PROJET DE THÈSE MAURIES MATTHIEU

Phd: Stratégies individuelles de production de force. Du contrôle neuromusculaire aux contraintes biomécaniques

Question centrale : Pourquoi des individus présentant des capacités mécaniques similaires utilisent-ils des stratégies neuromusculaires différentes ?

Finalité scientifique ?

Identifier les déterminants de ces stratégies et leurs conséquences sur la performance, la fatigue et les contraintes mécaniques.

Possibilité de transfert : Phénotypage neuromécanique individualisé et développement de marqueurs applicables au sport, à la rééducation, à l'ergonomie ou aux technologies du mouvement.

1.1 Résumé exécutif

La capacité à produire une force donnée ne dépend pas uniquement de la quantité de force maximale qu'un individu est capable de générer. Deux individus présentant des capacités mécaniques comparables peuvent mobiliser des stratégies neuromusculaires différentes : recrutement et comportement des unités motrices, activation relative des muscles, coactivation, coordination intermusculaire et distribution des contributions musculaires aux moments articulaires. Ces stratégies peuvent avoir des conséquences différentes sur la performance, la fatigue et les contraintes mécaniques.

Cette thèse propose d'étudier cette variabilité interindividuelle selon une approche intégrative reliant quatre niveaux : unité motrice → muscle → articulation → fonction. L'isométrie constitue un modèle expérimental contrôlé permettant de caractériser finement le contrôle de la force. Les signatures identifiées seront ensuite confrontées à des tâches dynamiques et à une condition de fatigue afin d'évaluer leur portée fonctionnelle.

L'ambition n'est donc pas de faire de la contraction isométrique la finalité de la recherche, mais de l'utiliser comme un outil de phénotypage neuromécanique. Le projet vise à terme l'identification de marqueurs permettant une caractérisation individualisée de la fonction neuromusculaire et susceptibles d'être transférés vers des évaluations plus simples de terrain.

1.2 Question scientifique centrale

Question centrale : Pourquoi des individus présentant des capacités de production de force similaires adoptent-ils des stratégies neuromusculaires et biomécaniques différentes, et quelles sont les conséquences de ces stratégies sur la performance, la fatigue et les contraintes mécaniques ?

1.3 Hypothèse générale

La variabilité interindividuelle de la performance ne dépend pas uniquement de la capacité maximale à produire une force, mais également de la manière dont cette force est distribuée entre les muscles et les articulations. Des stratégies neuromusculaires distinctes peuvent ainsi permettre d'atteindre une performance mécanique comparable tout en présentant des signatures différentes en termes de coût neuromusculaire, de coordination, de stabilité et de réponse à la fatigue.

2.1 Objectif principal

Identifier les déterminants neuromusculaires et biomécaniques de la variabilité interindividuelle des stratégies de production de force et déterminer leurs conséquences fonctionnelles sur la performance et la réponse à la fatigue.

2.2. Objectifs spécifiques

Objectif 1 : Cartographier la variabilité interindividuelle : Quantifier les différences de stratégie entre individus présentant des niveaux de performance comparables, en considérant l'activation musculaire, le recrutement des unités motrices, la coactivation et la coordination intermusculaire.

Objectif 2 : Identifier les déterminants neuromécaniques : Déterminer les contributions relatives des caractéristiques individuelles, du contrôle des unités motrices, de la coordination musculaire et des contraintes biomécaniques.

Objectif 3 : Évaluer les conséquences fonctionnelles : Étudier les relations entre stratégies neuromusculaires, performance, fatigue, stabilité et redistribution des contraintes articulaires.

Objectif 4 : Construire une approche individualisée : Identifier des marqueurs neuromécaniques robustes et rechercher, lorsque possible, des variables simplifiées susceptibles d'être utilisées dans des évaluations appliquées.

3. Pourquoi l'isométrie comme test ?

L'isométrie est retenue comme modèle expérimental et non comme domaine d'application exclusif. Elle permet de contrôler précisément la posture, la longueur musculaire, la direction de la force et le niveau de force demandé, tout en offrant des conditions favorables à la décomposition des unités motrices par EMG haute densité. La reproductibilité et la facilité de contrôle des paramètres des tests isométriques offrent la possibilité d'avoir des données plus fiables.Cette situation constitue une étape de phénotypage à "haute résolution". Les résultats seront ensuite testés dans des tâches dynamiques afin d'évaluer leur transférabilité.

4.1 Modèle conceptuel

Le projet suit la chaîne fonctionnelle suivante :

- Contrôle des unités motrices
- Activation et coordination musculaires
- Production de moments et distribution des charges
- Performance et stabilité du mouvement
- Réponse à la fatigue et réorganisation de la stratégie

L'architecture est volontairement progressive : une phase de phénotypage relativement large permet de caractériser la variabilité ; un sous-échantillon bénéficie ensuite d'une instrumentation avancée pour rechercher les mécanismes.

<u>Étude 1 : Cartographie de la variabilité</u>

Population indicative : environ 50 à 80 participants, selon les moyens disponibles et le nombre de facteurs étudiés.

- Anthropométrie et caractéristiques individuelles
- Force maximale et force sous-maximale
- Test de performance dynamique simple, par exemple saut vertical selon le contexte
- EMG multi-musculaire
- Indicateurs de coactivation et de coordination
- Indicateurs de fatigue et de reproductibilité

Objectif : identifier les dimensions majeures de variabilité et sélectionner les situations les plus informatives pour l'étude mécanistique.

<u>Étude 2 : Analyse mécanistique "haute résolution"</u>

Sous-échantillon indicatif : environ 20 à 30 participants.

- Force plates / dynamométrie
- Capture du mouvement 3D
- EMG haute densité sur groupes musculaires ciblés

- Décomposition des signaux en unités motrices lorsque techniquement possible

- Modélisation musculosquelettique, par exemple OpenSim

- Analyse de coordination musculaire et Estimation des moments articulaires et des contributions musculaires par modélisation

Objectif : expliquer les différences observées entre profils par des mécanismes liés au recrutement, à la décharge, à la coordination et à la mécanique du mouvement.

Étude 3 : Performance et fatigue

Une condition de fatigue standardisée sera introduite afin d'étudier la stabilité ou la réorganisation des stratégies individuelles.

Schéma général : état frais → test de référence → protocole de fatigue → répétition des tests.

Les analyses porteront notamment sur la dégradation de la performance, la modification de l'activation musculaire, la réorganisation de la coordination et la redistribution des contraintes mécaniques.

4.2 Mesures et niveaux d'analyse

Niveau	**Ce qu'on mesure**	**Variables principales**	**Question**
Performance	Force / plateforme / dynamomètre	Fmax, RFD, variabilité	Qu'est-ce que l'individu produit ?
Musculaire	EMG multi-musculaire	activation, coactivation, coordination	Comment les muscles produisent-ils cette force ?
Unité motrice	HD-EMG	recrutement, fréquence de décharge, variabilité	Comment le système nerveux commande-t-il les muscles ?
Biomécanique	Cinématique + forces + modèle	moments, forces musculaires estimées, charges	Comment cette stratégie se traduit-elle mécaniquement ?
Fonctionnel	Répétition/fatigue/performance	perte de force, réorganisation	Quelles sont les conséquences ?

4.3. Hypothèses opérationnelles

Des individus présentant une performance mécanique similaire présenteront des signatures d'activation et de coordination différentes. Une partie de la variabilité interindividuelle pourra être expliquée par des différences dans le comportement des unités motrices et dans la coordination intermusculaire. Les stratégies neuromusculaires seront associées à des distributions différentes des moments et forces articulaires estimées. La fatigue entraînera des réorganisations individuelles de la coordination et du recrutement, dont l'ampleur dépendra du profil initial. Certaines signatures complexes mesurées en laboratoire pourront être résumées par un nombre réduit de marqueurs potentiellement transférables vers des évaluations de terrain.

4.4. Stratégie d'analyse

L'analyse cherchera à éviter une simple juxtaposition de mesures. Les données seront organisées autour de profils et de relations entre niveaux.

- Analyses de reproductibilité et de sensibilité des mesures
- Réduction dimensionnelle et classification exploratoire pour caractériser les profils
- Modèles mixtes pour tenir compte des effets interindividuels et des conditions expérimentales
- Analyses des relations entre contrôle neuromusculaire, coordination, mécanique et performance
- Approches multivariées pour identifier des signatures combinées
- Validation croisée ou validation sur un échantillon indépendant lorsque l'effectif le permet

Les profils seront interprétés comme des outils de description de la variabilité et non comme une classification a priori des individus en stratégies « bonnes » ou « mauvaises ».

4.5 Place de la TMS et du H-reflex

Ces mesures sont envisagées comme des modules complémentaires et non comme des objectifs centraux. Elles seront intégrées uniquement si une question précise sur l'excitabilité cortico-spinale ou réflexe émerge des premières études et si les plateformes sont disponibles.

5. Calendrier prévisionnel sur trois ans

Période	Objectifs	Expérimentation	Livrables
Année 1	Phénotypage et reproductibilité	Étude 1, calibration, sélection des mesures	Base de données, protocole validé, premier article
Année 2	Mécanismes neuromécaniques	HD-EMG, unités motrices, motion capture, force plates, OpenSim	Article mécanistique, modèles intégratifs
Année 3	Conséquences fonctionnelles et transfert	Fatigue, tâches dynamiques, réduction des marqueurs	Article intégratif, preuve de concept appliquée, thèse

6. Originalité et valeur scientifique

- Passage d'une mesure de force à l'étude des stratégies individuelles de production de force.

- Articulation de données à plusieurs niveaux : unité motrice, muscle, articulation et fonction.

- Utilisation de l'isométrie comme modèle expérimental contrôlé puis test de la transférabilité vers le mouvement dynamique.

- Prise en compte explicite de la fatigue comme perturbation permettant de révéler les différences de stratégie.

- Recherche de marqueurs simplifiés à partir d'un phénotypage de référence haute résolution.

7. Potentiel d'application et transfert

Le projet ne vise pas à établir directement un outil de prédiction individuelle des blessures. Il cherche d'abord à identifier des signatures neuromécaniques robustes et à documenter leurs associations avec la performance, la fatigue et les contraintes mécaniques.

Sport et performance : Caractérisation individualisée des stratégies de production de force et suivi des adaptations à l'entraînement.

Technologies de mesure : Identification de variables de laboratoire pouvant être réduites vers des mesures plus simples ou portables.

Rééducation : Quantification de la récupération de la fonction neuromusculaire et de la réorganisation des stratégies.

Ergonomie : Étude des stratégies de production de force et de leur évolution sous fatigue ou contrainte.

Équipement et ingénierie : Aide à la conception ou à l'évaluation de dispositifs sollicitant le système neuromusculaire.

8.1 Positionnement pour une CIFRE

La proposition est conçue pour être modulable selon le partenaire industriel. Le cœur scientifique reste identique : comprendre les stratégies individuelles de production de force. Tandis que la tâche dynamique, la population et les marqueurs de sortie peuvent être adaptés au cas d'usage.

La valeur R&D peut ainsi être formulée autour d'une question de transfert : peut-on réduire une caractérisation neuromécanique complexe à un ensemble de marqueurs robustes, reproductibles et utilisables dans un contexte appliqué ?

8.2 Risques et stratégies de mitigation

Risque	**Stratégie**
Complexité expérimentale	Prioriser un noyau de mesures indispensables et réserver les modules avancés aux sous-échantillons.
Décomposition des unités motrices	Prévoir des critères de qualité stricts et des analyses alternatives basées sur l'EMG global lorsque la décomposition est insuffisante.
Modélisation musculosquelettique	Présenter les forces musculaires comme des estimations dépendantes du modèle et réaliser des analyses de sensibilité.
Interprétation des synergies	Parler de structures de coordination musculaire et éviter de les assimiler directement à des modules neuronaux.
Lien avec la blessure	Ne pas promettre une prédiction individuelle du risque ; étudier d'abord les contraintes et signatures associées à la fatigue et à la fonction.
Hétérogénéité des tâches	Utiliser une tâche contrôlée commune pour l'étude mécanistique, puis une tâche dynamique définie selon la question appliquée.

9. Résultats attendus

1) Une caractérisation quantitative de la variabilité interindividuelle des stratégies de production de force.

2) L'identification de déterminants neuromusculaires et biomécaniques associés à cette variabilité.

3) Une meilleure compréhension de la manière dont ces stratégies évoluent sous fatigue.

4) L'identification de signatures neuromécaniques associées à des différences de performance ou de contraintes mécaniques.

5) Une première sélection de marqueurs potentiellement simplifiables pour des applications de terrain ou industrielles.

10. Productions scientifiques envisagées

Article 1 : Variabilité interindividuelle des stratégies de production de force et reproductibilité des marqueurs.

Article 2 : Déterminants neuromusculaires et biomécaniques des stratégies individuelles.

Article 3 : Réorganisation des stratégies sous fatigue et conséquences fonctionnelles.

Article 4 : Vers une caractérisation simplifiée et individualisée de la fonction neuromusculaire, selon les résultats et le partenariat.