



APPEL À PROJETS RECHERCHE

REGION DES PAYS DE LA LOIRE

OPERF2A

Titre du projet :

**Optimisation de la Performance et interactions
homme – machine en sport Automobile et en
Aviron**

Arnaud GUEVEL, Professeur des universités

Coordinateur du Projet

Laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » EA 4334

Université de Nantes

Rapport final – 21 juillet 2011

1. Identification du projet

Acronyme du projet	OPERF2A
Titre du projet	Optimisation de la Performance et interactions <i>homme – machine</i> en sport Automobile et en Aviron
Coordinateur du projet (société/organisme)	Laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » EA 4334 – Université de Nantes
Période du projet (date de début – date de fin)	2008 - 2011
Site web du projet, le cas échéant	www.rspdl.com

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Arnaud GUEVEL
Téléphone	02 51 83 72 49
Adresse électronique	arnaud.quevel@univ-nantes.fr
Date de rédaction	21 juillet 2011

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	Laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » EA 4334 – Université de Nantes & Université du Maine Laboratoire de Mécanique des Fluides UMR CNRS 6598 – Ecole Centrale de Nantes
---	---

2. Résumé grand public

Ce projet de recherche porté par des partenaires du réseau « Recherche et Sport en Pays de la Loire » avait pour objet l'ergonomie et l'optimisation de la performance dans les domaines du sport automobile et de l'aviron. Il visait la caractérisation des déterminants physiologiques, mécaniques et psychologiques de la performance sportive dans ces disciplines. Une approche pluridisciplinaire du sujet a permis d'identifier de multiples déterminants de la performance et leurs interactions. Le projet était structuré en deux axes opérationnels.

Le premier axe a concerné le **sport automobile** et plus particulièrement l'étude du comportement mécanique et des sollicitations musculaires au niveau du rachis cervical du pilote de course dans une perspective de modélisation et de simulation. Un système innovant (i.e., prototype) couplé à un ergomètre isocinétique commercialisé a été développé en vue d'évaluer les qualités musculaires des pilotes associées aux mouvements du rachis cervical. Les mesures d'accélération relevées au niveau de la tête des pilotes lors du roulage soulignent les contraintes mécaniques qui pèsent sur ces sportifs. Dans un cadre de prévention et d'optimisation de la performance des pilotes, il apparaît de fait nécessaire d'évaluer et de développer des protocoles de renforcement du rachis cervical. Par ailleurs, les sollicitations physiologiques ont été mesurées et analysées afin de situer la dépense énergétique induite par une course simulée en karting ainsi que l'implication des fonctions cardiovasculaire et musculaire dans ce contexte. Les paramètres physiologiques mesurés ont révélé que les sollicitations de ces fonctions sont modérées à faibles au cours du pilotage d'un karting pour des pilotes en formation. Ces connaissances ont été mobilisées pour bâtir les contenus d'entraînement physique de ces pilotes et reconsidérer le processus d'évaluation des qualités physiques de ces sportifs. Toutefois, il est probable que ces niveaux de sollicitation physiologique soient très différents sur des voitures de course sur circuit dont la puissance est très supérieure (e.g., F3000). Enfin, ces travaux ont contribué au développement d'un ergomètre d'évaluation des capacités psycho-motrices des pilotes lors des actions de freinage et ainsi participe à la mise en œuvre d'un outil d'aide à l'évaluation de la performance.

Dans le second axe opérationnel, il s'agissait d'analyser d'un point de vue pluridisciplinaire les adaptations de l'activité sportive en **aviron**, et les modes d'ajustements entre le rameur et son bateau ou entre rameurs – équipiers. Le recours aux techniques de la robotique et l'expertise en hydrodynamique des partenaires du projet ont débouché sur la réalisation d'un simulateur dénommé GMRS (Global Mechanical Rowing Simulateur) qui permet de calculer la vitesse du bateau en fonction de la morphologie et de la technique des rameurs et des réglages adoptés. Ce simulateur, une fois validé par des mesures en navigation, permettra de rechercher ou de vérifier avec les sportifs des améliorations personnalisées, en termes de réglages et/ou d'ajustements techniques, afin d'optimiser les performances du système rameur/bateau. Nous avons développé une approche permettant de caractériser les coordinations musculaires mises en œuvre par des rameurs experts (ou novices) lors de la pratique de l'aviron, dans le but d'analyser d'un point de vue physiologique et biomécanique leur performance. Nous avons démontré que l'intensité d'entraînement n'affecte pas les coordinations musculaires. Nous avons également identifié les muscles dont le niveau d'activité est le plus affecté par les modifications de puissance développée ou par la fatigue. Ces nouvelles connaissances devraient être utiles dans la conception des programmes de renforcement musculaire spécifiques des rameurs. Enfin, des travaux en ergonomie cognitive des modes d'ajustements et de la dynamique des interactions entre les rameurs au sein d'équipages ont été menés. Les résultats ont permis de caractériser, les dimensions subjectives de l'activité des rameurs liées à leur coordination, le rôle des communications verbales dans la coordination inter-rameurs en course, et les relations entre le vécu subjectif des rameurs relatif à leur coordination, et leurs ajustements comportementaux. Ces apports de connaissances sont de nature à aider l'entraîneur à mieux comprendre les régulations qui doivent s'opérer au sein d'un équipage pour améliorer sa performance collective.

Les connaissances scientifiques produites sur la durée du programme OPERF2A ont été régulièrement diffusées entre les membres du programme lors de séminaires biannuels. La diffusion de celles-ci lors de colloques et congrès scientifiques nationaux et internationaux a été très intense. Cette diffusion a également concerné le public sportif, notamment lors de rencontres avec les professionnels des différents domaines d'expertise concernés. Les résultats les plus marquants ont fait l'objet de publications dans des revues scientifiques indexées, au nombre de 15 à ce stade et 4 sont en préparation. Certains résultats ont aussi fait l'objet de développements informatiques (i.e., création de logiciels) et technologiques (i.e., ergomètres).

Les connaissances acquises sont investies dans les programmes de formations universitaires et d'ingénieurs et de formations professionnelles adressées aux entraîneurs des disciplines sportives concernées. Enfin, lors du prochain colloque « Sport et Recherche en Pays de la Loire » (novembre 2011) à la Roche sur Yon, les derniers travaux seront présentés.

3. Rappel succinct du contexte et des objectifs du projet

La performance sportive dépend de multiples facteurs. Il semble essentiel de caractériser ces facteurs, et leurs influences réciproques, pour optimiser la performance au plus haut niveau. Dans les sports imposant aux athlètes de piloter un engin (e.g. automobiles, bateaux), la performance dépend également de la qualité des interactions entre le « sportif » et sa « machine » (d'un point de vue mécanique, physiologique, perceptivo-moteur, cognitif, etc.). Aussi, l'interaction « homme – machine » dans ces sports constitue un objet de recherche pertinent, qu'il est possible d'aborder selon des approches scientifiques et disciplinaires différentes (physiologie, mécanique, biomécanique, psychologie), croisées et toutes dirigées vers la recherche de l'optimisation de la performance.

Nous avons fait le choix de nous intéresser à deux « sports instrumentés » soutenus par la région des Pays de la Loire : le sport automobile et l'aviron. Ces pratiques sportives s'affirment dans le territoire régional comme une véritable compétence reconnue au niveau national et international, du fait des performances obtenues par les sportifs ligériens.

Les objectifs scientifiques poursuivis dans ce programme de recherche sont l'analyse (pluridisciplinaire) de la performance du pilote et du rameur en compétition et/ou en entraînement dans une perspective de modélisation et de simulation de son activité ainsi que d'optimisation de l'interaction « homme – machine ».

Ces objectifs ont été déclinés par axes opérationnels de la manière suivante :

Axe opérationnel 1 – Sport automobile

- Etude biomécanique des contraintes mécaniques et musculaires qui s'expriment sur le rachis cervical du pilote et modélisation de son comportement (*approches mécanique et biomécanique*)
- Analyse des sollicitations physiologiques et musculaires en situation de compétition chez les pilotes automobiles et caractérisation de la fatigue induite (*approches physiologique, biomécanique et psychologique*)

Axe opérationnel 2 – Aviron

- Analyse de la performance en aviron en situation écologique et par simulation numérique, et définition de procédures d'optimisation de la technique et des réglages individuels et collectifs à bord (*approches mécanique et biomécanique*)
- Etude de la fatigue du rameur et de son influence sur les coordinations musculaires, les propriétés musculaires et la performance (*approches physiologique, biomécanique et psychologique*)
- Analyse de l'activité collective et optimisation de la performance en aviron : caractérisation des modes d'ajustements et dynamique des interactions entre les rameurs, en relation avec les spécificités des bateaux et des épreuves de compétition en équipage (*approche en ergonomie cognitive*)

Eléments de contexte

Ce projet a été initié et porté par trois partenaires inscrits dans le réseau pluridisciplinaire régional « Recherche et Sport en Pays de la Loire ». Ce réseau reconnu et supporté par la région a notamment vocation à : (i) *développer, favoriser la recherche pluridisciplinaire sur l'objet « sport » et les structures institutionnelles (ou autres) associées*, (ii) *organiser et favoriser les échanges de savoirs, de connaissances entre les acteurs de la recherche*, (iii) *mutualiser les savoir-faire, les outils, etc.*, (iv) *développer des projets coopératifs ambitieux et thématiques en regroupant des équipes*, (v) *créer une dynamique de travail en collaboration entre les acteurs du mouvement sportif et les chercheurs*, (vi) *favoriser les échanges de savoirs et de connaissances au service de la préparation à la performance, de la formation des cadres sportifs, de l'aide à la décision pour les dirigeants sportifs, etc.* (extrait des objectifs du réseau RSPDL). Notre projet répond à l'ensemble de ces objectifs et vise l'émergence de connaissances scientifiques et technologiques sur des disciplines sportives pratiquées de manière importante en région des Pays de la Loire et soutenues par celle-ci.

Par ailleurs, ce programme de recherche répondait aussi à un effort de mise en relation des utilisateurs de la recherche, ici les entraîneurs, avec les chercheurs. En effet, ce programme se caractérise par ses perspectives de production de savoirs qui sont mis à disposition des entraîneurs pour l'analyse et l'évaluation de la performance, comme par exemple la création de systèmes de simulation permettant de tester certaines variables pouvant influencer sur la performance du sportif, et la conception de procédures d'aide à la performance et d'ergomètres d'entraînement.

4. Bilan de la mise en œuvre du projet : dates clés, gouvernance et animation, implication des partenaires, acquisition d'équipements lourds, éventuels décalages avec le projet initial...

Le projet OPERF2A a été administré par le laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » (EA 4334) de l'UFR STAPS, Université de Nantes. Il a été coordonné par Arnaud Guével et Christophe Cornu. Il était structuré en deux axes opérationnels (1) « Sport automobile » et (2) « Aviron », eux-mêmes déclinés en thématiques de recherche, cinq au total, qui étaient sous la responsabilité d'enseignants chercheurs appartenant aux différents laboratoires partenaires : J.P. Mariot, F. Hug & S. Durand, J.M. Kobus, F. Hug & A. Guével, J. Saury.

Des réunions de travail par axe opérationnel et de coordination des programmes de recherche ont été régulièrement organisées. Deux séminaires par année rassemblant l'ensemble des acteurs du projet ont permis de diffuser les connaissances produites au fil de l'exécution du programme, de partager collectivement des informations, de discuter des orientations des travaux, de porter un regard critique sur les travaux menés et l'avancement du programme.

Les travaux développés dans le cadre de ce programme de recherche ont été communiqués dans des colloques et congrès (cf. liste des publications) dont la participation a été prise en charge par le budget du programme OPERF2A.

Concernant le recrutement des personnels en soutien au programme. Les deux chercheurs (Antoine Nordez et Sébastien Serveto) recrutés sur contrats post-doctoraux ont été employés en septembre 2008 après un appel à candidature diffusé au niveau national et international. Le recrutement des doctorants (François Rongère et Nicolas Turpin) a été différé à octobre 2008 après accord de la Région et afin de pouvoir être en phase avec le calendrier de recrutement universitaire des doctorants. Ainsi, à la clôture de ce contrat les deux thèses ne sont pas encore soutenues mais elles sont programmées pour être soutenues en octobre 2011, au terme des 3 ans de formation doctorale. Ces ressources humaines ont été affectées prioritairement à l'axe 2 (Aviron) du programme. Ceci constitue une évolution vis à vis du fléchage affiché dans le projet initial, et décidé en comité de pilotage (regroupement des responsables d'études et des coordinateurs) car les travaux engagés en début de programme sur l'axe 1 – Sport automobile étaient portés et assumés par des chercheurs titulaires des partenaires 1 et 3 et il nous est apparu plus opportun d'orienter les recrutements vers des travaux à initier au niveau de l'axe 2 (Aviron) nécessitant des compétences particulières et l'implication à temps plein de personnels dédiés.

Du point de vue de la gestion financière du programme, chaque partenaire (3 établissements en convention) a perçu la part de la subvention qui était annoncée et fléchée dans la convention d'exécution. Un seul équipement « lourd » a été acquis dans le cadre de ce programme (tableau 1). Cette acquisition a été réalisée par le partenaire 1, mais le matériel était tenu à la disposition de l'ensemble des partenaires, et au terme du contrat il constitue un équipement mutualisé.

Les objectifs initialement fixés dans le projet soumis et retenu ont été intégralement atteints, et le calendrier des opérations a lui aussi été respecté. Toutefois, comme ceci a été évoqué plus haut, le recrutement des doctorants a été effectué en octobre 2008 et par conséquent la soutenance des deux thèses en cours de finalisation est programmée pour l'automne 2011, et donc après le terme de du contrat.

Tableau 1 : récapitulatif des équipements lourds acquis dans le cadre du projet.

Nature de l'équipement lourd	Propriétaire / Emplacement	« Label » éventuel	Coût global	Conditions d'accès
Chaîne de mesure EMG - Ot Bioelettronica	Université de Nantes Lab. MIP	Chaîne EMG matricielle	31096 €	accessible aux partenaires du projet et membres du réseau RSPDL

5. Bilan financier et humain : dépenses réalisées, recrutements (cf. tableaux), cofinancements obtenus

Sur le plan financier, la subvention accordée (300 000 €) était ventilée comme suit :

- recrutement en personnels dédiés (2 post-doc ; 2 doctorants) = 228 400 €
- soutien au programme, équipements et fonctionnement = 71 600 €

Le budget total du programme s'élevait à 496 000 € et donc la part hors subvention atteignait 196 000 €.

Celle-ci devait être couverte par des subventions obtenues auprès de la Fédération Française des Sociétés d'Aviron et du Ministère des Sports (84 000 €), l'apport des partenaires sportifs (Auto Sport Academy ; Pôle France d'aviron de Nantes, total estimé à 21 000 €), et des fonds propres des laboratoires (91 000 €).

Concernant l'axe 1 – Sport automobile, le partenaire sportif « Auto Sport Academy » a contribué au déroulement des études réalisées en mettant à disposition des machines (karting) et du temps de roulage sur son circuit. Il a aussi pris en charge la réalisation d'un premier ergomètre qui a finalement été abandonné car les options

technologiques retenues sont apparues insatisfaisantes au regard des objectifs. La contribution de ce partenaire a été évaluée à 13 000 €. La part d'investissement sur fond propre des partenaires 1 et 3 a aussi contribué à la réalisation de cet axe de travail au sein du programme. Celle-ci a été évaluée à 18 000 €.

Concernant l'axe 2 – Aviron, le partenaire sportif « Pôle France d'aviron » a contribué au déroulement des études 1 et 3 en mettant à disposition du matériel (bateaux et centrale d'acquisition « Powerline ») et l'accès à ses infrastructures d'entraînement. Sa contribution a été évaluée à 6 000 €. L'étude 1 a obtenu les cofinancements annoncés de la FFSA et du Ministère des Sports pour un total de 84 000 €. Ceux-ci ont permis l'acquisition de matériel informatique, de licences d'exploitation du logiciel de programmation, d'un complément de salaire attribué au doctorant afin de situer son salaire au niveau des rémunérations pratiquées par l'ECN pour ces personnels doctorants et la réalisation d'essais en bassin de carène. Les partenaires 1 et 2 ont abondé sur leurs fonds propres le budget de cet axe du programme pour un montant de 46 000 € sur les 3 années.

A la clôture du programme, on constate que la part hors subvention est légèrement inférieure à celle annoncée dans le projet en 2007, puisqu'elle atteint 167 000 €. Le budget total du programme OPERF2A s'établit donc à la clôture du contrat à 467 000 € au lieu de 496 000 € annoncé lors du dépôt du projet.

Tableau 2 : récapitulatif des dépenses réalisées, par partenaire, dans le cadre du projet.

Laboratoire	Etablissement	Subvention prévue (INV.)	Subvention réalisée (INV.)	Subvention prévue (FONCT.)	Subvention réalisée (FONCT.)
Laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » EA 4334	Université de Nantes	26 000 (chaîne mesure EMG)	26 000 (Ot Bioelectronica)	Salaire : 114 200 Fonct programme : 16 800	Salaire : 114 200 Fonct programme : 16 800
Laboratoire de Mécanique des Fluides UMR CNRS 6598	Ecole Centrale de Nantes			Salaire : 68 600 Fonct programme : 12 000	Salaire : 68 600 Fonct programme : 12 000
Laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » EA 4334	Université du Maine			Salaire : 45 600 Fonct programme : 16 800	Salaire : 45 600 Fonct programme : 16 800

Tableau 3 : récapitulatif des recrutements réalisés dans le cadre du projet.

Type de support	Nom du bénéficiaire	Date démarrage	Durée	Labo accueil 1	Labo accueil 2	Devenir professionnel
thèse	Rongère François	01/11/2008	3 ans	LMF UMR CNRS 6598	IRCCyn UMR CNRS 6597	Enseignant-chercheur
thèse	Turpin Nicolas	15/10/2008	3 ans	Lab MIP EA 4334 (Nantes)		Chercheur
post-doctorat	Nordez Antoine	1/09/2008	1 an	Lab MIP EA 4334 (Nantes)		Maître de conférences
post-doctorat	Serveto Sébastien	1/09/2008	1 an	Lab MIP EA 4334 (Le Mans)		Ingénieur

Axe opérationnel 1 - **Sport automobile**

Coordinateur de l'axe 1 : Jean Pierre Mariot

Le pilote est un sportif confronté à la fatigue pouvant limiter son potentiel physique et psychologique. Il met en place des stratégies neuromusculaires ou s'appuie sur des moyens technologiques pour la compenser sur les plans physiologiques et biomécaniques. Toutefois, celle-ci semble agir aussi sur certains mécanismes psychologiques réduisant ainsi l'état de « vigilance » du pilote, son attention, et allant même parfois jusqu'à diminuer le contrôle de son véhicule de sport. Dans ce contexte, les risques d'accidents s'en trouvent augmentés et sa performance en compétition diminuée.

Etude 1

- **Etude biomécanique des contraintes mécaniques et musculaires qui s'expriment sur le rachis cervical du pilote et modélisation de son comportement** (approches mécanique et biomécanique)

*Cet axe de recherche a été porté et réalisé par le partenaire 3.
Responsable scientifique : Jean Pierre Mariot*

Le pilote automobile est soumis à de fortes contraintes mécaniques particulièrement au niveau du rachis cervical. Cette étude visait à modéliser le comportement des muscles sollicités au niveau du rachis cervical afin de déterminer les efforts que ces derniers doivent générer pour lutter contre ces contraintes.

L'inexistence de module commercial adapté à cette évaluation a nécessité le développement d'un système dédié à cette étude (Deslandes et al. 2008a). La validation de ce système a montré que si les effets d'inertie et de gravité peuvent être négligés, les paramètres de raideur et d'amortissement associés aux sangles sont à considérer au regard du couple de force mesuré (Deslandes et al. 2008b). Enfin, une corrélation a été établie via un logiciel de modélisation dynamique de solides (ADAMS). Le développement de cet outil permet de constituer une base caractérisant le niveau de performance par l'aptitude à la fatigue.

Ce travail a porté sur l'évaluation de la capacité musculaire du rachis cervical en isocinétique et en isométrique. Les sports mécaniques sollicitent de façon importante le rachis cervical. Dans un cadre de prévention et d'optimisation, il apparaît de fait nécessaire d'évaluer et de développer des protocoles de renforcement du rachis cervical. Un système innovant (i.e., prototype) a été développé en vue d'évaluer les qualités musculaires des pilotes associées aux mouvements du rachis cervical. Le système développé se couple à un appareil isocinétique (Biodex système 1) (Deslandes et al. 2008a).

La mesure précise du couple produit au niveau d'une articulation nécessite l'alignement du centre de rotation de l'articulation testée avec l'axe de l'ergomètre (Deslandes et al. 2008b). En pratique, cet alignement fait l'objet de recommandations mais il demeure difficile d'éviter une erreur d'alignement. Pour estimer cette erreur, un modèle virtuel analytique et numérique a été proposé prenant en compte les différents paramètres tels que l'inertie, l'effet de gravité, la raideur et l'amortissement des sangles de serrage ou le coefficient de frottement entre le membre évalué et le bras de l'ergomètre. Les résultats montrent que les effets d'inertie et de gravité peuvent être négligés mais que les paramètres raideur et amortissement associés aux sangles sont à considérer au regard du couple de force mesuré.

L'analyse du mouvement de la tête, lors d'une évaluation dans le plan frontal ou dans le plan sagittal a par ailleurs été réalisée à l'aide d'un système VICON à 5 caméras. Cette analyse montre une évolution de la position du centre instantané de rotation au cours du mouvement. La prise en compte de ce paramètre impose l'acquisition du mouvement de la tête lors des évaluations des efforts développés par le rachis cervical permettant d'introduire un facteur de correction sur le couple de force mesuré.

En sport automobile, les pilotes, que ce soit en course d'endurance ou en grand prix, subissent des accélérations de 3 à 4g en longitudinal et de 4 à 5g en transversal. Lors de telles accélérations, le cou est fortement sollicité et un entraînement hors circuit semble indispensable. Il est donc nécessaire d'établir une corrélation entre les sollicitations musculaires subies sur circuit et le niveau de capacité musculaire obtenu sur un appareil d'isocinétisme. Cette corrélation a été établie via un logiciel de modélisation dynamique de solides (ADAMS). Le développement de cet outil permet de constituer une base pour caractériser le niveau de performance et l'aptitude à résister à la fatigue induite par un pilotage de longue durée.

Mots-clés : sports mécaniques, performance, optimisation, accélérométrie, modèles dynamiques inverses

Etude 2

- **Analyse des sollicitations physiologiques et musculaires en situation de compétition chez les pilotes automobiles** (approches physiologique, biomécanique)

*Cet axe de recherche a été porté par les partenaires 1 et 3.
Responsables scientifiques : Sylvain Durand, François Hug*

Considérant que le pilote automobile est exposé à une fatigue physique et psychologique qui semble réduire son niveau de performance en compétition, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude visaient plusieurs objectifs. Il s'agissait en particulier de caractériser le niveau de la dépense énergétique engendrée par la pratique du sport automobile ainsi que les contributions musculaires. Il s'agissait également d'évaluer l'intensité de l'effort physique en s'appuyant sur le recueil et l'analyse de la fréquence cardiaque, d'une part, et de l'activité électrique musculaire d'autre part, au cours de séances d'essais chez des jeunes pilotes en formation.

Les contraintes physiologiques liées à la course automobile ont été peu étudiées. Des études rapportent des contraintes cardiovasculaires élevées (Baroody et al. 1973) suggérant un niveau de sollicitation musculaire important. Nos travaux ont permis de mesurer la dépense énergétique instantanée du pilote de Formula Academy qui s'élevait en moyenne à $1,21 \pm 0,41$ kcal.min⁻¹ pour une vitesse moyenne de $134,94 \pm 2,98$ km.h⁻¹ (Beaune et al. 2010). Au niveau cardiologique, la fréquence cardiaque (FC) mesurée durant les sessions de pilotage (5 sessions de 27.81 ± 1.50 min) était de 132.71 ± 10.71 bpm correspondant à une intensité d'effort de $67.88 \pm 5.37\%$ de la FC maximale (Beaune et Durand 2011). Ces données mettent en évidence une divergence entre les valeurs bioénergétiques (faibles) et cardiologiques (modérées) révélatrices de l'influence des facteurs musculaires (tension musculaire isométrique liée au pilotage) et psycho-émotionnels (attention, motivation, etc.) dont les parts respectives restent à évaluer.

Dans un second temps, nous avons donc cherché à déterminer le niveau d'activité musculaire au cours d'une situation de compétition simulée de karting. 3 pilotes de haut niveau (Auto Sport Academy) ont participé à cette étude exploratoire. L'activité électrique musculaire (EMG) a été mesurée sur 5 muscles des membres supérieurs (Deltoïde, Fléchisseur commun des doigts, Triceps, Grand pectoral et Biceps) au début et à la fin d'une session de 40 minutes. Les résultats laissent apparaître un faible niveau de sollicitation (entre 10 et 20 % de la contraction maximale volontaire) lors de la phase de roulage. En revanche, lorsque cette activité est analysée en fonction des différents secteurs du circuit, des pics d'activité (>50 % de l'activité maximale) sont relevés. Ces résultats ont été exploités par le préparateur physique de l'académie pour améliorer le contenu des séances de renforcement musculaire. Les campagnes d'essais et de mesures réalisées ont révélées les difficultés que soulève le contexte de la pratique sportive (vibration, chaleur élevée, etc.) pour mesurer des activités électriques musculaires – i.e., des signaux électriques de quelques mV.

Les paramètres physiologiques mesurés ont révélé que les sollicitations sont modérées à faibles au cours du pilotage d'un pour ces pilotes en formation. Ces connaissances ont été mobilisées pour bâtir les contenus d'entraînement physique de ces pilotes et reconsidérer le processus d'évaluation des qualités physiques de ces sportifs. Toutefois, il est probable que ces niveaux de sollicitation physiologique soient très différents sur des voitures de course sur circuit dont la puissance est très supérieure. Des mesures sont

envisagées afin de caractériser l'implication de la fonction cardiovasculaire et la dépense énergétique en course (réelle ou simulée) sur des pilotes embarqués dans des voitures de course de type F3000.

Mots-clés : sports mécaniques, dépense énergétique, fréquence cardiaque, activité musculaire

L'ensemble de ces travaux a été réalisé en collaboration avec le centre d'entraînement automobile « Auto Sport Academy » (ex filière Elf) de la ville du Mans, situé sur le circuit des 24 heures du Mans. Les mesures embarquées ont été réalisées intégralement sur des pilotes en formation au sein de l'académie, sur du matériel et des circuits d'entraînement. Cette collaboration a permis d'échanger avec les entraîneurs et dirigeants afin de comprendre et d'analyser leurs attentes. Ceci a eu comme influence une inflexion des objectifs initialement fixés. Nous avons aussi intégré le développement d'un ergomètre visant la mesure des forces et temps de réaction (ergoFTréacPilote) des pilotes lors des actions de freinage en entrée de virages. Cet ergomètre a été développé par le partenaire 3 en collaboration avec l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans. Celui-ci a constitué en une seconde génération d'ergomètre, car une première version visant une évaluation de multiples facteurs de la performance chez le pilote, initié au sein du centre Auto Sport Academy, a été abandonnée. L'ergomètre « ergoFTréacPilote » a été présenté à l'académie et est actuellement à leur disposition pour des essais de validation en vue d'une utilisation pour l'évaluation des qualités psycho-motrices des pilotes en formation.

Axe opérationnel 2 – **Aviron**

Coordinateur de l'axe 1 : Jean Michel Kobus

L'aviron constitue une pratique sportive Olympique particulièrement exigeante sur les plans physiologiques et biomécaniques. L'effort individuel ou collectif est d'une intensité maximale puisque la performance se mesure en écarts de temps minimes par rapport aux 6 à 7 minutes mis pour couvrir une distance de 2000 m. L'optimisation des interactions « homme – bateau » et entre « rameurs » est un préalable essentiel qui influe largement sur la performance, et qu'il faut analyser en fonction du déroulement temporel de la course. L'influence de la fatigue constitue aussi un facteur limitant de la performance qui rend caduque les efforts d'optimisation si elle n'est pas prise en compte au préalable dans la préparation physique et durant la course dans la gestion gestuelle, tactique et relationnelle.

Etude 1

- **Analyse de la performance en aviron par la mesure et la simulation. Optimisation de la technique et des réglages individuels et collectifs** (approches hydrodynamique, mécanique et biomécanique)

Cet axe de recherche a été porté et réalisé par le partenaire 2. Le partenaire 3 a contribué à la réalisation d'une partie des travaux réalisés.

Responsable scientifique : Jean Michel Kobus

Un premier travail prospectif a été réalisé en 2008 par S. Serveto dans le cadre d'un contrat post-doctoral. Il s'agissait de tester la capacité du logiciel *LifeMod* sous ADAMS à traiter le problème de la simulation en aviron. Une publication (Serveto et al. 2010) et deux communications (Serveto et al. 2009a, 2009b) rendent compte des résultats obtenus. Les principales conclusions sont les suivantes. La richesse et la qualité de rendu des résultats et l'ouverture vers la modélisation musculo-squelettique constituent les principaux avantages d'un tel environnement. Les inconvénients sont le temps important nécessaire à l'apprentissage de la construction des modèles et de leur exploitation et la difficulté d'interfaçage avec des utilitaires spécifiques à l'aviron (modèle de style en particulier). L'inconvénient majeur cependant reste l'impossibilité de traiter correctement la partie hydrodynamique du problème. Il a donc été décidé de créer, en complément de ce qui a été proposé jusqu'alors, un environnement de simulation peut-être moins complet car limité à la mécanique, mais plus portable et mieux

adapté à la problématique de l'aviron. Ce projet a été confié à F. Rongère fin 2008 dans le cadre de sa thèse. Le projet a été nommé « GMRS » pour Global Mechanical Rowing Simulator.

Un cadre de simulation a été développé, fondé sur le formalisme robotique et utilisant les paramètres de *Denavit Hartenberg* modifiés (DH) et la méthode de *Newton Euler* récursive (Rongère et al. 2010). Il permet de construire des modèles 3D (Rongère et al. 2011a) de complexité variable comportant un rameur unique et jusqu'à huit rameurs avec chacun une ou deux rames. La seule limitation pratique est l'augmentation du temps de calcul. Ces modèles sont arborescents et comportent des boucles cinématiques résolues numériquement à chaque pas de temps (Rongère et al. 2011b). L'originalité de cette approche est qu'elle offre la possibilité de traiter les six degrés de liberté de la base flottante du système poly-articulé (Rongère et al. 2011b ; Rongère et al. *Revue Int de l'Eau* – à paraître). GMRS permet donc d'obtenir le tangage et le pilonnement du bateau, et d'aborder les problèmes de contrôle de trajectoire en évaluant les pertes d'énergie dues à ces mouvements.

Le comportement dynamique des bateaux est rendu complexe par le fait que les inerties hydrodynamiques ajoutées et les amortissements de radiation des vagues dépendent du contenu spectral des mouvements qui, dans le cas de l'aviron, n'est pas connue à l'avance. Le problème est traité en utilisant les variables d'état pour éviter le calcul des intégrales de convolution donnant les efforts de radiation (Rongère et al. 2011c ; Rongère et al. *Revue Int de l'Eau* – à paraître). Cette méthode ne fait qu'ajouter une vingtaine d'équations différentielles ordinaires (ODE) au système d'équations à résoudre pour obtenir la dynamique du système. La prise en compte de la flexibilité des avirons est en cours de finalisation avec une approche originale qui fera l'objet d'une publication (Rongère et al. Soumis à l'*IEEE*).

Un utilitaire a été réalisé pour le pilotage de GMRS. Il génère des variables articulaires actives strictement cycliques. Ces variables sont construites et contrôlées sur une interface graphique qui calcule également les variables passives et produit une animation globale des rameurs. Les lois de variation sont des *B-splines* qui permettent une déformation aisée des courbes en assurant la continuité de l'accélération et dont les paramètres peuvent être utilisés pour optimiser la technique.

La morphologie des rameurs et les caractéristiques inertielles des composants corporels sont obtenues à partir du modèle GEBOD sur la base de 32 mesures (réalisées sur le bateau et le rameur). Une interface logicielle a été réalisée pour adapter les sorties de GEBOD au formalisme de GMRS. GMRS utilise une base de données unique au format HDF5, contenant tous les paramètres de la simulation, les données d'entrée et les résultats. Les résultats peuvent être visualisés par une animation filaire et/ou des courbes sélectionnées à la demande ou encore pour une représentation en réalité virtuelle en cours de réalisation. Le logiciel *SubVersion* est utilisé pour gérer le suivi des versions successives et des variantes du simulateur.

Ce simulateur en phase de finalisation constituera un outil d'aide à la performance pouvant être mobilisé par les entraîneurs en charge de l'étude de l'efficacité des réglages d'un ensemble « rameur(s) / bateau ».

Travaux connexes

Parallèlement à la réalisation du simulateur GMRS, les développements se poursuivent sur les modèles physiques permettant d'évaluer les efforts extérieurs sur le système. La structure délibérément modulaire du simulateur permet de les incorporer au fur et à mesure de leur validation. Citons en particulier les modèles d'efforts hydrodynamiques sur les avirons pour lesquels deux modèles sont disponibles (Barré et al. 2009, 2010). L'exploitation systématique des simulations (Leroyer et al. 2008 ; Leroyer et al. *Sciences et Motricité*, à paraître) permettra de les affiner en prenant en compte l'immersion des palettes (Leroyer et al. 2010). L'estimation de la résistance à l'avancement sera prochainement améliorée par l'exploitation complète des essais en bassin des carènes en conditions non stationnaires et par des calculs CFD. Le modèle de résistance aérodynamique, testé sur les simulateurs antérieurs à GMRS sera prochainement intégré. Enfin, la collecte de nombreux essais en navigation réalisés pour la FFSA avec les équipes de France permet de disposer d'une base de données qui sera utile pour la validation des simulations.

Mots-clés : aviron, simulation, modélisation, robotique, logiciel ADAMS

- **Caractérisation de la fatigue du rameur, influence sur les coordinations musculaires, les propriétés musculaires et sa performance** (approches physiologique, biomécanique et psychologique)

*Cet axe de recherche a été porté et réalisé par le partenaire 1.
Responsables scientifiques : François Hug, Arnaud Guével*

L'objectif de cette étude était, d'une part, de caractériser les coordinations musculaires associées à la pratique de l'aviron, et d'autre part, d'identifier l'effet de l'expertise, de la puissance de rame et de la fatigue musculaire sur celles-ci. Ce travail a fait l'objet d'un programme et sujet de thèse confié à N. Turpin qui a débuté ses travaux en octobre 2008.

Dans un premier temps, nous avons caractérisé, pour la première fois, le niveau de sollicitation des membres inférieurs en condition écologique chez des rameurs experts (Guével et al. 2011). La mise au point d'un logiciel spécifique de caractérisation et d'identification des synergies musculaires a été développé et fait actuellement l'objet d'une déclaration de propriété intellectuelle auprès de l'INPI (Synemg MIP[®]). Ce logiciel a été éprouvé et sa pertinence validée au travers d'un traitement de données recueillies sur des cyclistes experts (Hug et al. 2010). Il nous a ensuite permis d'étudier de manière novatrice les coordinations musculaires d'un nombre important de muscles (i.e., 23 muscles répartis sur les membres inférieurs, les membres supérieurs et le tronc) lors d'exercices réalisés sur un ergomètre d'aviron.

Dans un second temps, nous avons comparé une population de rameurs entraînés et une population de sujets novices (Turpin et al. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, sous presse). Cette étude a mis en évidence que le contrôle du mouvement est réalisé *via* des synergies très similaires chez les deux populations. Les différences observées au niveau des variables mécaniques du geste (i.e., cinématique et dynamique) sont certainement liées à une distribution des niveaux d'activité différente et/ou à une meilleure efficacité neuromusculaire chez les experts (i.e., une production de force plus importante pour la même activation musculaire).

Dans un troisième temps, nous avons démontré que malgré des modifications de niveau d'activation de certains muscles, les patrons de coordination musculaire sont peu affectés par la puissance de l'exercice (Turpin et al. 2011). Ce résultat est particulièrement intéressant pour les entraîneurs dans la mesure où il permet de confirmer que l'intensité d'entraînement, la plupart du temps inférieure à l'intensité de compétition, n'altère pas les patrons de coordinations musculaires. En outre, les modifications de niveau d'activité pourraient être prises en compte pour construire un programme de renforcement musculaire spécifique.

Enfin, dans une dernière étude nous avons étudié l'influence de la fatigue sur les coordinations musculaires. Plus précisément, nous avons étudié les synergies musculaires au cours d'une épreuve réalisée sur ergomètre, jusqu'à épuisement. Les résultats ont montré que la fatigue altère le niveau d'activité de certains muscles mais ne modifie pas la manière dont ils sont coordonnés (Turpin et al. *Journal of Experimental Biology*, sous presse), et ce, quel que soit le niveau d'expertise.

Pour conclure, ces résultats présentent des applications pratiques immédiates car ils permettent : i) de démontrer que l'intensité d'entraînement n'affecte pas les coordinations musculaires et ii) d'identifier les muscles dont le niveau d'activité est le plus affecté par les modifications de puissance ou la fatigue et donc d'envisager des programmes de renforcement musculaire spécifiques. D'autre part, la création d'un logiciel spécifique d'extraction des synergies musculaires rendu possible par ce projet a permis de publier des travaux de recherche plus fondamentaux (Hug et al. 2011).

Ces travaux de recherche ont permis de développer au sein du laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » une nouvelle méthodologie d'étude des coordinations musculaires qui laisse augurer des perspectives de recherche intéressantes. Dans un premier temps, il apparaît important de continuer les travaux entamés dans le cadre de ce contrat pour mieux comprendre l'origine de la meilleure efficacité du geste chez les rameurs experts. Nous avons démontré qu'elle n'est pas liée à des synergies musculaires spécifiques. Néanmoins, l'étude plus précise de la mécanique musculaire (*via* l'échographie ultrarapide) pourrait nous permettre d'aller plus loin. Dans un second temps, ces travaux ouvrent des questions autour de l'utilisation, ou

non, des synergies musculaires comme unité de contrôle du mouvement par le système nerveux central. Cette question de recherche fondamentale est importante.

Mots-clés : aviron, synergies musculaires, coordination musculaire, analyse, factorisation matricielle

Etude 3

- **Analyse ergonomique de l'activité collective et optimisation de la performance en aviron : modes d'ajustements et dynamique des interactions entre les rameurs, en relation avec les spécificités des bateaux et des épreuves de compétition en équipage** (approches en ergonomie cognitive et mécanique)

Cet axe de recherche a été porté et réalisé par le partenaire 1. Le partenaire 2 a été amené à apporter son expérience dans le traitement des données mécaniques.

Responsable scientifique : Jacques Saury

Cette étude visait à analyser les interactions interindividuelles au sein d'équipages en tant que déterminants de la performance collective en aviron, afin, d'une part, de contribuer à une meilleure connaissance des processus de coordination et d'ajustements mutuels en jeu dans la production de performances collectives en aviron, et d'autre part, de favoriser la conception d'aides à l'entraînement et à la constitution d'équipages. Elle était guidée par l'hypothèse générale que la performance collective en aviron résultait de processus d'ajustements continus et subtils des comportements au sein de l'équipage, intégrant à la fois des dimensions conscientes ou pré-réflexives, et des dimensions non-conscientes, liées à des processus de régulation sensorimoteurs.

La première année du projet a été consacrée à une familiarisation intensive avec le milieu de l'entraînement et de la haute performance en aviron (observation d'entraînements et de compétitions, entretiens approfondis avec des entraîneurs et athlètes experts, organisation d'une table ronde sur le thème de la coordination inter-individuelle en aviron). L'étude proprement dite a été conduite en référence au programme de recherche du « cours d'action » (Theureau, 2006), issu de l'ergonomie cognitive, à partir duquel s'est développé un programme spécifique de recherche portant sur la performance dans diverses situations sportives (Saury, 2008 ; Sève, 2005). A l'issue d'une concertation avec les entraîneurs et athlètes du Pôle France Aviron de Nantes, l'activité de deux équipages féminins espoirs (internationales junior), et d'un équipage masculin élite (niveau olympique) de « Deux de pointe sans barreur », a été étudiée dans des conditions d'entraînement (courses contre la montre sur 3000m) et de course (Têtes de rivière sur 6000m et courses en ligne sur 2000m). L'analyse a été envisagée à deux niveaux complémentaires : (a) la description de la coordination entre les rameurs au niveau de leur expérience subjective, grâce au recueil et à l'analyse de données d'enregistrements vidéo *in situ*, et d'entretiens d'autoconfrontation ; (b) la description des ajustements comportementaux non conscients, grâce à l'analyse de paramètres mécaniques (e.g. couples de forces exercés sur les dames de nage, fréquences de coups de rame, amplitudes et vitesses du balayage des rames, etc.), capturés à l'aide d'un système de mesures mécaniques embarqué, déjà utilisé dans le domaine de l'entraînement (Système « Peach Innovations »).

Les résultats ont permis de caractériser, (a) les dimensions subjectives de l'activité des rameurs liées à leur coordination, (b) le rôle des communications verbales dans la coordination inter-rameurs, et (c) les relations entre le vécu subjectif des rameurs relatif à leur coordination, et leurs ajustements comportementaux.

(a) La gestion par les rameurs (de ces niveaux d'expertises) de leur coordination constitue une part importante de leur activité en navigation, au niveau où celle-ci est significative pour eux, ce qui permet d'inférer un certain coût cognitif de l'entretien et la régulation d'une coordination associée à la perception d'« être ensemble » à chaque instant, dans chaque cycle de rame. Cette coordination n'est ni totalement prédéterminée par la compatibilité technique des rameurs ou par la répartition de leurs rôles à bord, ni totalement contrainte mécaniquement (cf. métaphore du tandem) : elle exige des ajustements spécifiques continus *in situ*. Elle est perpétuellement menacée au cours de la course, par des facteurs extérieurs ou liés à la dynamique même de l'activité collective. On avance l'hypothèse que la minimisation (ou la meilleure gestion) du coût cognitif lié à la coordination pourrait être une des caractéristiques de l'expertise des équipages les plus performants. Par ailleurs, l'analyse met en évidence des moments de partage (ou de convergence), et des moments de non-

partage (ou de divergence), des perceptions, des préoccupations et des attentes mutuelles entre les deux rameurs, ainsi que des variations rapides de la perception de ces états de convergence/divergence au cours de la course. Enfin, quatre modalités typiques d'ajustement des rameurs ont respectivement été caractérisées par les préoccupations suivantes des rameurs : « Etre un référent stable pour l'autre », « Répondre à une demande du partenaire », « S'ajuster à l'autre », et « Ramer 'ensemble' » (Saury et al. 2010).

(b) L'analyse du corpus des communications verbales entre rameurs au cours des courses a permis de caractériser ces communications d'un point de vue quantitatif global, de décrire leur répartition entre les deux rameurs en fonction de leurs rôles respectifs, et dans les différentes phases de la course. Elle a aussi permis de catégoriser les contenus de ces communications permettant une mise en relation de ces données avec l'analyse des modes d'ajustements (six catégories de contenus de communications ont été identifiées).

(c) La mise en relation entre le vécu subjectif des rameurs relatif à leur coordination, et les mesures mécaniques rendant compte de leurs ajustements comportementaux a été réalisée pour explorer certains moments critiques des courses, vécus par l'un ou l'autre des rameurs (ou les deux) comme des « dysfonctionnements » de la coordination entre eux. Cette analyse a permis de mettre en évidence la congruence, mais également les discordances pouvant exister dans la coordination inter-rameurs entre, d'une part, les dimensions objectives de leurs comportements et leurs effets sur la mécanique du bateau, et d'autre part, leurs perceptions subjectives. (Saury et al. 2010 ; Sève et al., soumis, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*). Cette analyse, liée à la mise en œuvre d'un dispositif inédit dans le cadre des pratiques d'entraînement en aviron, a eu différentes retombées concrètes dans le domaine de la conception d'aides à l'entraînement.

Mots-clés : aviron, ergonomie cognitive, cours d'action, mécanique, coordination interindividuelle

L'ensemble des travaux réalisés au sein de ces 3 études ont été menés en collaboration avec le centre d'entraînement en aviron « Pôle France » de la FFSA situé à Nantes sur le site de l'Université de Nantes. Les mesures embarquées ont été réalisées intégralement sur des rameurs experts et de haut niveau en situation d'entraînements ou de compétitions. Cette collaboration associée aux résultats et aux développements technologiques innovants devrait contribuer à faire évoluer les savoir faire techniques des entraîneurs experts, en vue d'une optimisation de la performance des équipages.

7. Actions de valorisation économique, académique (hors publications) et sociétale menées dans le projet ¹

Au cours de la réalisation de ce programme OPERF2A, cinq séminaires invitant l'ensemble des chercheurs impliqués ont été organisés. Des communications issues des travaux réalisés dans ce programme ont été présentées lors du colloque « Sport et Recherche en Pays de la Loire » (SRPDL) en 2009 à Angers. Ce colloque constituait un lieu de rencontre de tous les acteurs du programme, et un moment d'exposition des premiers travaux à la critique de la communauté scientifique présente ainsi qu'aux remarques des acteurs du mouvement sportif mobilisés par cet événement. Les résultats de l'étude 3 de l'Axe 2 – Aviron ont également été présentés aux représentants du mouvement sportif lors d'un séminaire « Recherche et Sport » organisé par le Comité Régional Olympique et Sportif. Les derniers résultats des travaux issus du programme OPERF2A seront présentés lors de l'édition 2011 du colloque SRPDL, les 18 et 19 novembre à La Roche sur Yon.

¹ La valorisation est entendue au sens large et peut porter sur différents domaines et sur différentes actions :

- Valorisation académique : organisation de colloques, séminaires, conférences, promotion collective...
- Créations ou évolutions significatives des formations d'enseignement supérieur et notamment les masters et les formations doctorales.
- Valorisation économique : dépôt de brevets, protection de la propriété intellectuelle, activités de transfert et de prestation, recrutement d'un ingénieur de valorisation, création d'entreprise, etc.
- Valorisation sociétale : actions favorisant l'innovation dans les services publics (santé, sport, culture, collectivités locales,...) et les services collectifs développés par les acteurs de l'économie sociale et solidaire, applications cliniques.
- Actions de mise en débat de la science et de diffusion de la culture scientifique technique et industrielle

Du point de vue de la formation universitaire, le master STAPS spécialité « Expertise, Performance, Intervention » (Université de Nantes), orienté vers la recherche et l'intervention en milieu sportif, a largement bénéficié des apports de connaissances issues de ce programme, ainsi que des relations développées avec les acteurs du mouvement sportif dans ce contexte. Cette spécialité de Master visant plus particulièrement le développement de compétences d'analyse de l'activité sportive et de conception d'aides à l'entraînement, le projet OPERF2A offrait un « prototype » particulièrement pertinent de mise en œuvre d'une démarche de recherche en collaboration avec des acteurs sportifs, et articulant des visées scientifiques et professionnelles. Par ailleurs, François Rongère, doctorant ayant réalisé le simulateur GMRS, hydrodynamicien de formation initiale, a acquis une compétence en robotique qui lui a permis de collaborer au Master Européen EMARO (European Master on Advanced RObotics). Les retombées du programme sur les formations devraient se développer dans l'avenir et plus particulièrement à l'horizon du prochain contrat quadriennal (2012-2015).

L'étude 2 de l'axe 2 – Aviron, a intégré le développement d'un logiciel de caractérisation des synergies musculaires sur la base du traitement des signaux électromyographiques associés à l'activité musculaire. Ce logiciel est en cours de déclaration en propriété intellectuelle auprès de l'INPI. Le simulateur GMRS développé au sein de l'étude 1 – axe 2 sera valorisé au travers de sa mise à disposition des équipes de France d'aviron comme système d'aide à l'amélioration de la performance pour l'entraîneur. Le contexte concurrentiel, et l'implication de la Fédération Française des Sociétés d'Aviron écartent toute perspective d'une industrialisation de cette production. Toutefois, une analyse de l'opportunité d'une déclaration en propriété intellectuelle de ce simulateur est actuellement à l'étude, à des fins de protection de cette « invention ». Par ailleurs, dans le cadre de l'étude 3 de l'axe 2, une aide concrète a été apportée aux entraîneurs d'aviron en termes de conception d'une interface permettant une exploitation plus rapide des données recueillies avec le système « Peach » dans le cadre des pratiques d'entraînement et de compétition.

Les travaux portant sur l'axe 1 (Sport automobile) ont débouché en fin de programme sur le développement d'un ergomètre pour la mesure des forces et temps de réaction des pilotes lors des actions de freinage en entrée de virages. Cet ergomètre a été développé par le partenaire 3 en collaboration avec l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans.

L'ensemble des travaux menés au sein des 5 études du programme, constituent un apport de connaissances scientifiques et technologiques nouvelles, de dispositifs d'aide à la performance innovant à disposition des cadres techniques dans les secteurs du Sport automobile et de l'Aviron. Ces productions constitueront des éléments permettant à ces professionnels de faire évoluer leur savoir faire pratique et leurs modes d'intervention envers les sportifs entraînés.

8. Impact du projet sur la structuration de la recherche en Pays de la Loire : rapprochement de laboratoires, création de structures fédératives...

Ce projet a eu deux effets significatifs sur la structuration de la recherche en Pays de la Loire.

Ce projet collaboratif a permis d'initier des travaux entre des collègues appartenant à deux laboratoires des Universités de Nantes et du Mans qui depuis se sont regroupés en une seule et même équipe, le laboratoire « Motricité, Interactions, Performance » (EA 4334). Ce projet, a été le principal élément fédérateur entre les deux sites durant cette période. Il a ainsi largement contribué à instaurer des relations collaboratives sources de production de connaissances. Il a aussi permis de souligner la pertinence d'une approche pluridisciplinaire pour la résolution de certaines questions scientifiques et techniques. L'étude 3 menée au sein de l'axe 2 – Aviron en témoigne tout particulièrement. D'une part, le bilan des publications et communications scientifiques adossé à ces travaux est très satisfaisant (2 articles et 6 communications). D'autre part, la collaboration avec les professionnels de l'entraînement du secteur de l'aviron a été jugée pertinente, ces derniers reconnaissant un apport de connaissances nouvelles issues de ces travaux, susceptibles d'avoir un impact sur leurs modes d'intervention.

Le programme OPERF2A a par ailleurs confirmé le bien fondé du développement du réseau RSPDL (Recherche et Sport en Pays de la Loire). En effet, ce projet a été pensé à son origine dans ce cadre institué en 2006. L'une des missions du réseau est d'initier le développement de projets collaboratifs en mettant en relation les chercheurs et les acteurs du mouvement sportif. En ce sens, ce programme OPERF2A a été emblématique et il a démontré l'utilité de l'existence de ce réseau (RSPDL) pour le développement de projets pluridisciplinaire collaboratifs sur l'objet Sport en Région.

9. Effet levier du projet (réponse à d'autres appels à projets, insertion dans des réseaux)

Le travail réalisé dans le cadre du programme OPERF2A jouera probablement favorablement dans la demande de renouvellement pour 3 ans du projet « OPTIPERFAviron » auprès de la FFSA et du Ministère des Sports, dont Sophie Barré (chercheur associée à ce programme) sera la responsable scientifique. Le nouveau projet est orienté vers les mesures et les analyses de terrain, mais inclut l'exploitation du simulateur GMRS pour l'analyse et la recherche d'amélioration de la performance.

Ce programme OPERF2A a permis de produire de la connaissance scientifique sur le sport en région et ainsi largement participer à la dynamique de développement et de pérennisation du réseau RSPDL d'une part, et du colloque « Sport et Recherche en Pays de la Loire » d'autre part. Il a aussi largement contribué à rapprocher dans ce cadre les chercheurs en activité au sein de ce programme et les acteurs (entraîneurs, dirigeants) du mouvement sportif des milieux du sport automobile et de l'aviron.

Ce programme a aussi eu un effet de levier à l'égard du rapprochement des équipes « Motricité, Interactions, Performance » (partenaire 1), Jeune équipe au moment du dépôt de ce projet et le Laboratoire des APS (LAPS), Equipe en émergence à cette époque, en une même équipe de recherche labellisée dans le contrat quadriennal 2008 – 2011 en qualité d'Equipe d'Accueil.

Ce programme a aussi contribué à définir un projet de recherche financé par l'Agence Française de Lutte contre le Dopage (AFLD) portant sur « l'Évaluation du profil biomécanique du coureur cycliste par mesures in situ et en laboratoire en se basant sur la modélisation du système à l'aide du logiciel ADAMS ». Les travaux réalisés dans le cadre du stage post-doctoral de S. Serveto (Etude 1 – Axe 2) ont permis de développer au sein de notre équipe des compétences dans le domaine de la modélisation biomécanique à l'aide de cet outil (ADAMS), et celles-ci seront réinvesties dans le cadre de ce programme de recherche.

Les compétences acquises dans le cadre de l'étude 2 (axe 2 – Aviron) sur la caractérisation des synergies musculaires sont déjà réinvesties dans des projets portés par les partenaires 1 et 2. Ceci devrait activement contribuer à l'émergence d'un projet qui serait soumis à l'ANR.

10. Perspectives

Ce projet de recherche pluridisciplinaire a permis de soulever et répondre à des questions fondamentales et appliquées en lien avec des pratiques professionnelles d'entraîneurs experts en charge de l'optimisation de la performance sportive. Ce projet était ambitieux en ce sens où il visait à répondre à des questions complexes et multifactorielles par nature, grâce à la mobilisation conjointe et complémentaire de diverses perspectives scientifiques, se rattachant aux champs de la mécanique, de la biomécanique, de la physiologie, et de la psychologie. En associant par ailleurs des protocoles de recherche expérimentaux et des investigations en contexte écologique, la mise en œuvre de ce projet a démontré la pertinence du regroupement de compétences et de connaissances associées à des champs scientifiques éloignées pour répondre à des problèmes pratiques.

Notre souhait, à ce stade, est de prolonger cette dynamique de travail en développant un nouveau projet pluridisciplinaire qui viserait à analyser l'effet de l'entraînement et les conditions d'optimisation de la performance

sportive dans des sports réunissant des caractéristiques biomécaniques communes, l'aviron et le cyclisme. Il s'agirait de caractériser et modéliser les signatures mécaniques et neurophysiologiques des gestes techniques structurants ces activités cycliques dans une visée d'optimisation de l'efficacité mécanique du sportif et de l'interaction avec sa « machine ». Le simulateur numérique d'aviron développé dans le cadre du projet OPERF2A suivra des évolutions et il sera alimenté par de nouvelles mesures réalisées en navigation dans le cadre de ce projet. Nous analyserons l'effet de l'entraînement et de la fatigue neuromusculaire sur la construction des coordinations musculaires au cours de la pratique de ces activités sportives. Une approche quantitative statistique fondée sur l'extraction de synergies musculaires sur la base de la mesure de signes électrophysiologiques de l'activité musculaire sera mobilisée. Celle-ci a été développée dans le cadre du précédent projet OPERF2A. Enfin, nous étudierons la fatigue neuromusculaire et les dommages musculaires induits par ces pratiques sportives intensives. Notre approche électro-physiologique sera complétée par la mise au point d'une méthodologie innovante et originale en protéomique (puces à protéines) permettant de quantifier des marqueurs sériques spécifiques au type de stress assumé par les muscles mobilisés au cours de ces activités cycliques. L'ensemble de ces travaux seront menés avec une double visée : (i) fondamentale et de production de connaissances scientifiques novatrices sur des concepts mécaniques, neurophysiologiques, biologiques, (ii) appliquée et de transfert de ces connaissances vers des savoirs faire pratiques et professionnels au service des acteurs du mouvement sportif et de la santé (rééducation fonctionnelle), ainsi que du développement de matériel sportif.

Ces perspectives de travail s'inscriraient pleinement dans les activités et la dynamique du réseau « Recherche et Sport en Pays de la Loire » et se focaliseraient tout particulièrement sur des pratiques sportives qui s'affirment dans le territoire ligérien comme de véritables compétences reconnues au niveau national et international (i.e. l'aviron et le cyclisme).

Au-delà des perspectives permettant de prolonger l'ambition pluridisciplinaire du projet OPERF2A qui viennent d'être évoquées, d'autres perspectives concernent plus spécifiquement des questions restées ouvertes dans le cadre des différentes études composant le projet initial.

En lien avec les acquis de l'étude 3 de l'Axe 2 – Aviron, l'un des objectifs de recherches futures pourrait être d'analyser les transformations de la coordination inter-rameurs au cours du temps chez un équipage jeune « en formation » (analyse longitudinale). Il s'agirait de « tracer » les évolutions qui traduisent un apprentissage, ou une optimisation de la performance collective, dans la période initiale de coopération entre deux rameurs. Cet objectif est associé à deux sortes d'enjeux :

- scientifiques : mieux comprendre la nature des compétences qui sont progressivement développées par l'équipage pour ramer « ensemble » ;
- pratiques : fournir, aux entraîneurs et aux athlètes, des informations et analyses des modes de coordination observés et de leur évolution.

Une telle perspective est tributaire d'une adhésion et d'un engagement des entraîneurs et athlètes à l'image de la démarche collaborative mise en œuvre dans le projet OPERF2A avec les acteurs du Pôle France et Espoir d'aviron de Nantes.

Un autre objectif en lien avec cette étude (2-3) pourrait être d'étendre l'approche originale de la performance engagée à d'autres situations sportives. En effet, l'étude conduite en aviron avait pour originalité d'aborder des questions liées à la performance collective en s'appuyant sur des approches théoriques, des méthodologies, ainsi que sur les compétences de chercheurs, provenant de différents champs scientifiques : la psychologie et la mécanique. Elle a permis d'expérimenter et de valider une méthode permettant de croiser des « données subjectives » et des mesures mécaniques (« objectives ») relatives à la performance sportive. Celle-ci, en se révélant féconde pour l'étude de la performance en aviron, offre dans le même temps un modèle d'investigation plus général pouvant être transposé pour l'étude d'autres situations sportives présentant des caractéristiques analogues, et permettant de mieux appréhender la complexité de la performance sportive que ne pourrait le faire une approche mono disciplinaire. Tous les sports « mécaniques », mettant en jeu une interaction homme-machine (voile, cyclisme, canoë-kayak...), ou les pratiques d'entraînement mettant en jeu des dispositifs matériels ou des ergomètres spécifiques (e.g., MAD system en natation). A ce titre, cette étude ouvre des perspectives intéressantes d'investigations futures.

ANNEXE

Liste des publications et communications

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	6	9
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	3	11
France	Revue à comité de lecture	1	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	1	4
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

Nb. A ce stade la valorisation en termes de publications et communications des travaux réalisés dans le cadre de ce programme n'est pas finalisée. Lors du prochain colloque « Sport et Recherche en Pays de la Loire » 2011, les futurs docteurs (F. Rongère & N. Turpin) présenteront une synthèse de leurs travaux de thèse. Des projets de publications sont également en cours de réflexion et la liste des publications dans des revues à comité de lecture sera donc plus étendue au terme de ce processus de valorisation des travaux issus du programme.

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

- Deslandes, S., Mariot J.-P., Serveto, S. Offset of rotation centers creates a bias in isokinetics. A virtual model including stiffness or friction. *Journal of Biomechanic*. 2008a. 41(10): 2112-2120.
- Deslandes, S., Mariot, J.-P., Colin, D. A dedicated device for isokinetic and isometric measurements of neck strength. *Isokinetics and Exercise Science*. 2008b. 16 (4): 269-273.
- Beaune, B., S Durand, S., Mariot, J.P. Open-wheel race car driving. Energy cost for pilots. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2010. 24(11): 2927-2932.
- Beaune, B., Durand, S. Cardiac chronotropic adaptation to open-wheel racecar driving in young pilots. *International Journal of Performance Analysis in Sport* (sous presse)
- Serveto, S., Barré, S., Kobus J.M., Mariot, J.P. A three-dimensional model of the boat-oars-rower system using ADAMS and LifeMOD commercial software. *Proc. IMechE, Part P: J. Sports Engineering and Technology*, special issue on rowing. 2010, 224 (P1): 75-88.
- Leroyer, A., Barré, S., Kobus, J.M., Visonneau, M. Experimental and numerical investigations of flow around and oar blade. *Journal of Marine Science and Technology*. 2008. 13(01): 1-15.
- Leroyer, A., Barré, S., Kobus, J.M., Visonneau, M. Influence of free surface, unsteadiness and viscous effects on oar blade hydrodynamic loads. *Journal of Sports Sciences*. 2010. 28(12): 1287-1298.
- Barré, S., Kobus, J.M. Comparison between common models of forces on oar blades and forces measured by towing tank tests. *Proc. IMechE, Part P: J. Sports Engineering and Technology*, Special Issue on Rowing, 2010. 224 (P1): 37-50.
- Guével, A., Boyas, S., Guihard, V., Cornu, C., Hug, F., Nordez, A. Thigh muscle activities during codified training sequences of on-water rowing. *International Journal of Sports Medicine*. 2011. 32(2): 109-116.

- Hug, F., Turpin, N.A., Guével, A., Dorel, S. Is interindividual variability of EMG patterns in trained cyclists related to different muscle synergies? *Journal of Applied Physiology*. 2010. 108: 1727-36.
- Turpin, N.A., Guével, A., Durand, S., Hug, F. Effect of power output on muscle coordination during rowing. *European Journal of Applied Physiology*. 2011 [DOI: 10.1007/s00421-011-1928-x]
- Hug, F., Turpin, N.A., Couturier, A., Dorel, S. Consistency of muscle synergies during pedalling across different mechanical constraints. *Journal of Neurophysiology*. 2011. 106(91): 103-2011.
- Turpin, N.A., Guével, A., Durand, S., Hug, F. Rowing expertise does not require specific muscle synergies. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. (sous presse)
- Turpin, N.A., Guével, A., Durand, S., Hug, F. Is modular organization of muscle coordination altered during an exhaustive exercise? *Journal of Experimental Biology*. (sous presse)
- Saury, J., Nordez, A., Sève, C. Coordination interindividuelle et performance en aviron: apports d'une analyse conjointe du cours d'expérience des rameurs et de paramètres mécaniques. *@ctivités*, 2010. 7(1), 2-27.

Résumé publié

- Turpin, N.A., Guével, A., Dossat, A., Durand, S., Hug, F. Recognition of muscle functional organisation in rowing by synergy identification. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2010. 13. Supplement 1 : 141-142.

Publications soumises ou en cours de rédaction dans des revues à comité de lecture

- Deslandes, S., Rahmani, A., Delpierre, Y., Mariot, J.P. Centre de rotation de référence pour l'évaluation musculaire du rachis cervical (en cours d'écriture), à soumettre à *Human Movement Science*
- Hug, F., Turpin, N.A., Dorel, S., Guével, A. The smoothing of EMG patterns can influence the number of extracted muscle synergies. *Neuroscience research*. Soumis.
- Rongère, F., Khalil, W., Kobus, J.M. A Robotic Framework for the Simulation of Rowing (en cours d'écriture), à soumettre à l'*IEEE (IEEE Transactions on Systems, MAN, and Cybernetics - PART C: Applications and Reviews)*.
- Sève, C., Nordez, A., Saury, J. Analysis performance in sport: contributions from a joint analysis of athletes' courses of experience and of mechanical indicators. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. Soumis.

Communications

- Deslandes, S., Mariot, J.P., Beaune, B., Durand, S., Serveto, S. Isokinetics for neck muscular fatigue assessment. 3^{ième} Congrès de la société de biomécanique, Compiègne. *Computer Methods in Biomechanics and Biomechanical Engineering*, 11(1), P87-88. 2008.
- Beaune, B., Mariot, J.P. Application de la biomécanique à l'étude du pilote en situation de conduite. International Forum on Innovation in Transportation, Le Mans, 2008.
- Serveto, S., Barré, S., Kobus, J.M., Mariot, J.P. A model of oar-boat-rower system to optimize rowing performance. 34^{ième} congrès de la Société de Biomécanique, Toulon, 2009a.
- Serveto, S., Barré, S., Kobus, J.M., Mariot, J.P. Modélisation mécanique et biomécanique du système complet « bateau-avirons-rameur ». Premiers résultats et perspectives offertes. Journées Thématiques de la Société de Biomécanique « La machine humaine au regard de la performance sportive », Poitiers, 2009b.
- Rongère, F., Kobus, J.M. On going work on the simulation of rowing by a robotic approach. Conférenciers invités, Symposium "Sciences meets practice: rowing", VU Amsterdam, Research Institute MOVE, 2010.

- Rongère, F., Khalil, W., Kobus, J.M. Modélisation 3D pour la simulation du fonctionnement des systèmes bateau, avirons, rameurs. Symposium "Sport Measure & Simulation" SMS 2011 (ACAPS et Société de Biomécanique), Poitiers, 2011b.
- Rongère, F., Khalil, W., Kobus, J.M. Dynamic Modeling and Simulation of Rowing with a Robotics Formalism, soumis au 16th International Conference on Methods and Models, in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Poland, 2011c.
- Rongère, F., Kobus, J.M., Delhommeau, G. Le calcul des mouvements secondaires des bateaux d'aviron en simulation, Symposium "Sport Measure & Simulation" SMS 2011 (ACAPS et Société de Biomécanique), Poitiers, 2011d.
- Rongère, F., Kobus, J.M., Babarit, A., Delhommeau, G. Étude comparée de méthodes de calcul des efforts de radiation pour l'application à l'aviron, 12^{ème} Journées de l'Hydrodynamique, Nantes, 2011. *Communication sélectionnée par le comité scientifique et la Société Hydrotechnique de France pour une parution dans "La Houille Blanche, Revue Internationale de l'Eau", à paraître.*
- Leroyer, A., Barré, S., Kobus, J.M. Mesures et simulation. État de l'art de l'hydrodynamique des palettes d'aviron, Symposium "Sport Measure & Simulation" SMS 2011 (ACAPS et Société de Biomécanique), Poitier, 2011. *Communication sélectionnée par le Comité scientifique du symposium pour une parution en version étendue à 8000 mots dans « Sciences et Motricité », à paraître.*
- Barré, S., Kobus, J.M., Leroyer, A. Vers une meilleure connaissance de la force agissant sur les palettes d'aviron : des essais en bassin des carènes aux calculs de l'écoulement par CFD Journées Thématiques de la Société de Biomécanique « La machine humaine au regard de la performance sportive », Poitiers, 2009.
- Turpin, N.A., Guével, A., Dossat, A., Durand, S., Hug, F. Recognition of muscle functional organisation in rowing by synergy identification. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2010. 13. Supplement 1 : 141-142. Congrès de la Société de Biomécanique. 2010.
- Turpin, N.A., Guével, A., Durand, S., Hug, F. Muscle coordination during an exhaustive exercise in trained rowers. Congrès de l'International Society of Biomechanics. Bruxelles, Belgique, 2011
- Nordez, A., Sève, C., Saury, J. Confrontations d'analyses biomécaniques et d'expériences subjectives liées à la performance chez des rameurs de haut niveau en aviron. In P. Lacouture, F. Colloud, & T. Monnet (Eds.), Journées thématiques de la Société de Biomécanique : « La machine humaine au regard de la performance sportive » (pp. 155-162). Poitiers, 2009.
- Saury, J., Nordez, A., Sève, C. Analyser la performance collective en aviron en croisant une description de l'expérience subjective des rameurs et le traitement de données mécaniques. Congrès International de la SFPS, Paris, 2009.
- Sève, C., Nordez, A., Saury, J. Analyse des dimensions subjectives de la coordination entre rameurs dans la recherche de performance en aviron. Congrès International de la SFPS, Paris, 2009.
- Sève, C., Nordez, A., Saury, J. Quand le recours à l'expérience de l'acteur n'est plus suffisant pour comprendre son activité. Un exemple basé sur une étude de la coordination en aviron. Colloque ARCo 09. Rouen, 2009.
- Saury, J. Coordination interindividuelle et performance en aviron : apports d'une analyse conjointe du cours d'expérience des rameurs et de paramètres mécaniques. Séminaire du réseau PERGO (Psychologie ERGonomique de l'Ouest), Vannes, 2010.
- Saury, J., Nordez, A., Sève, C. Analyser l'activité d'un équipage pour concevoir une aide à l'entraînement en aviron. 14^{ème} Congrès International de l'ACAPS, Rennes, 2011.