



Développement d'un système de mesure des forces de couplage à l'interface main-poignée d'outils portatifs vibrants pouvant être utilisé sur le terrain

Pierre Marcotte, chercheur, équipe Prévention des risques mécaniques et physiques, IRSST

Subhash Rakheja, professeur, Université Concordia

8 décembre 2015



Problématique

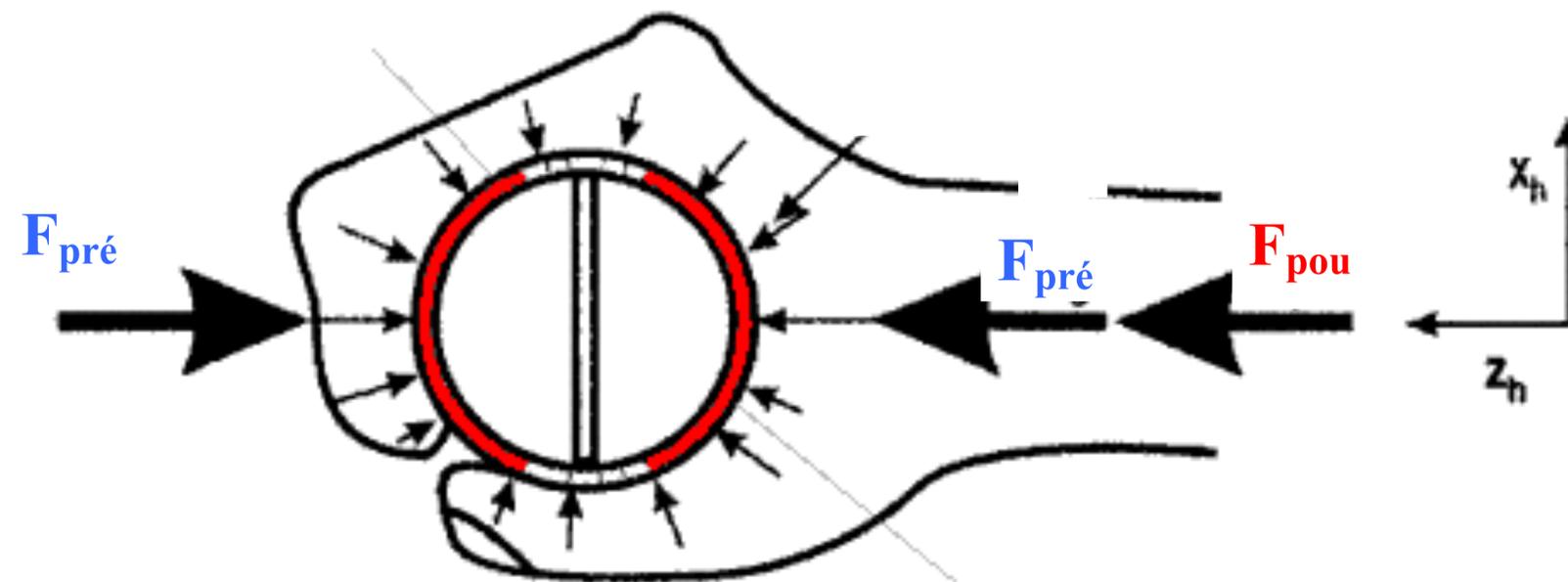
- L'exposition aux vibrations main-bras peut amener divers problèmes de santé aux niveaux circulatoire (syndrome de Raynaud) et nerveux (perte de sensibilité). Elle peut amplifier divers troubles musculosquelettiques
- La quantification de la dose vibratoire main-bras, en terme d'accélération pondérée à la poignée de l'outil vibrant, est effectuée selon les dispositions de la norme internationale ISO 5349-1
- Non prise en compte des forces de couplages (force de préhension et force de poussée) s'exerçant à l'interface main-poignée
- Les dispositifs actuels utilisés pour mesurer les forces de couplage sont beaucoup trop chers et difficiles à utiliser sur le terrain

Objectifs du projet

- **Développer et valider un système à faible coût permettant de mesurer les forces statiques de couplage (force de préhension, force de poussée) lors de l'opération d'outils portatifs**
- **Évaluer la possibilité d'utiliser ce système pour mesurer la force de couplage dynamique qui s'exerce à l'interface main-poignée lors de l'opération d'outils vibrants**

État des connaissances : Forces de préhension et de poussée

- Les principales forces s'exerçant sur une poignée sont les forces de préhension et de poussée
- Force de poussée : force appliquée sur la paume de la main, non compensée (pouvant être mesurée par une plate-forme de force)
- Force de préhension : force appliquée sur la paume de la main et les doigts, compensée (ne pouvant pas être mesurée par une plate-forme de force)

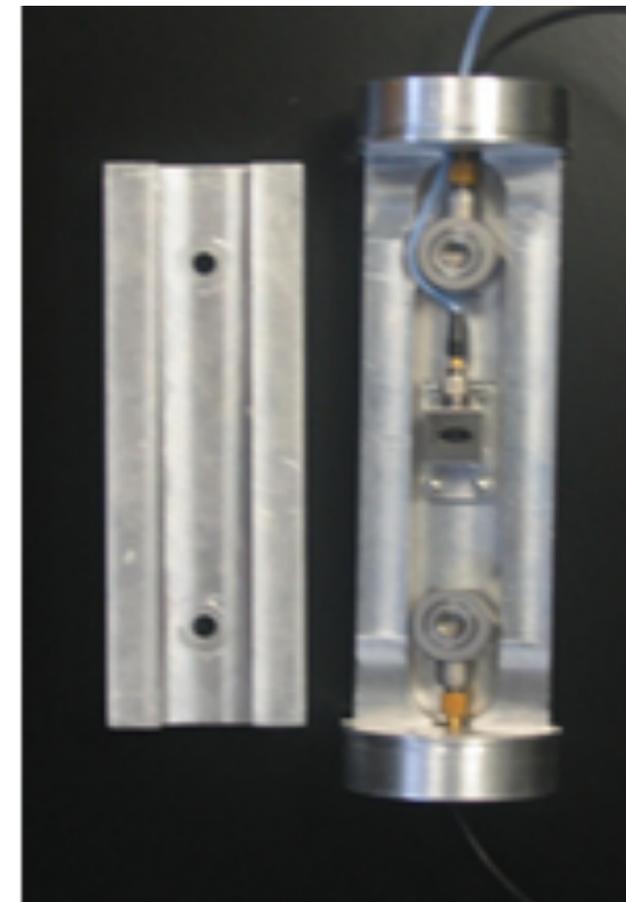
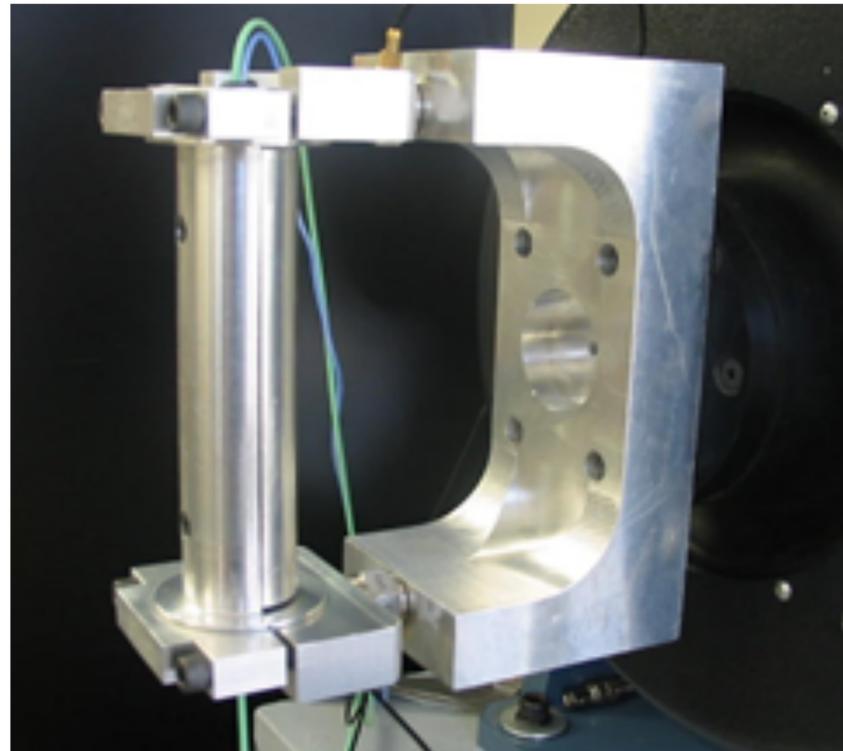
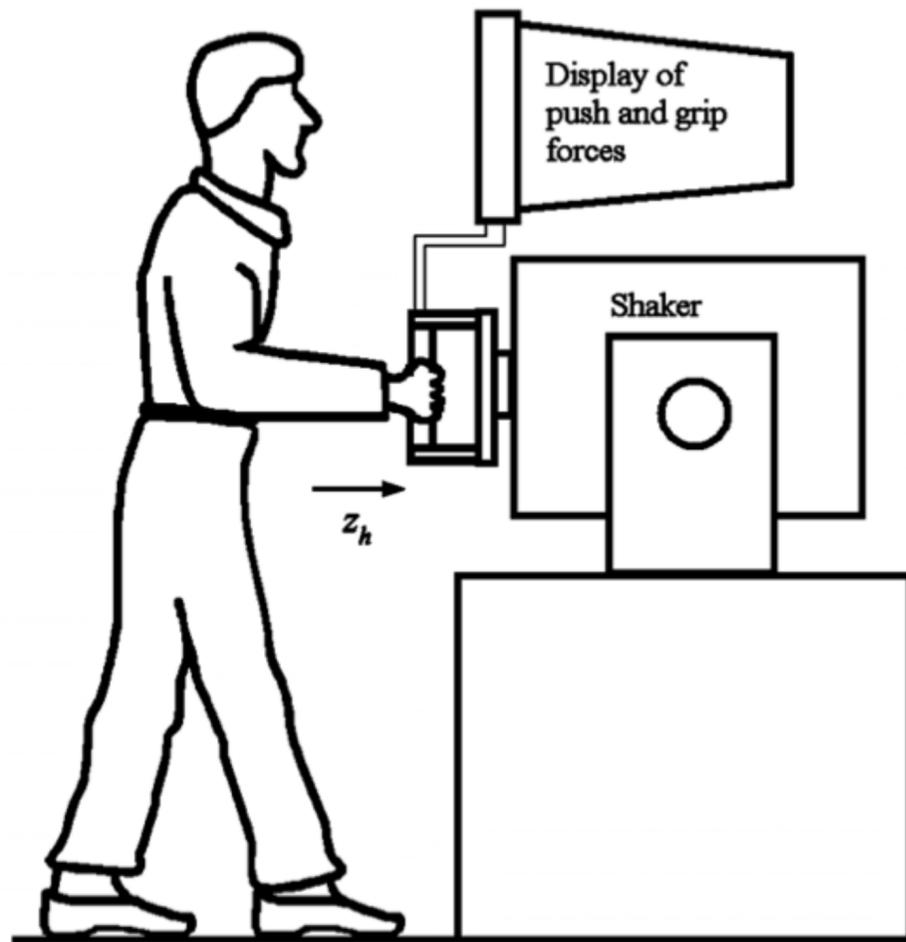


État des connaissances : Force de couplage

- Les forces de préhension et de poussée augmentent l'impédance mécanique du système main-bras (couplage plus élevé avec la source vibrante)
- On définit la force de couplage comme étant la somme des forces de préhension et de poussée
- Pour tenir compte de la force de couplage sur la dose vibratoire (accélération pondérée), il a été proposé de multiplier l'accélération pondérée par un facteur de couplage qui dépend de sa force

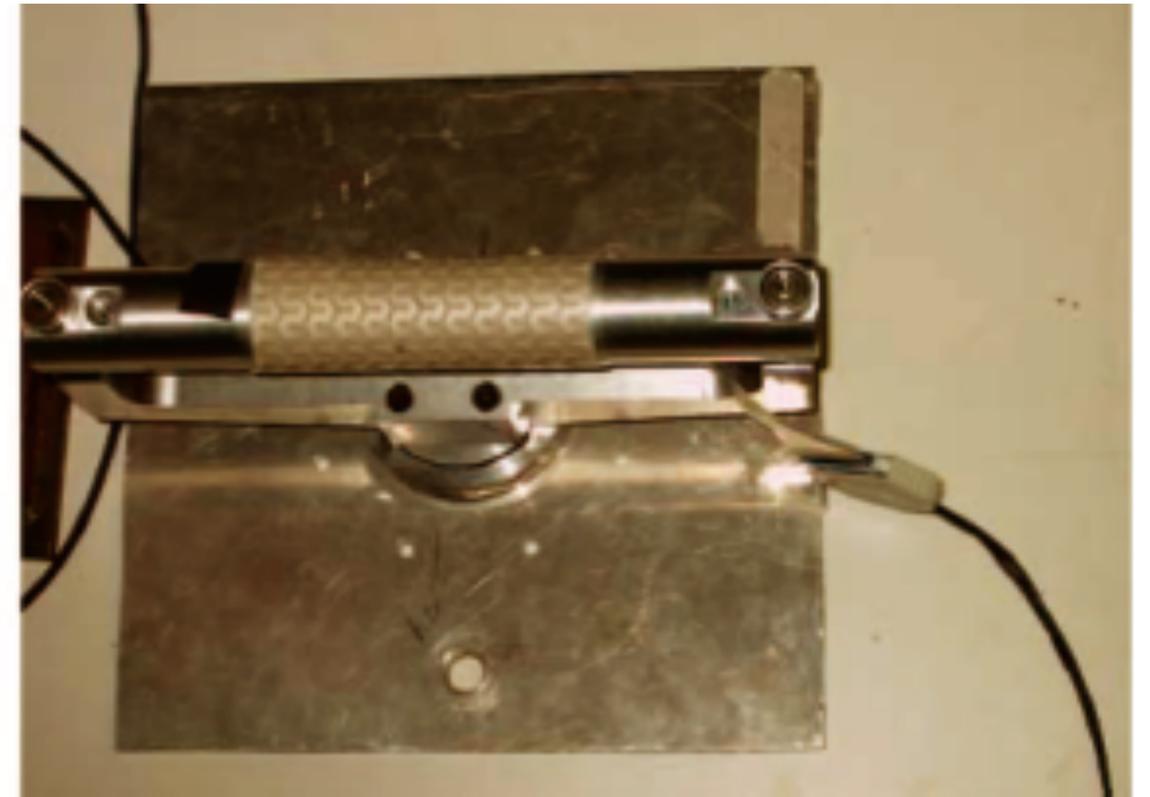
État des connaissances : Mesure des forces

- Les forces de préhension et de poussée sont mesurées en laboratoire, à l'aide d'une poignée instrumentée



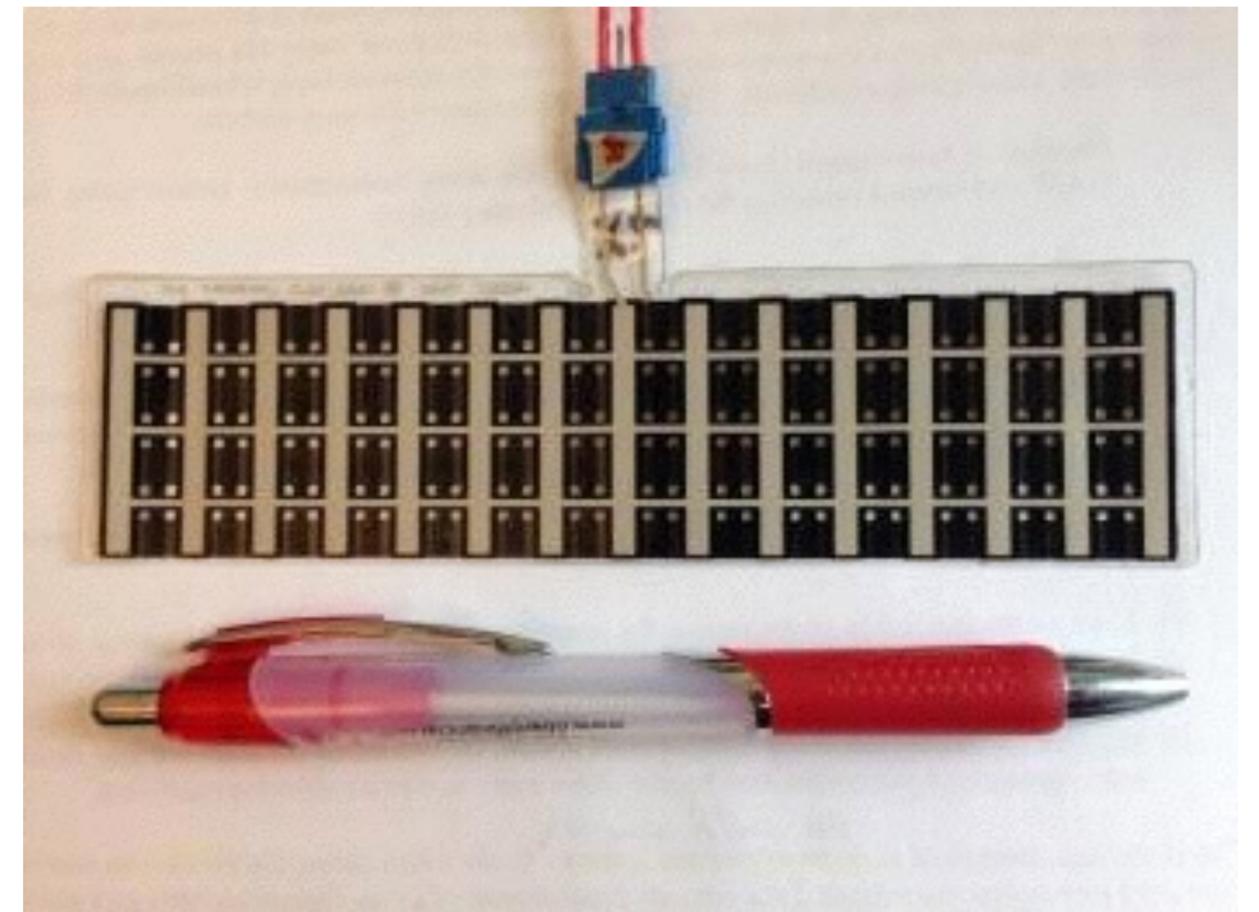
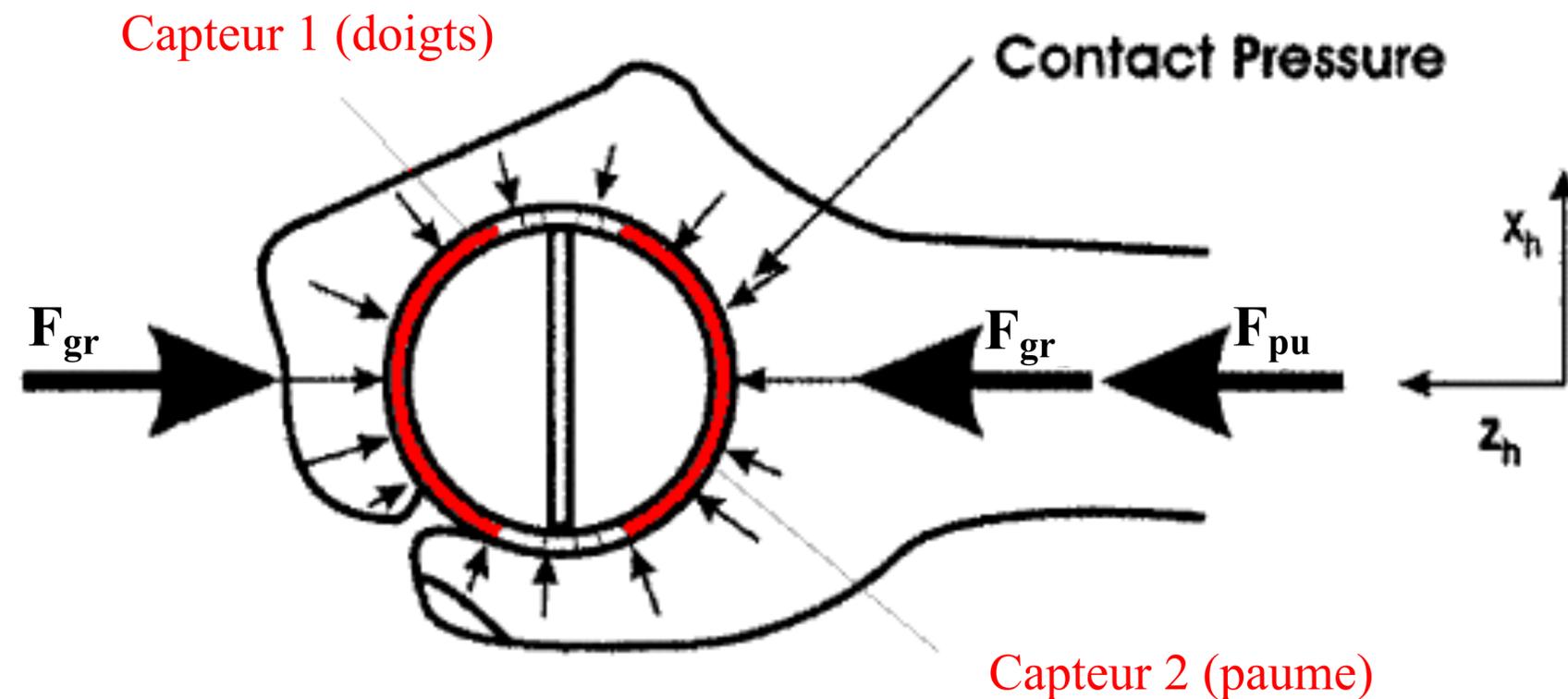
État des connaissances : Mesure des forces

Les forces de préhension et de poussée sont difficilement mesurables sur de vrais outils : équipement existant fragile et dispendieux (> 10 000 \$), difficile à mettre en œuvre sur le terrain



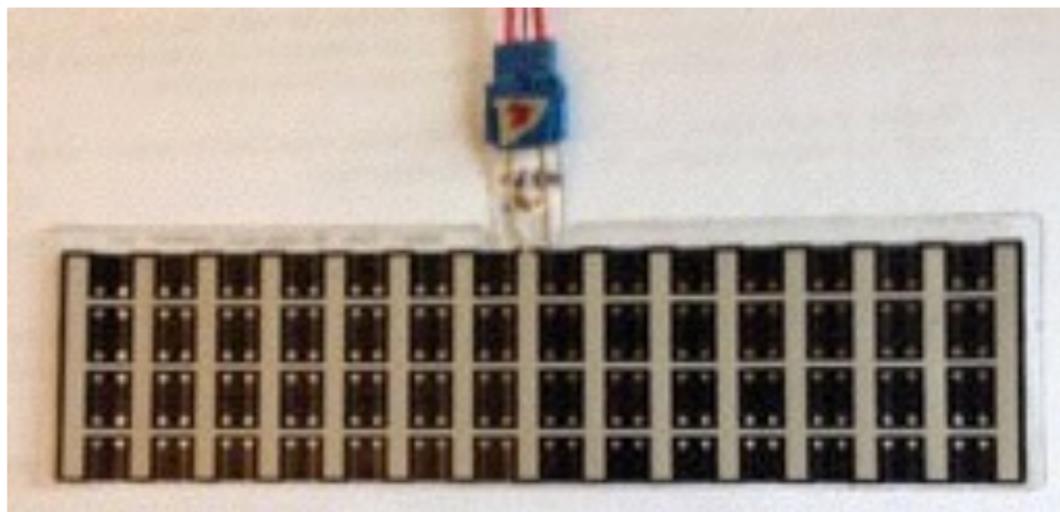
Hypothèse de recherche

Les forces de poussée et de préhension peuvent être mesurées adéquatement avec 2 capteurs de force distribuée, disposés de part et d'autre de la poignée



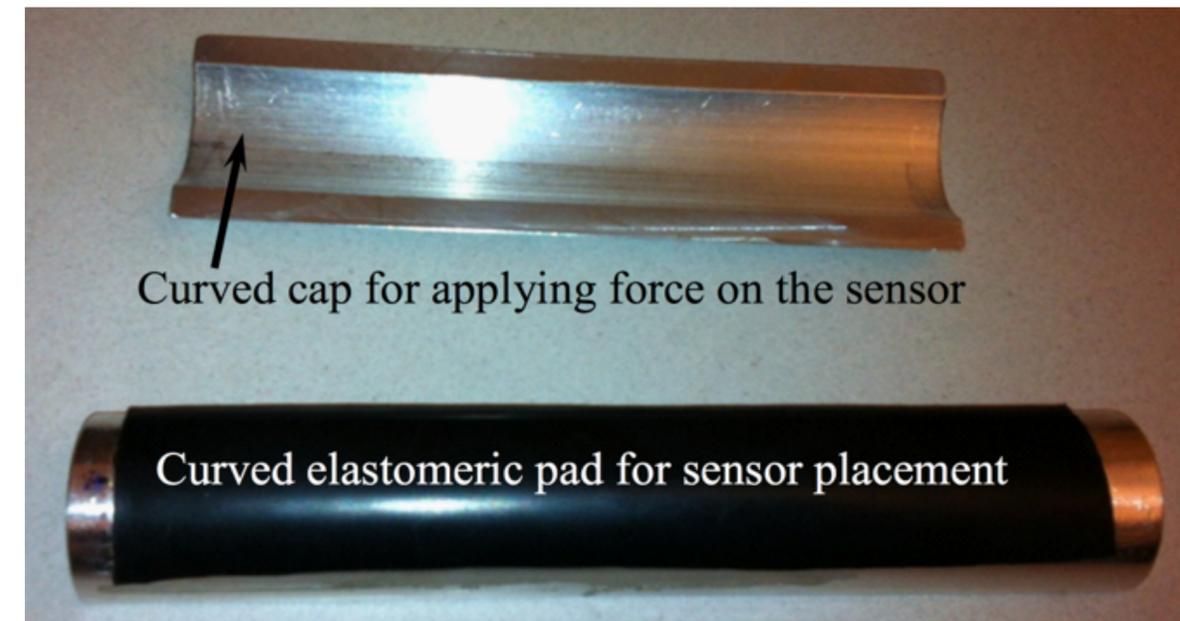
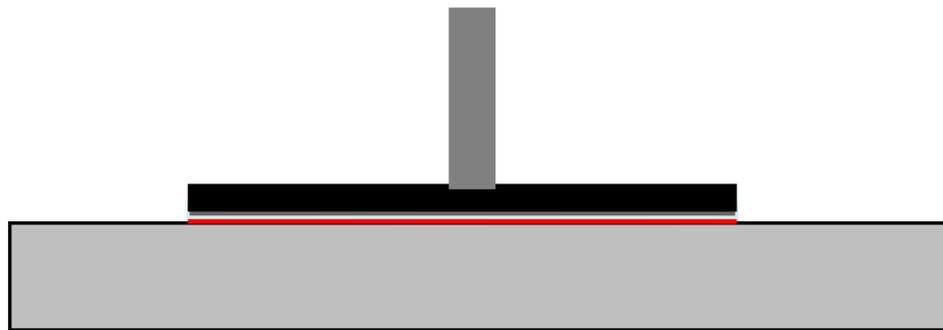
Méthode : Sélection du capteur

- Capteur Tekscan *Flexiforce*[®], modèle 1230
 - Faible coût : environ 35 \$ chacun
 - Mince, flexible, peut être appliqué sur une poignée d'outil
 - Capteur distribué sur une surface, ayant une résistance électrique qui varie avec la force appliquée sur le capteur
 - Circuit de conditionnement simple, permettant de fournir une tension électrique proportionnelle à la force
 - Peut être taillé aux dimensions voulues



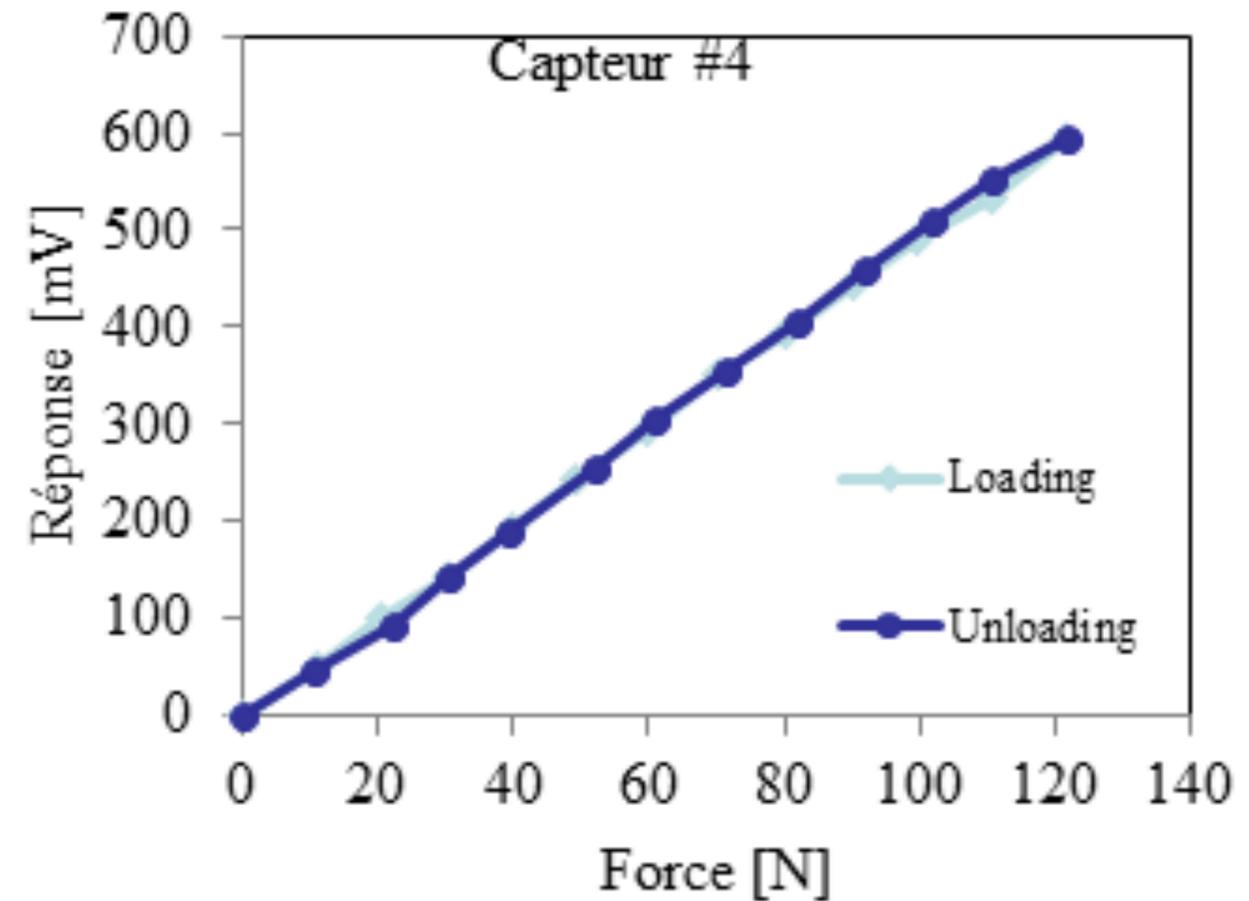
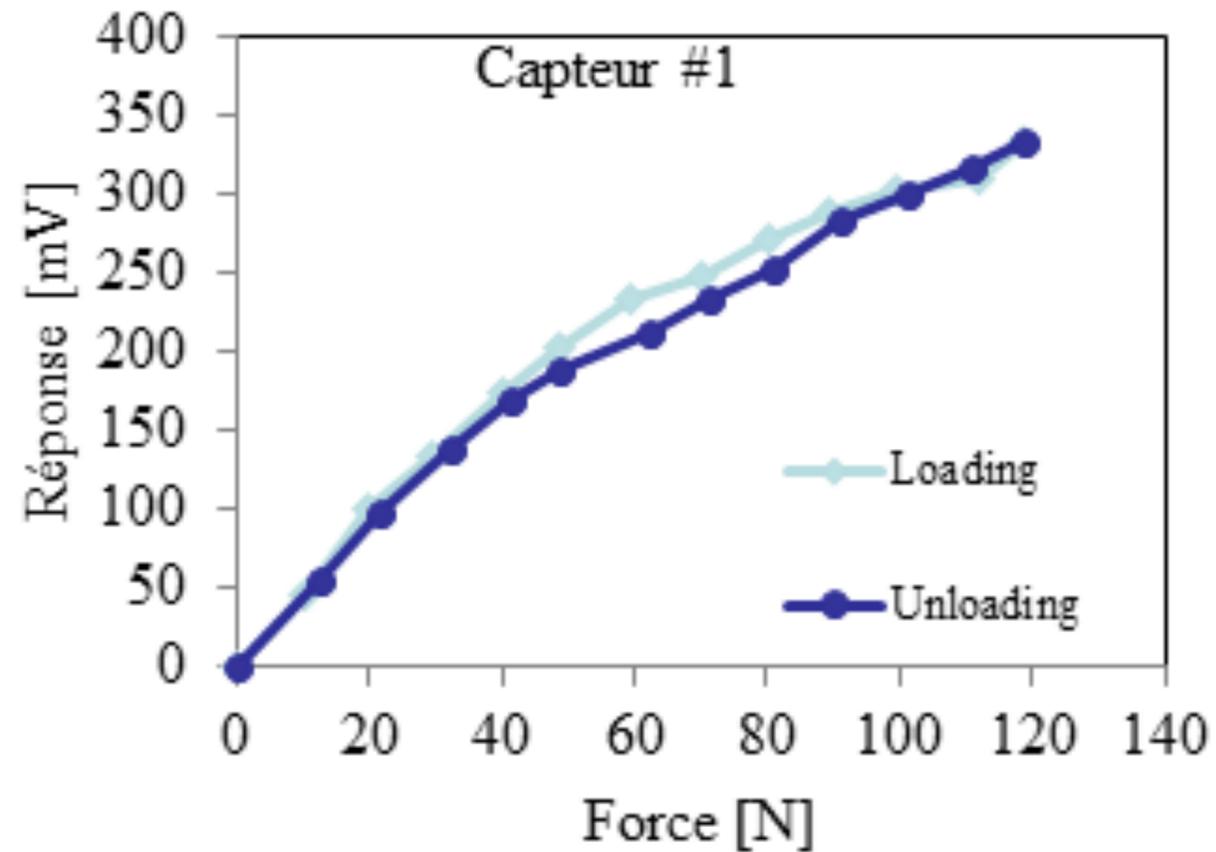
Méthode : Caractérisation du capteur

- Mesure de la sensibilité du capteur en fonction de la force appliquée :
 - Surface plane
 - Surface courbe
- Caractérisation de l'hystérésis, de l'effet d'une taille du capteur, de la répétabilité, de l'évolution de la sensibilité dans le temps



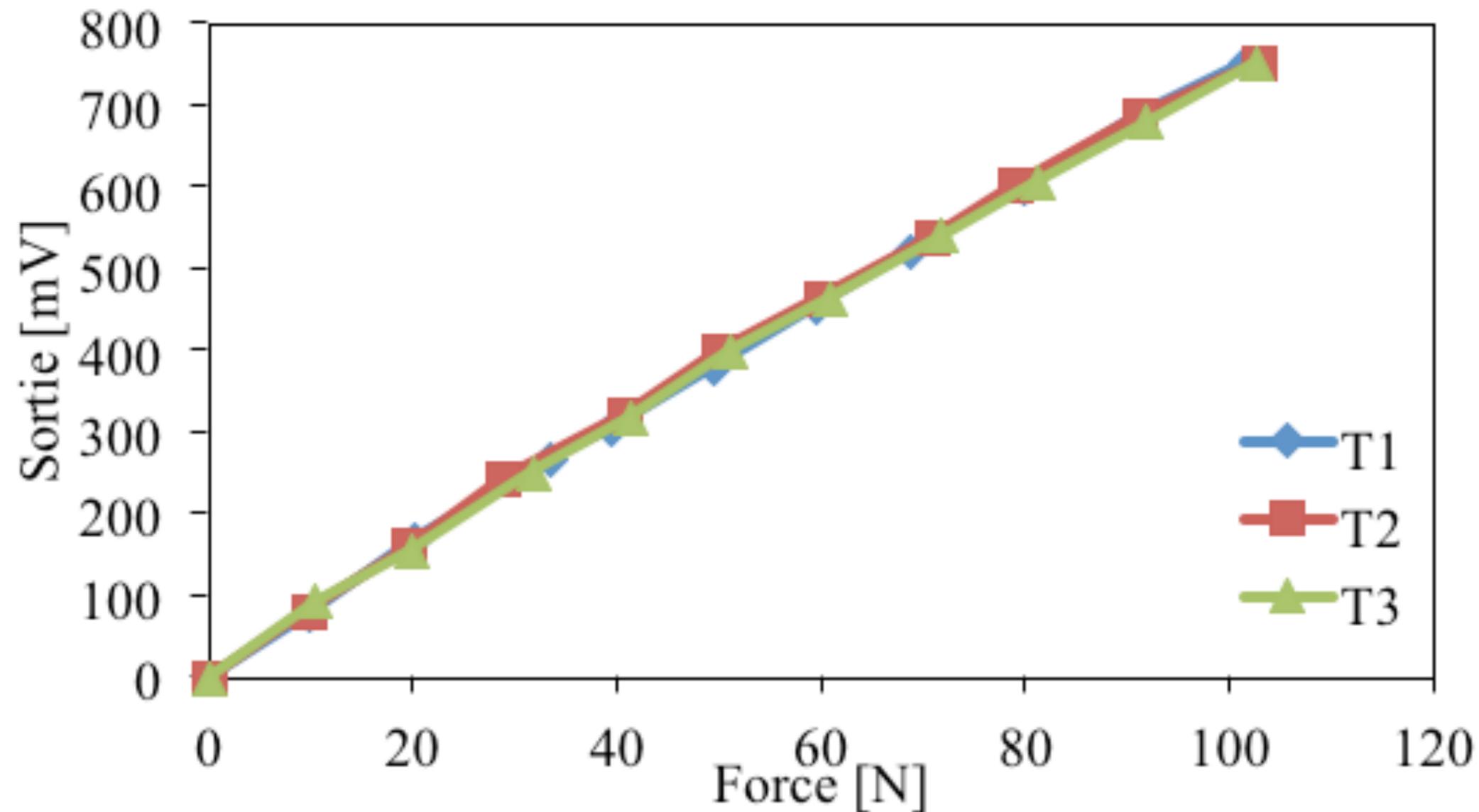
Résultats : Réponse des capteurs (surface plane)

- Réponse linéaire pour la plupart des capteurs testés (10/12)
- Faible hystérésis



Résultats : Répétabilité (surface courbe)

- Comparaison de 3 essais de chargement
- Bonne répétabilité des mesures



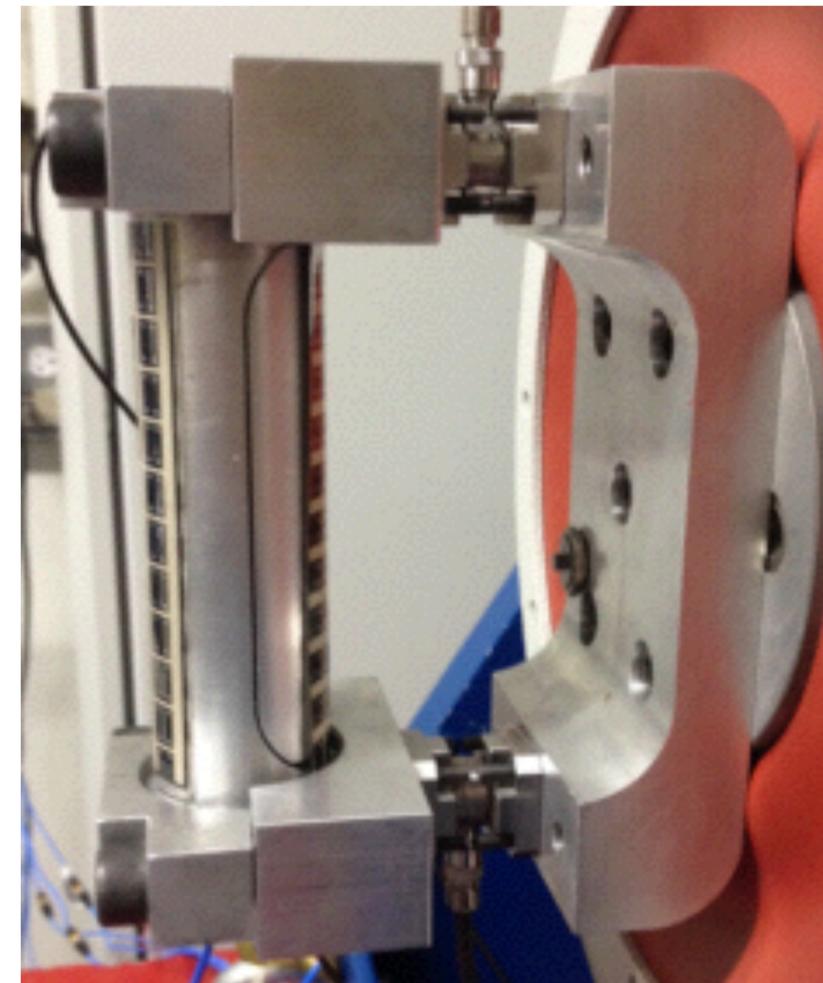
Résultats : Facteurs ayant une influence sur la sensibilité

- Usure des capteurs : sur une période de 24 jours, la sensibilité des capteurs a diminué d'un facteur allant de 22 à 40 %
- La longueur du capteur
- Une sensibilité différente d'un capteur à l'autre
- L'endroit où la force est appliquée sur le capteur
- La rigidité du matériau appliquant la force sur le capteur
- La courbure de la surface de calibration

Pour toutes ces raisons, il est nécessaire de calibrer le capteur « in situ » avant la mesure, dans les mêmes conditions que celles où il sera utilisé

Méthode : Caractérisation du capteur avec sujets humains

- Mesure de la sensibilité du capteur, sur une poignée instrumentée, en fonction des forces de poussée et de préhension
- 8 sujets humains
- 3 poignées cylindriques : 32, 38 et 43 mm et 2 elliptiques : 32 x 38 mm et 38 x 44 mm
- 12 combinaisons de forces de poussée (0 - 75 N) et de forces de préhension (10 - 50 N)
- Mesures effectuées en statique (sans vibrations) et en dynamique (avec vibrations)



Méthode : Caractérisation du capteur avec sujets humains

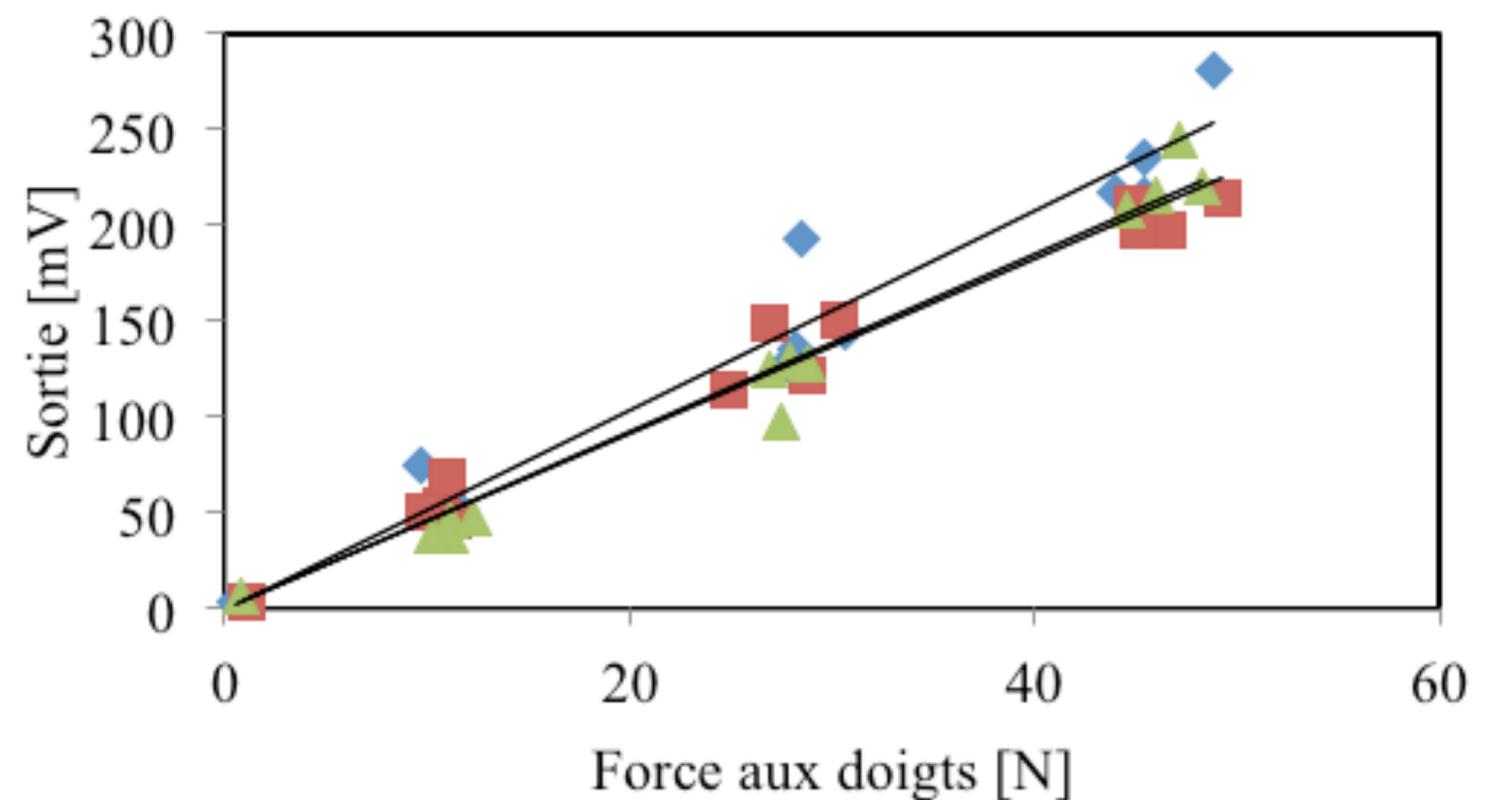
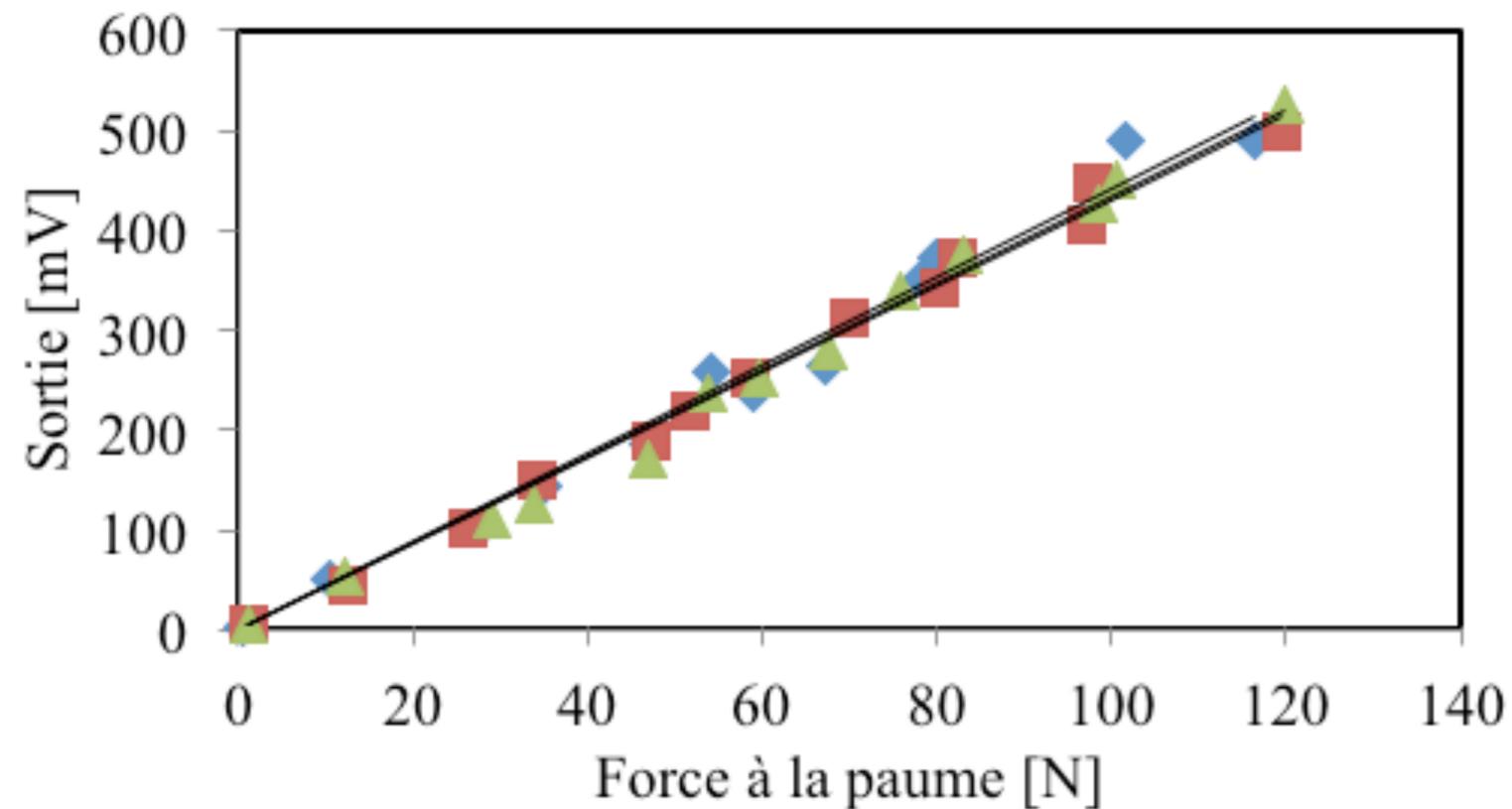
Les forces de poussée et de préhension peuvent être estimées à partir des forces mesurées à l'aide des 2 capteurs (paume et doigts) en utilisant les formules suivantes :

$$F_{\text{préhension}} = \frac{1}{2} (F_{\text{paume}} + F_{\text{doigts}} - |F_{\text{paume}} - F_{\text{doigts}}|)$$

$$F_{\text{poussée}} = F_{\text{paume}} - F_{\text{doigts}}$$

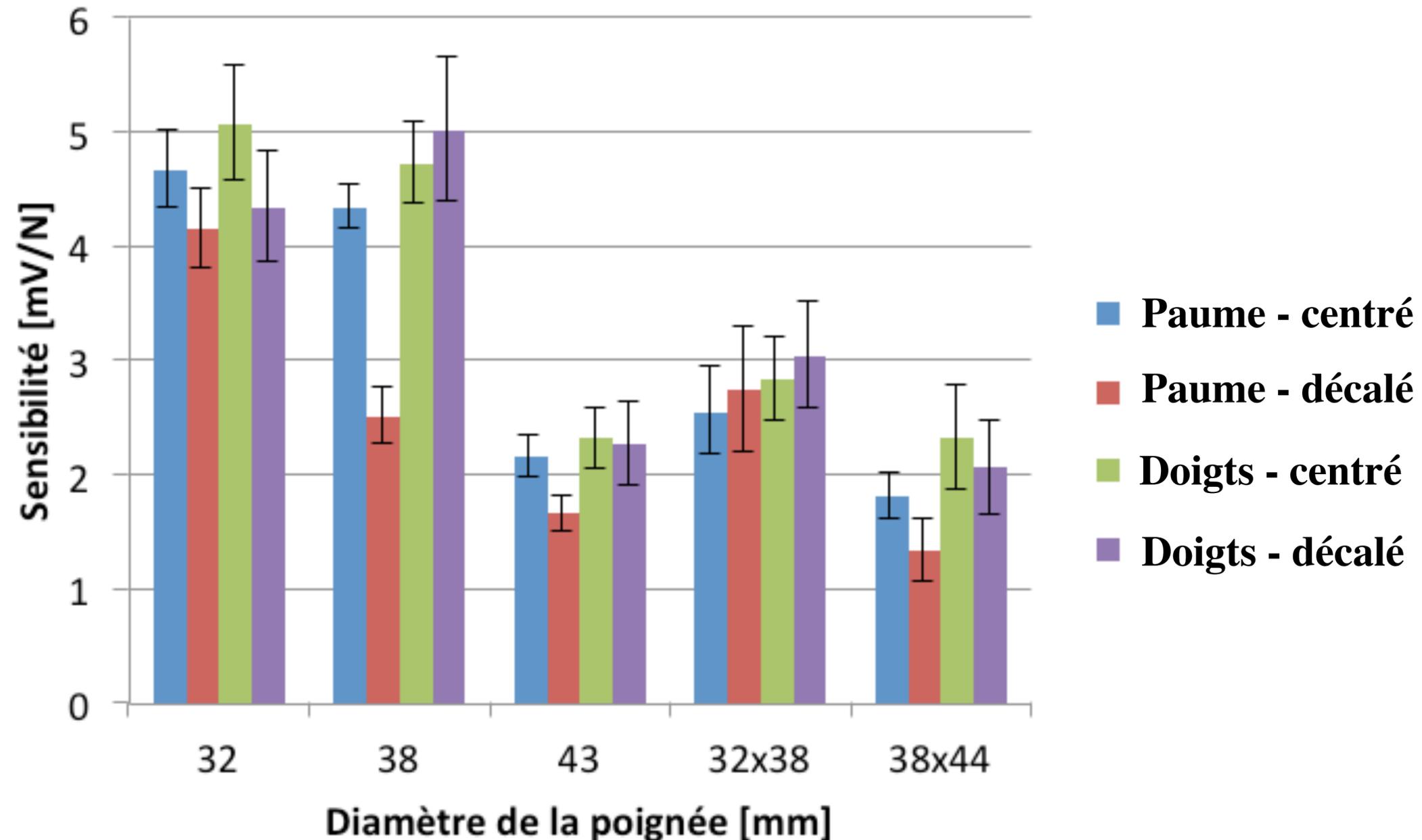
Résultats : Réponse des capteurs avec sujets humains

- Exemple de résultat pour un sujet : 3 essais
- Coefficient de corrélation élevé pour le capteur de la paume ($r^2 = 0,98$) et des doigts ($r^2 = 0,94$)



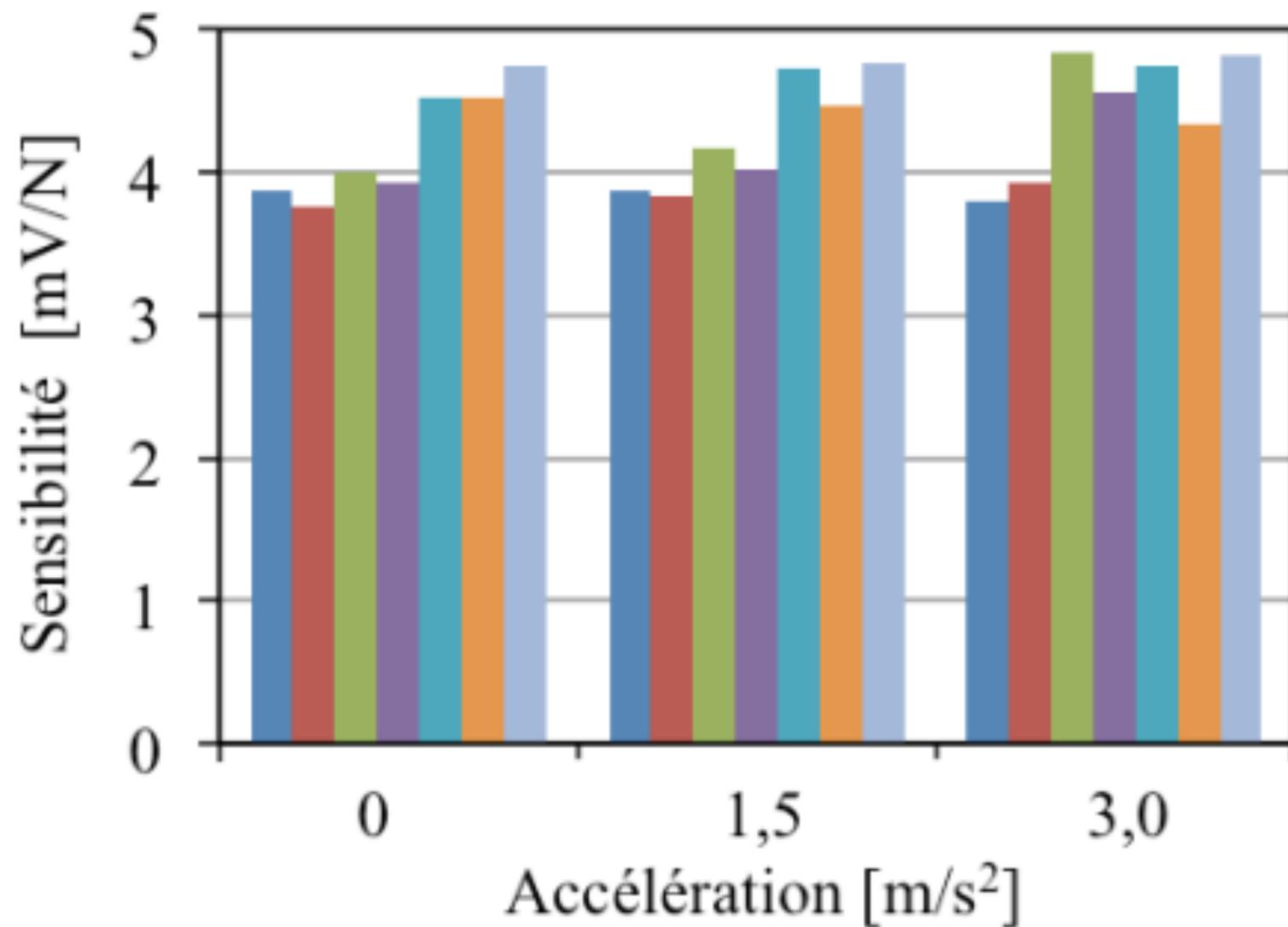
Résultats : Effet de décaler le capteur de 5 mm

- 8 sujets, 12 combinaisons de forces de poussée et de préhension

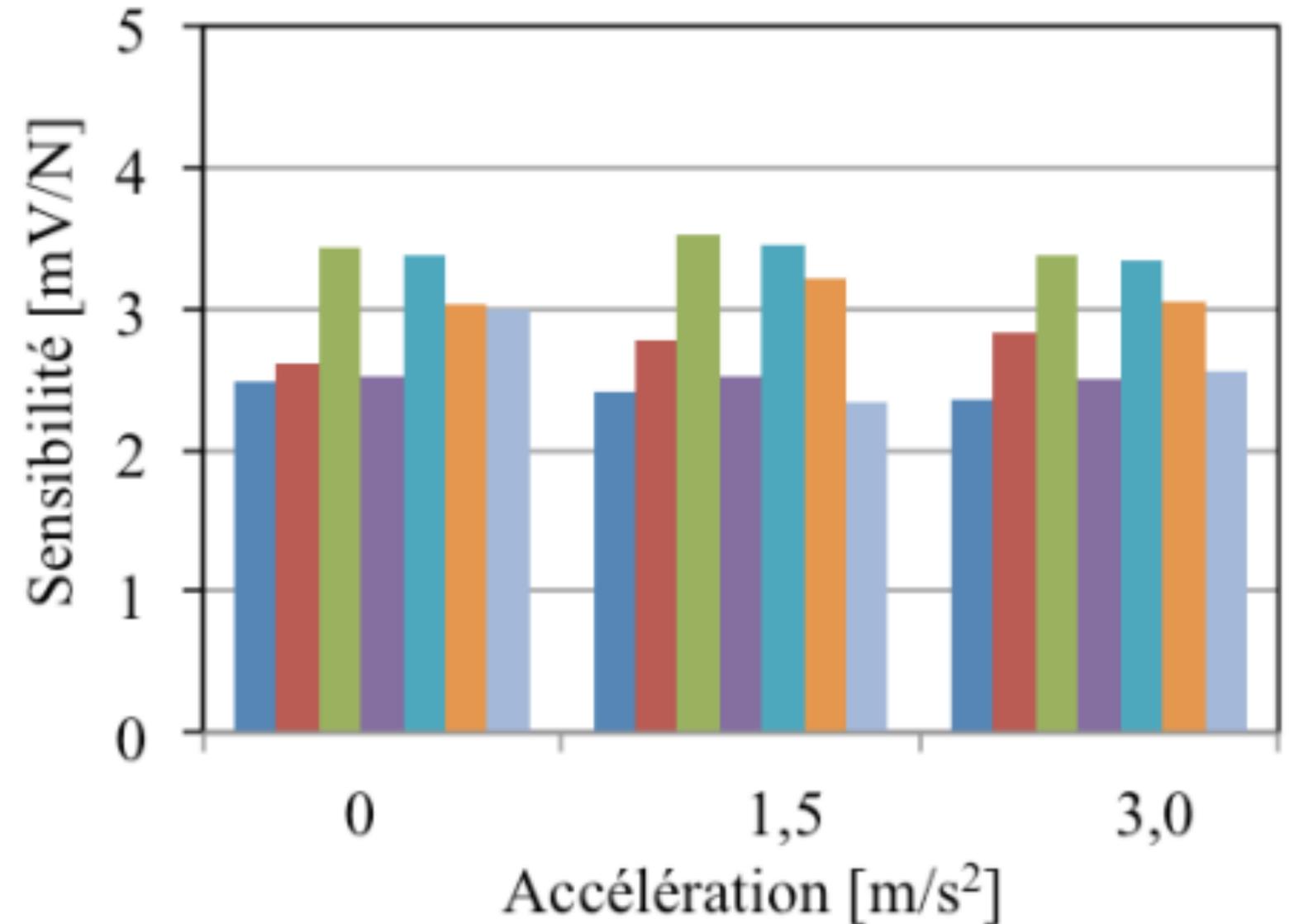


Résultats : Variabilité entre sujets

- 7 sujets, 12 combinaisons de forces de poussée et de préhension



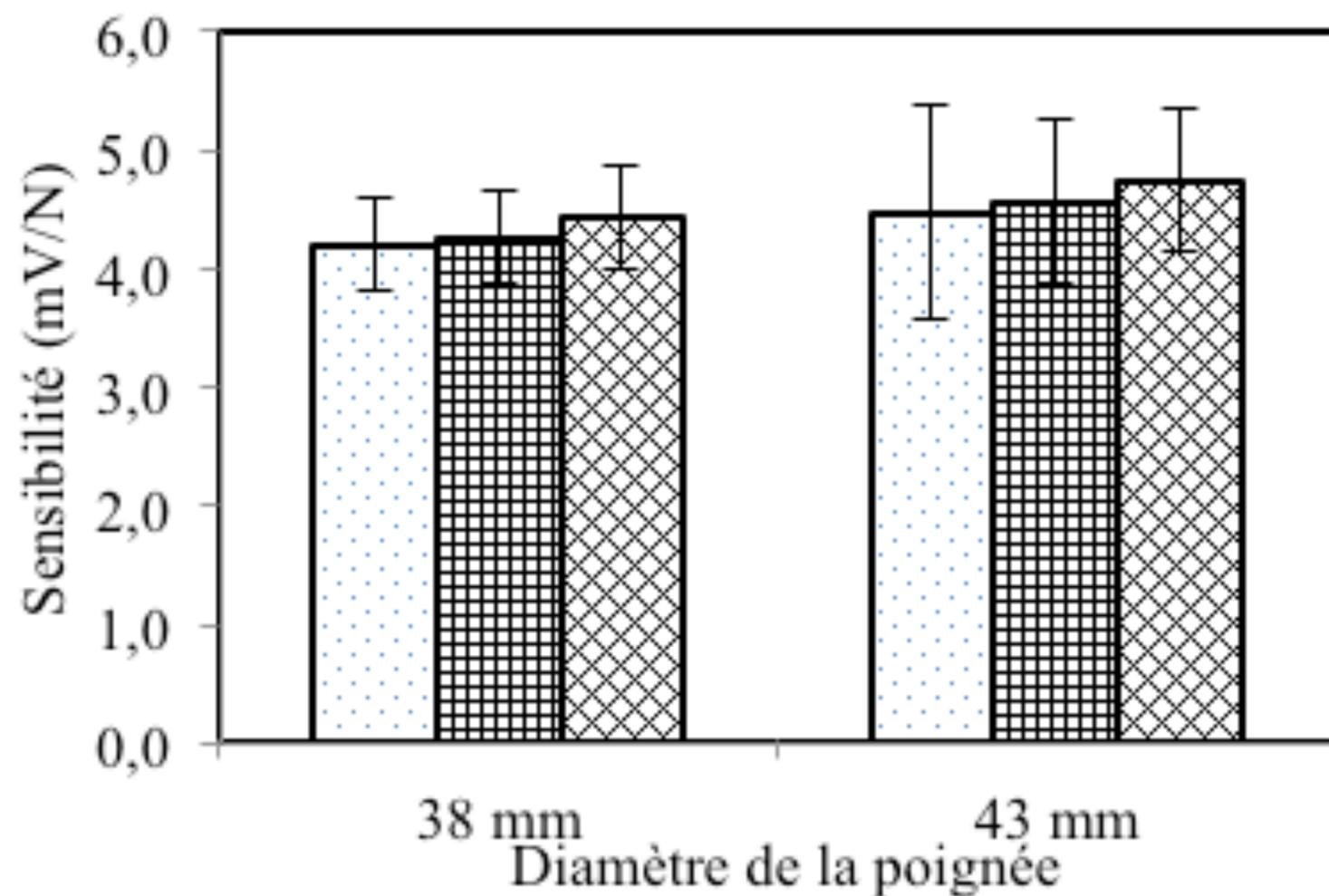
Paume



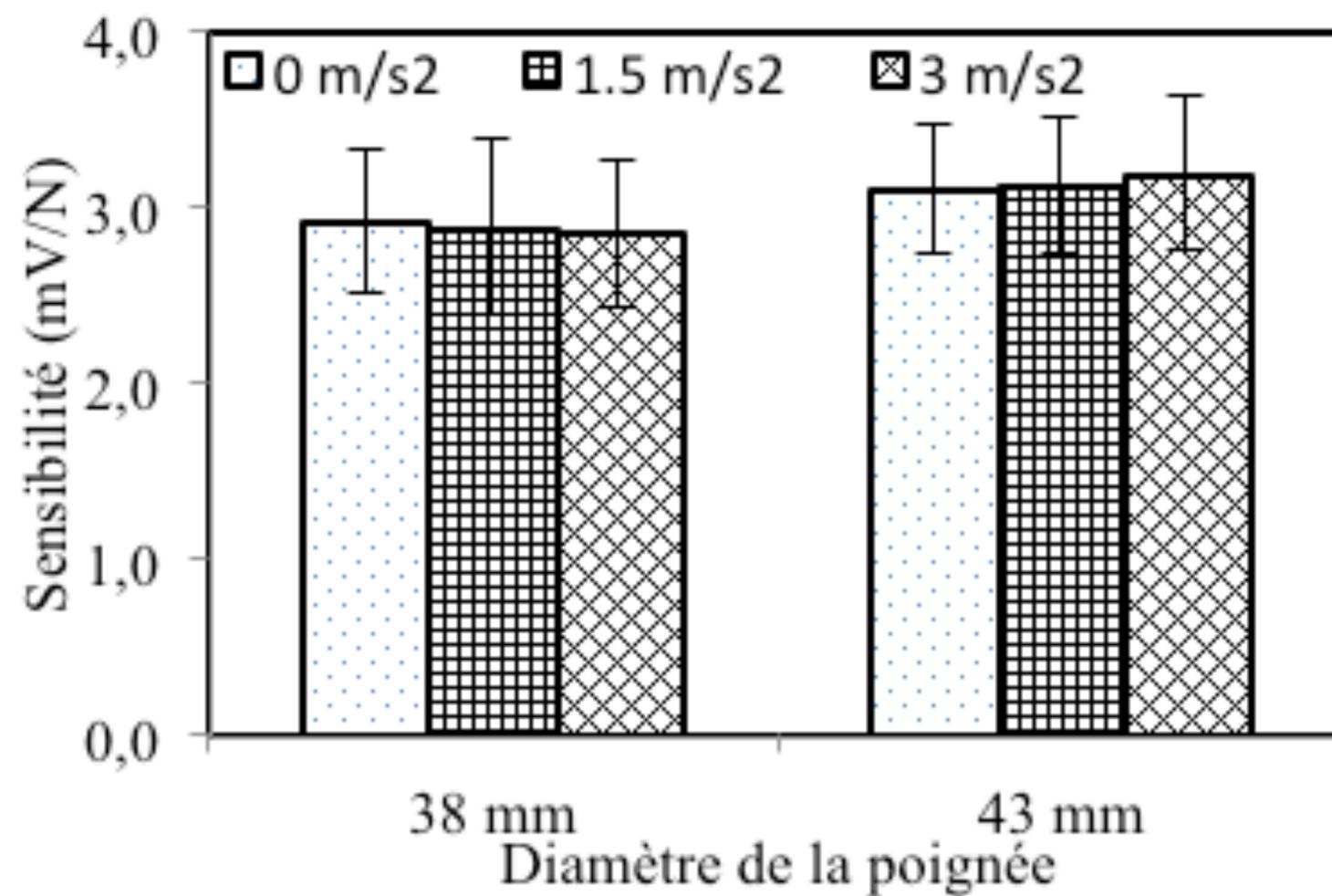
Doigts

Résultats : Effet des vibrations

- Pas d'effet significatif de la présence de vibrations



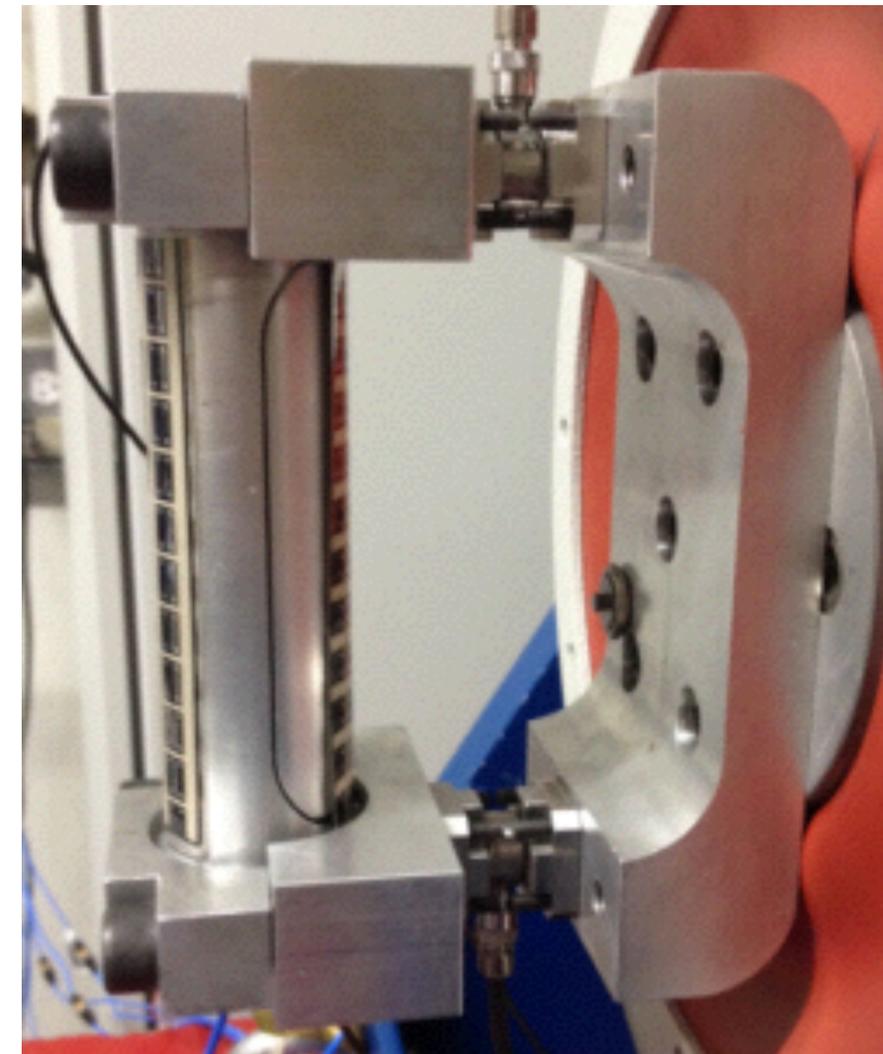
Paume



Doigts

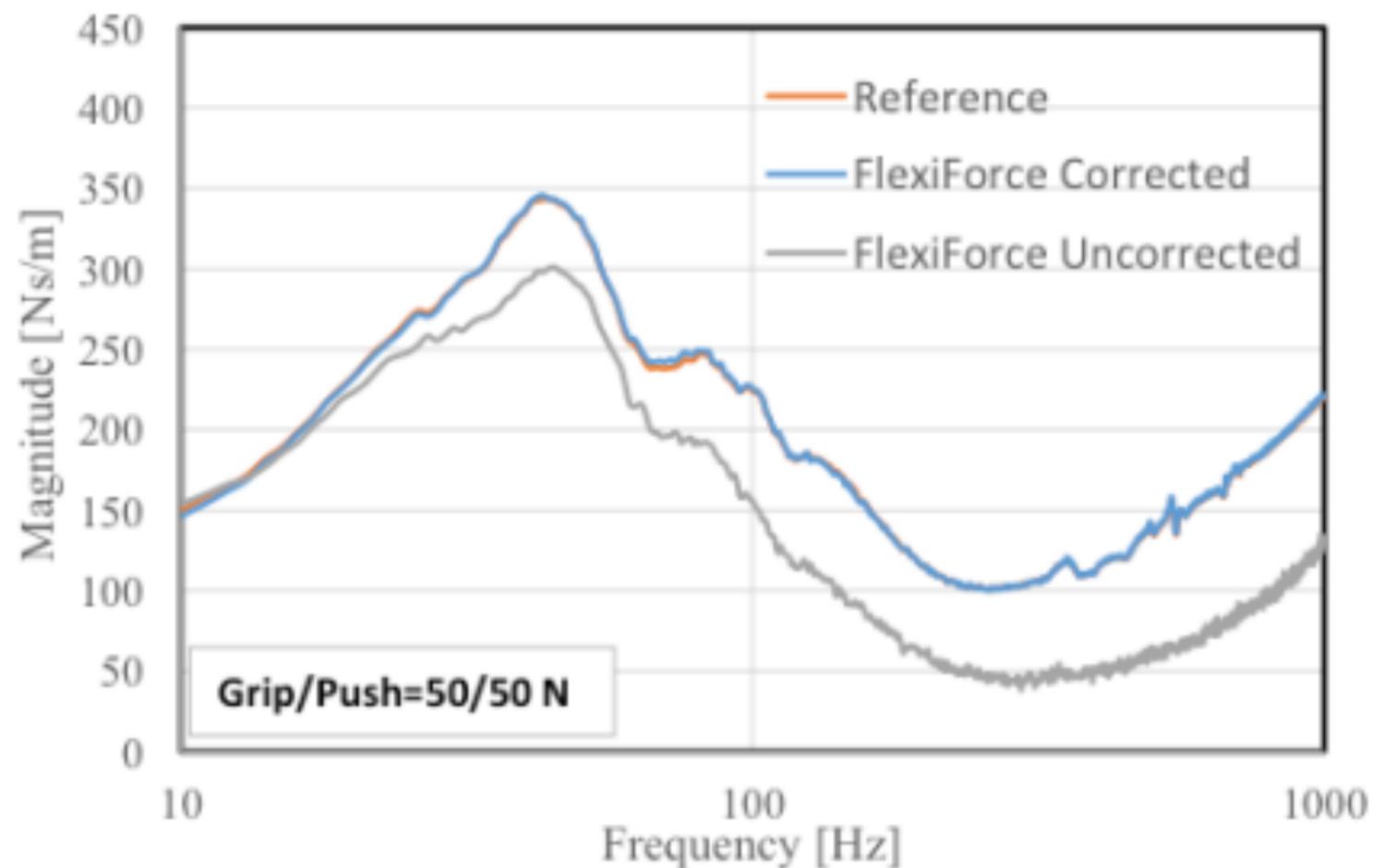
Méthode : Estimation de la réponse biodynamique

- Mesure de l'impédance mécanique de la paume et des doigts (séquentiellement) par une poignée instrumentée ainsi que par les capteurs *Flexiforce*[®]
- 6 sujets humains
- Poignée cylindrique de 38 mm
- 9 combinaisons de forces de poussée (25, 50 et 75 N) et de forces de préhension (10, 30 et 50 N)
- Mesures effectuées pour un bruit blanc dans la bande de 4 – 1 000 Hz pour 2 niveaux d'accélération efficace pondérée : 1,5 et 3 m/s²

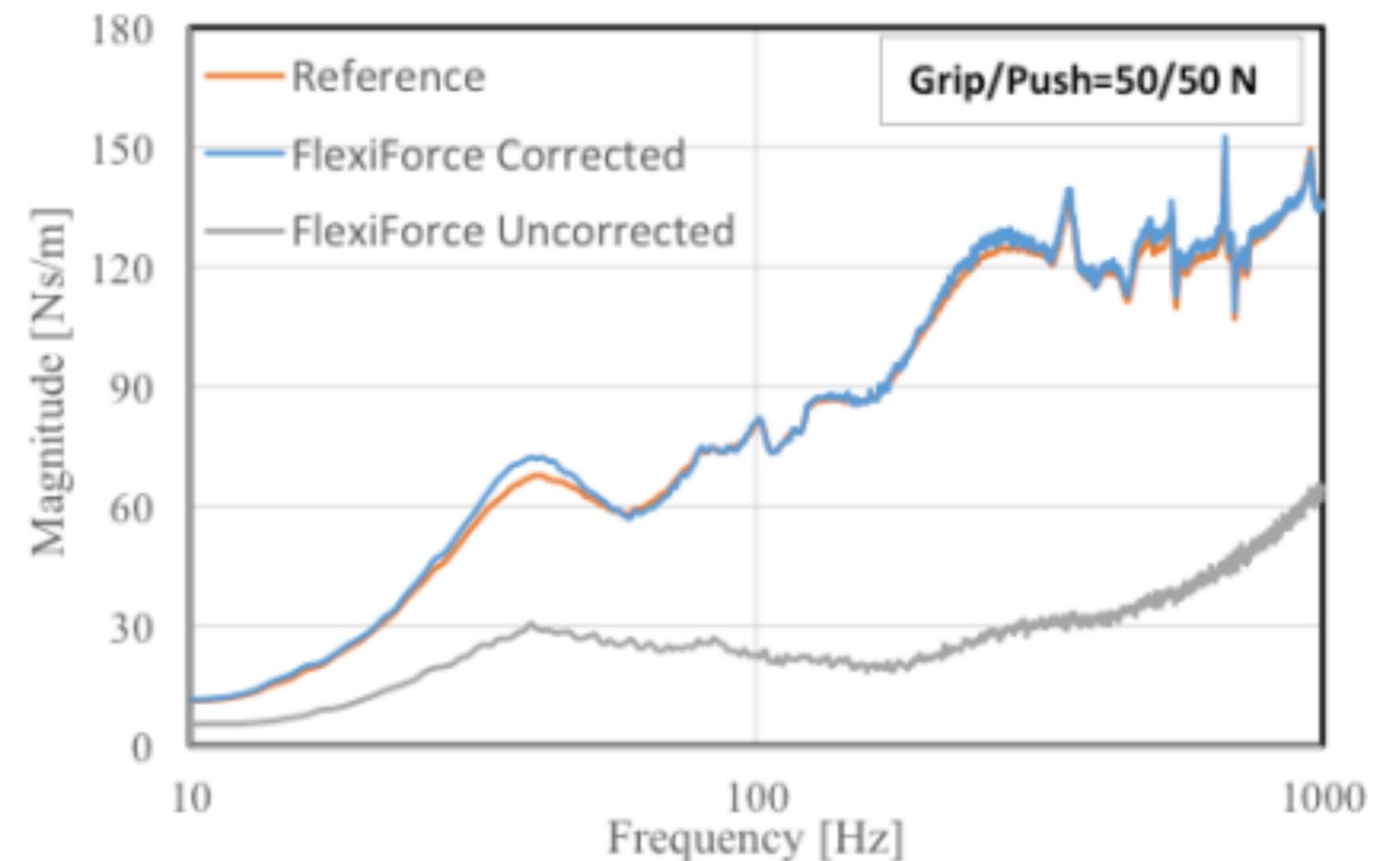


Résultats : Réponse biodynamique

- Impédance mécanique mesurée par la poignée instrumentée versus capteurs *FlexiForce*®
- Possibilité de corriger la réponse en fréquence du capteur



Paume



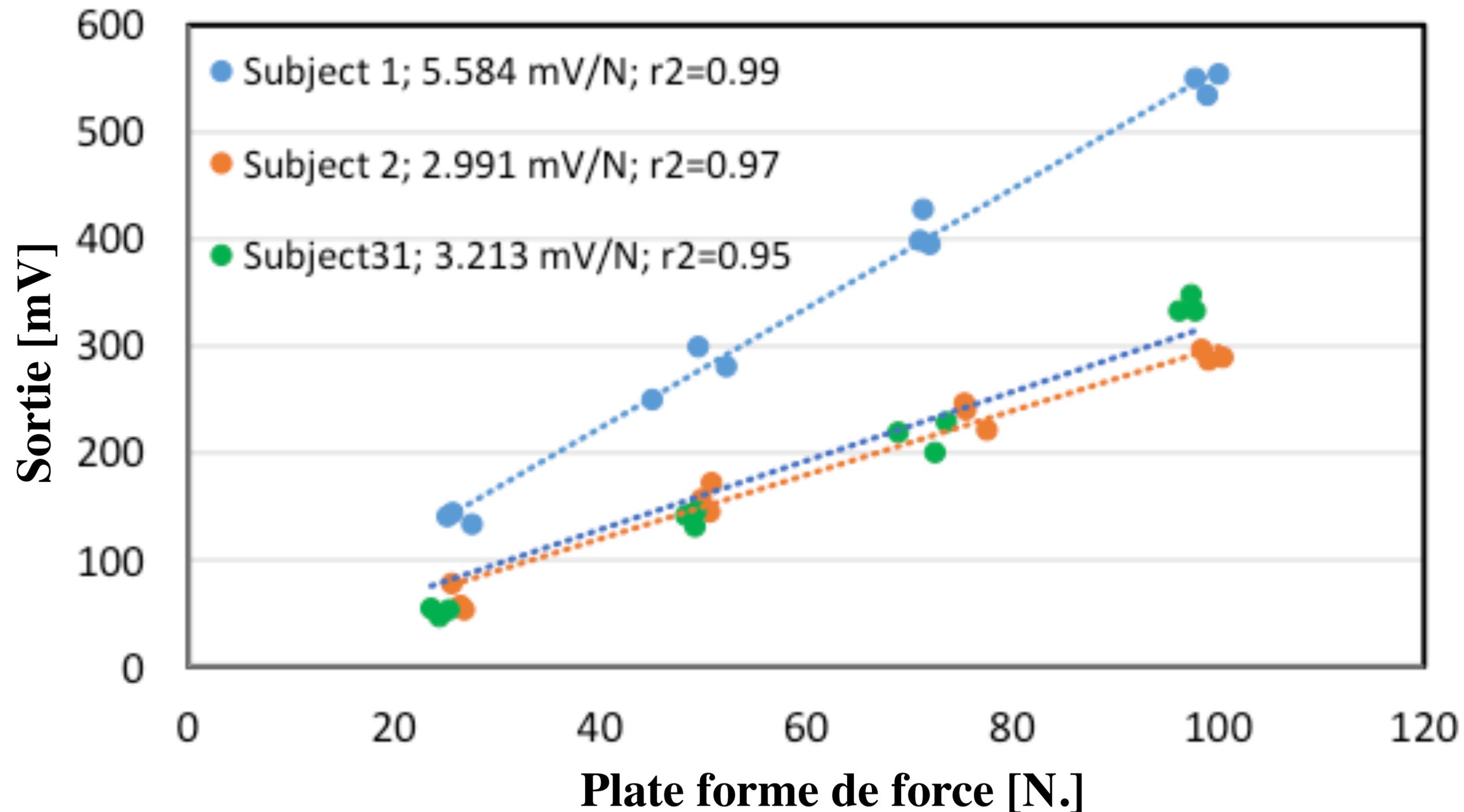
Doigts

Méthode : Validation sur un outil réel

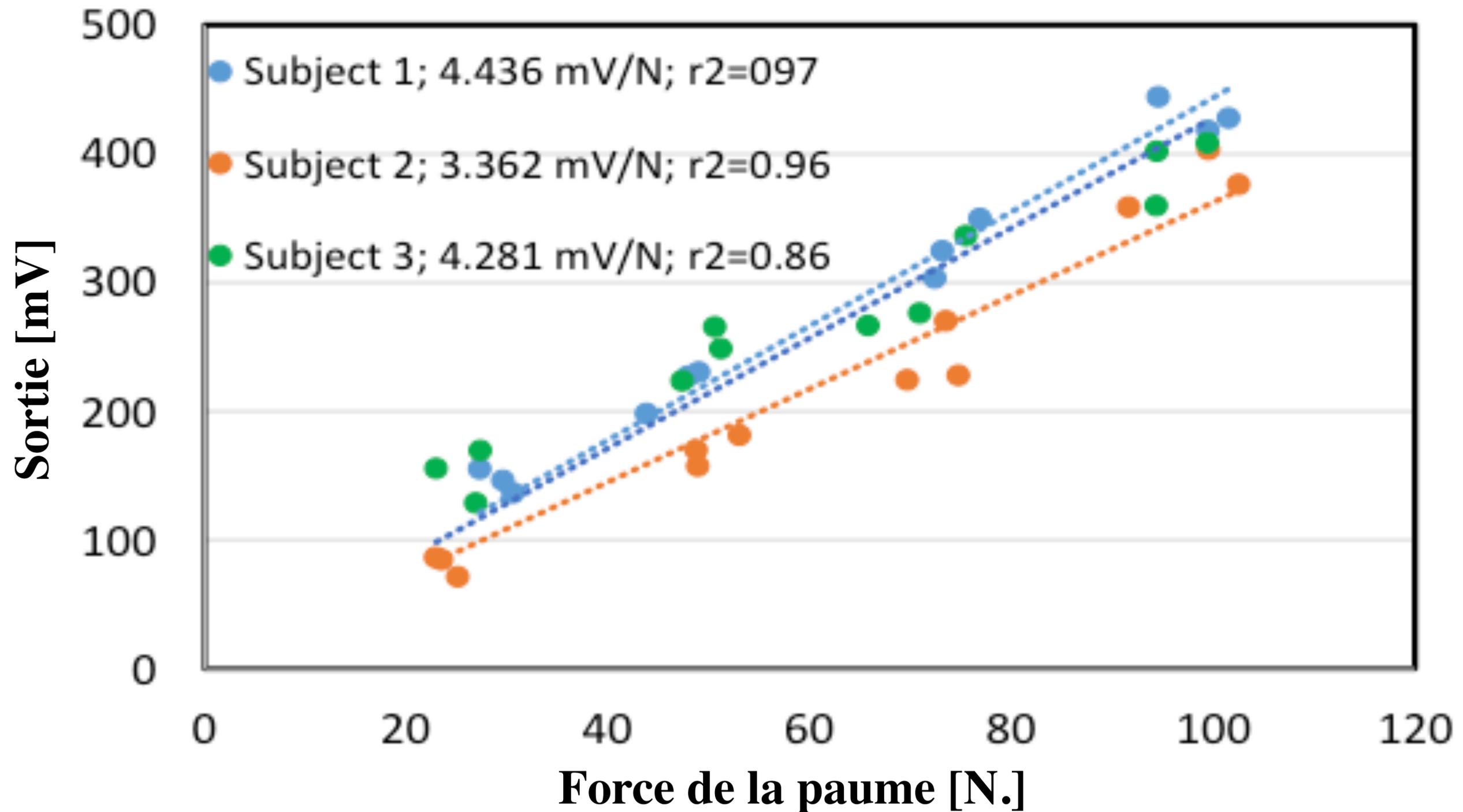
- Outil : marteau burineur
- 3 sujets
- Calibration du capteur de la paume (haut) :
4 forces de poussée, calibration en utilisant la plate-forme de force
- Calibration du capteur des doigts (bas) :
4 forces de préhension, calibration en utilisant le capteur de paume
- Validation des capteurs pour différentes combinaisons de forces



Résultats : Calibration du capteur de la paume

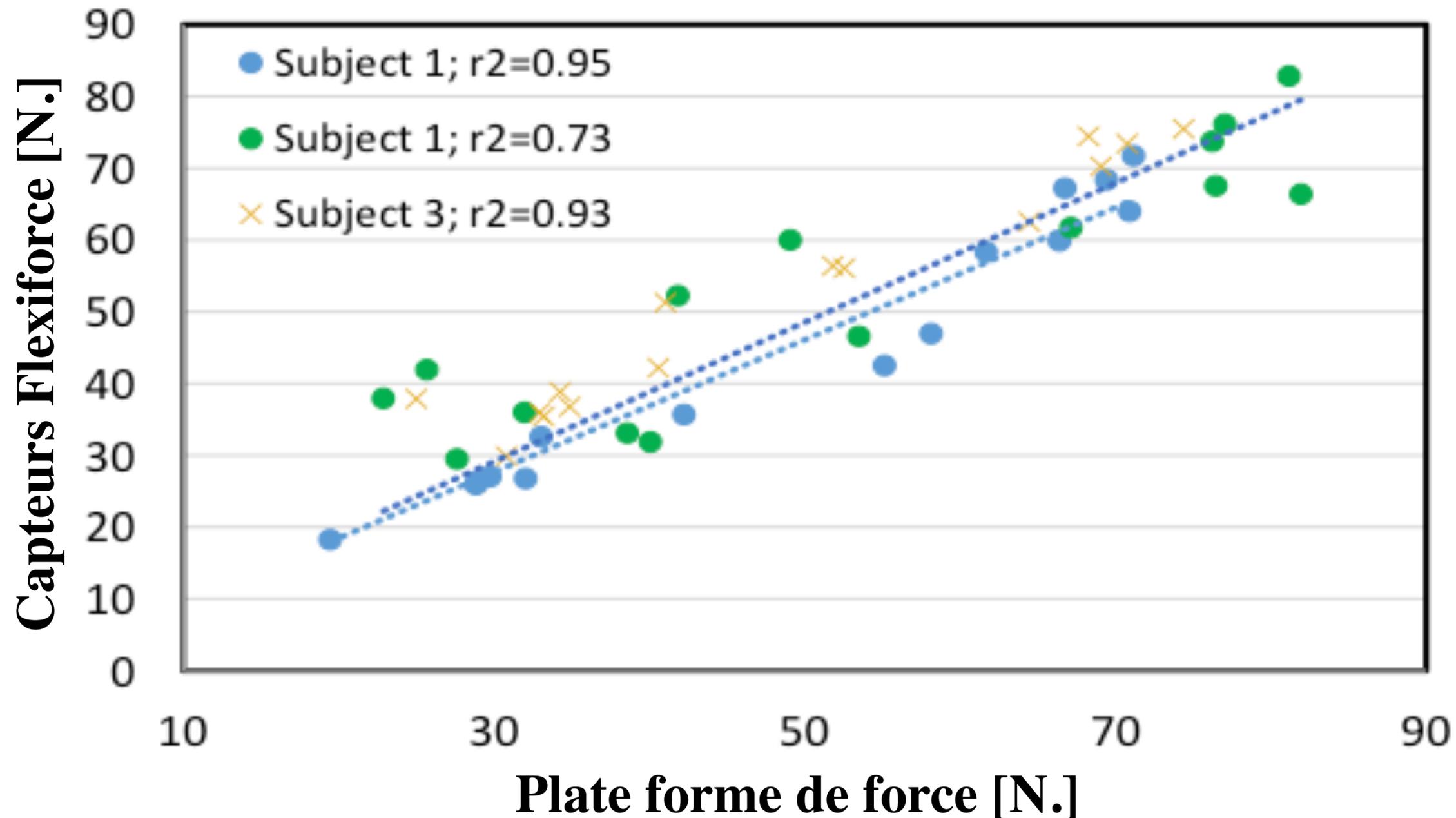


Résultats : Calibration du capteur des doigts



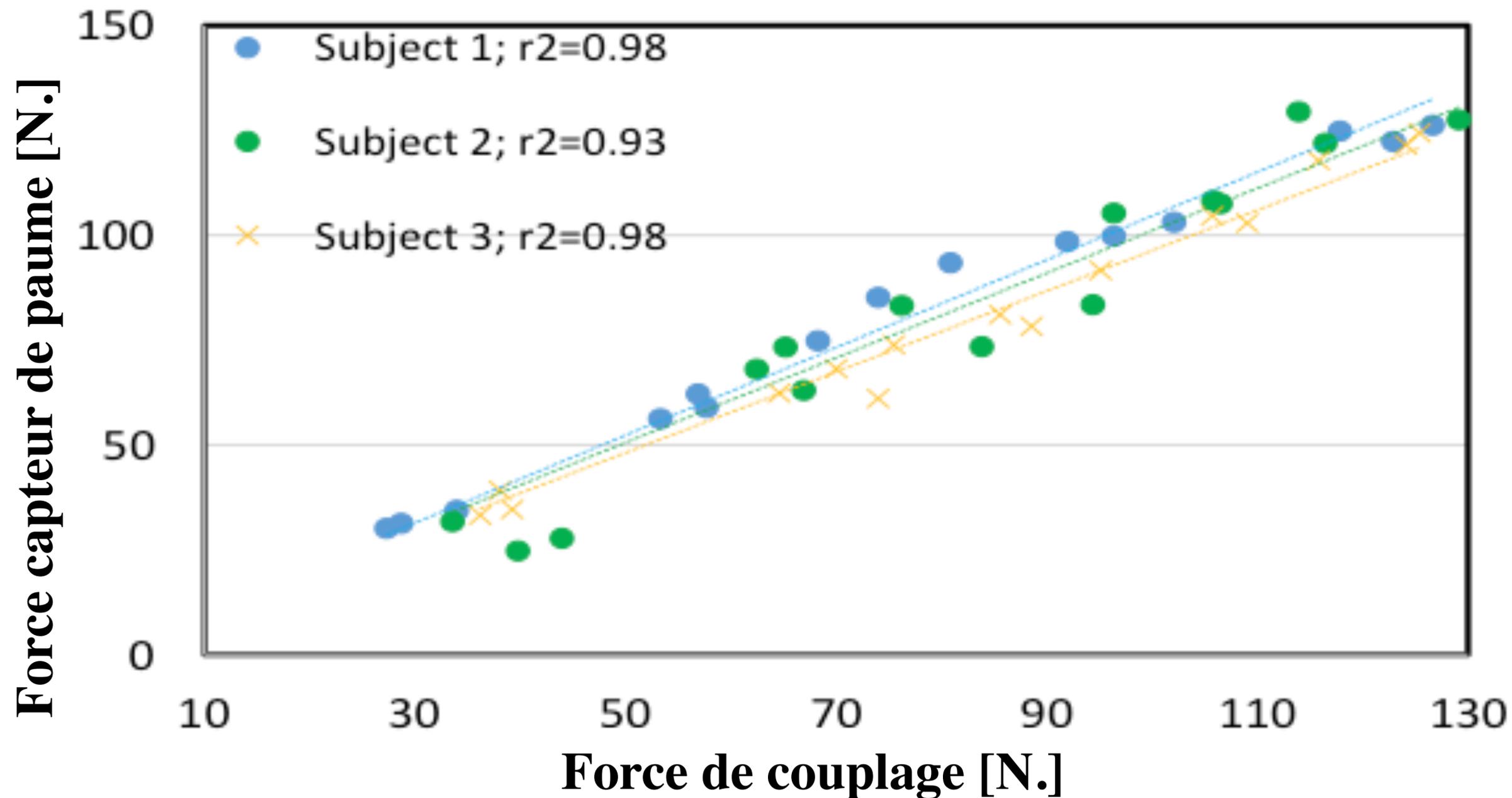
Résultats : Évaluation de la force de poussée

- Ratio des forces de poussée (Flexiforce/Plate-forme) : 0,92 - 1,06



Résultats : Évaluation de la force de couplage

- Ratio des forces de couplage (Flexiforce/F couplage) : 0,96 - 1,05



Conclusion

- Mise au point d'un capteur de faible coût, permettant de mesurer les forces de préhension et de poussée sur les poignées d'outils vibrants
- Le capteur a été caractérisé sur une surface plane et une autre courbe : bonne linéarité et faible hystérésis
- Le capteur a été validé sur 5 poignées instrumentées de formes et de diamètres différents avec 8 sujets : variabilité d'un capteur à l'autre ainsi que d'un sujet à l'autre
- Le capteur permet de bien estimer la réponse biodynamique (impédance mécanique) de la paume et des doigts moyennant une compensation de la réponse en fréquence du capteur
- La mesure des forces de poussée et de couplage a été validée sur une poignée d'outil à percussion (marteau burineur)