantes de la structure (coopérative vs. compétitive) des tâches sportives, et qu'elles mettent en jeu des processus interactifs analogues, tels que l'élaboration par les protagonistes d'un modèle du partenaire (ou de l'adversaire), ou la construction d'une intelligibilité mutuelle, qui expliquent la dynamique des ajustements

⁴⁵ Varela, F.J. (1989). *Autonomie et connaissance*. Paris : Le Seuil.

⁴⁶ Theureau, J. (1992). *Le cours d'action. Analyse sémio-logique*. Berne : Peter Lang.

⁴⁷ Theureau (2004). *Le cours d'action. Méthode élémentaire*. Toulouse : Octarès.

⁴⁸ Vallacher, R.R. & Nowak, A. (1997). The emergence of Dynamical Social Psychology. *Psychological Inquiry*, 8, 73-99.

⁴⁹ Delignières, D., Fortes, M., & Ninot, G. (2004). The fractal dynamics of self-esteem and physical self. *Non-Linear Dynamics in Psychology and Life Science*, 8, 479-510.

récioproques et des fluctuations des formes de collaboration, ainsi que les modalités paradoxales de gestion des relations de coopération et de concurrence dans ces situations (Saury, 2001⁵⁰ ; Sève, Saury, Leblanc, & Durand, 2005⁵¹). L'étude de l'activité d'élèves dans des situations scolaires en éducation physique, tout en renforçant ces résultats, a montré que la dynamique de l'activité individuelle et collective des élèves était indissociable de l'inscription de cette activité dans une communauté de pratique spécifique et dans son histoire (marquée par un usage collectif d'artefacts scolaires, la construction de normes collectives, etc.), et ne pouvait être comprise du seul point de vue de l'adaptation des élèves aux tâches motrices prescrites par l'enseignant (Rossard & Saury, soumis⁵² ; Saury, Huet, & Rossard, 2005⁵³). Les études envisagées dans les années à venir visent à approfondir ces deux orientations de recherche, sur différents axes : la modélisation des formes typiques de gestion des relations de coopération et de concurrence en relation avec les différentes contraintes inhérentes aux tâches sportives, et avec le niveau d'expertise ; la description de « trajectoires de participation » et de « configurations d'activités » accompagnant l'activité et l'apprentissage en éducation physique ; le rôle des artefacts cognitifs et du partage de ressources situationnelles dans la coordination des activités dans les situations sportives.

Dans cette même perspective qui consiste à accorder une place centrale aux expériences subjectives et aux contraintes vis-à-vis desquelles elles s'organisent, il est envisagé de *déterminer les processus qui sous-tendent le fonctionnement « adaptatif ou pathologique » de la personne dans son milieu écologique*. Les adaptations ou dysfonctionnements psychologiques seront alors appréhendés à partir de l'analyse de construits psychologiques tels que l'estime de soi. Les travaux que nous avons menés jusqu' alors ont mis en évidence que la dynamique du Soi, pour des personnes adultes, est sous-tendue par l'association des processus de préservation et d'adaptation, fonctionnement qui reflète un *ajustement dynamique* (Fortes, Delignières, & Ninot, 2004⁵⁴), *de nature fractale* (Delignières, Fortes, & Ninot, 2004) témoignant d'une bonne santé psychologique. Cependant ces conclusions se limitent au fonctionnement du Soi pour des personnes adultes dites « saines ». Les travaux que nous développons actuellement visent la mise à l'épreuve de la robustesse de cette hypothèse en s'intéressant au fonctionnement psychologique de personnes pour lesquelles l'adaptation au monde environnant est constamment menacée. Les situations exigeant un engagement corporel non trivial pour les sujets, et/ou étant à la fois incertaines et porteuses d'enjeux subjectifs importants pour eux, comme les situations sportives, fournissent des terrains d'étude particulièrement intéressants à ce titre. Par exemple, l'étude de la dynamique du Soi pour des sportifs de haut niveau, ou pour des personnes présentant des maladies chroniques altérant leurs capacités physiques permet de comprendre comment sont vécus les événements subjectivement importants (e.g., compétitions, séjours d'hospitalisation de semaine), comment sont appréhendées les adaptations quotidiennes et par là-même d'identifier les signes précurseurs de pathologies pouvant survenir (dépression, addiction). Cette perspective est engagée au travers d'une étude portant sur des personnes présentant une forte obésité et accueillies en séjours d'hospitalisation de semaine au CHU Hôtel Dieu⁵⁵ de Nantes.

La poursuite de travaux théoriques portant sur la compréhension de ce modèle à un niveau individuel et temporel constituerait le prélude à une nouvelle vision du système qu'est le Soi, n'excluant en rien l'étude de ce système à un niveau collectif. Il serait alors intéressant d'envisager l'étude des *processus d'influences existant entre deux personnes dont les conditions environnementales particulières ou spécifiques qui les réunissent* (e.g., aviron – coopérations/compétitions) *pourraient engendrer des effets de contagion entre deux systèmes psychologiques*. L'enjeu majeur serait alors de déterminer la présence de telles diffusions, de caractériser les processus qui sous-tendent ces effets de contagion et d'en préciser l'implication dans le domaine de la performance motrice.

⁵⁰ Saury, J. (2001). Activité collective et décision tactique en voile. *Actes du IX^{ème} Congrès International de l'ACAPS*. Valence, France.

⁵¹ Sève, C., Saury, J., Leblanc, S., & Durand, M. (2005, sous presse). Course of Action in Table Tennis : A Qualitative Analysis of Knowledge used by Three Elite Players During Typical Match Situations. *European Review of Applied Psychology*.

⁵² Rossard, C., & Saury, J. (2005). Coopération et compétition du point de vue de l'activité des élèves dans des tâches d'apprentissage en Education Physique et Sportive. Soumis à *Avante*.

⁵³ Saury, J., Huet, B., & Rossard, C. (2005). *Les fiches d'observation comme artefacts cognitifs dans la dynamique de l'activité de collégiens en éducation physique et sportive*. Actes du XI^{ème} Congrès International de l'ACAPS. Paris, France.

⁵⁴ Fortes, M., Delignières, D. & Ninot, G. (2004). The dynamics of self-esteem and physical self: between preservation and adaptation. *Quality and Quantity: International Journal of Methodology*, 00, 1-17.

⁵⁵ Service « Endocrinologie, Maladies Métaboliques et Nutrition », Pr. Krempf, CHU de Nantes, Université de Nantes (France)