



Université Joseph Fourier Grenoble

# MEMOIRE

---

DIPLOME INTER UNIVERSITAIRE (D.I.U.) 2012  
Posturologie Clinique

Présenté par  
Cyril MARCHOU  
Podologue

**Evaluation de l'influence de la  
neuropathie diabétique sur la  
performance posturale grâce aux  
nouvelles méthodes de traitement du  
signal posturographique**

Professeur Dominic PERENNOU

---

# Remerciements :

---

A l'ensemble des intervenants de ce D.I.U. de Posturologie pour la qualité de leur enseignement.

A mes parents.

A Valérie et nos enfants pour leur soutien et leur patience.

Aux amis pour leur exemple et leurs encouragements.

---

## **Plan :**

1/Introduction	page 1
2/Matériel et méthode	page 5
3/Résultats	page 15
4/Discussion	page 21
5/Conclusion	page 25
6/Résumé	page 26
7/Références bibliographiques	page 27

---

# 1/ INTRODUCTION

Les Pédicures Podologues ont logiquement constaté une augmentation des consultations des diabétiques à partir du décret du 24 Décembre 2007 où l'absence de prise en charge antérieure à celui-ci constituait un frein à l'accès aux soins (Séances de prévention des lésions des pieds chez le patient diabétique, par le Pédicure-Podologue, HAS juillet 2007).

Je me suis alors intéressé aux conséquences de cette maladie. La triade affectant le « pied diabétique » (artériopathie, prédisposition aux infections, neuropathie périphérique) est connue et ses conséquences (comme le mal perforant plantaire) ont été abondamment décrites et étudiées ... Mais la neuropathie périphérique a-t-elle un impact sur la qualité du contrôle postural ?

L'étude de diabétiques polyneuropathiques (Horak, Dickstein et Peterka 2002) montre en effet des oscillations posturales plus importantes que chez les sujets sains sauf sur surface oscillante, suggérant une perte plus importante des informations sensorielles plantaires que des informations des angles de mouvement des chevilles notamment. Les enregistrements électromyographiques réalisés par Simmons et

Richardson (2001) sur plate-forme mobile révèlent une incapacité à générer une réponse neuromusculaire cohérente dans le temps (tibial antérieur, gastrocnémien) contribuant à une oscillation posturale plus importante chez les diabétiques avec perte de sensibilité plantaire.

Rappelons que la stabilité posturale est définie par le maintien du centre de masse à l'intérieur du polygone de sustentation... Mais en fait, nous savons que la stabilisation orthostatique est bien plus fine que cela depuis que Roger TOULON, kinésithérapeute français (1956) a écrit : « le quadrilatère de projection est un petit carré de 10 mm de côté ». Cette stabilité est assurée grâce à l'intégration d'informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques couplées à une commande motrice.

Le pied est l'interface privilégiée entre le corps et le support en position debout.

A la fois capteur et effecteur : il intervient dans le contrôle de la posture et de l'équilibre en transmettant au système nerveux les informations sur les caractéristiques de l'appui et peut, grâce à ses propriétés mécaniques, assurer la stabilité du corps.

C'est en connaissance de cette dualité motrice et sensorielle qu'il faut interpréter les interactions entre pied et équilibre.

Lors de l'examen initial du patient diabétique, les tests au mono-filament et au diapason de la sensibilité vibratoire sont les moyens d'évaluation de la sensibilité plantaire qui définiront le risque podologique (grade I, II et III).

- Grade 0 : pas de neuropathie sensitive
- Grade 1 : neuropathie sensitive isolée
- Grade 2 : neuropathie sensitive associée à une artériopathie des membres inférieurs et/ou à une déformation du pied
- Grade 3 : antécédent d'ulcération ou d'amputation.

Pour évaluer et comparer la stabilité posturale chez le patient diabétique neuropathique (grades I, II et III) à celle d'une population appariée saine, j'utiliserai l'analyse stabilométrique.

Cette méthode est plutôt insuffisamment connue bien que non traumatisante et aujourd'hui accessible en terme de coût. Elle permet la mesure du centre de pression (point d'application des forces de réaction au déplacement du support sous l'effet de la masse corporelle, projection sous certaines conditions du centre de gravité) et un certain nombre de paramètres issus de l'enregistrement sont retenus pour qualifier le

comportement d'une posture orthostatique « normale » (Normes 85) :  
Surface et longueur du statokinésigramme, position moyenne, vitesse...  
Depuis quelques années s'ajoutent de nouveaux paramètres provenant du traitement du signal stabilométrique : Transformée rapide de Fourier (FFT), Analyse de diffusion (Collins et De Luca), Analyse fractale, Décomposition en ondelettes (Lacour et Dumitrescu)...

Je souhaite, notamment grâce à ces nouvelles techniques, étudier l'impact de la neuropathie sur la qualité de l'ajustement postural en partant de l'hypothèse que la dégradation des informations somesthésiques plantaires en modifiera la qualité.

Prévalence du diabète et population cible :  
**Le nombre de diabétiques traités en 2006 est de 2 613 309 (source assurance maladie).**

- **grade 0 : 88,1 %**
- grade 1 : 2,6 %
- grade 2 : 4,9 %
- grade 3 : 4,4 %.

D'après ces données, la population-cible serait donc de :  
 $2\,613\,309 \times (2,6+4,4+4,9)/100 = 310\,994$   
(source Etude Ecodia 2)

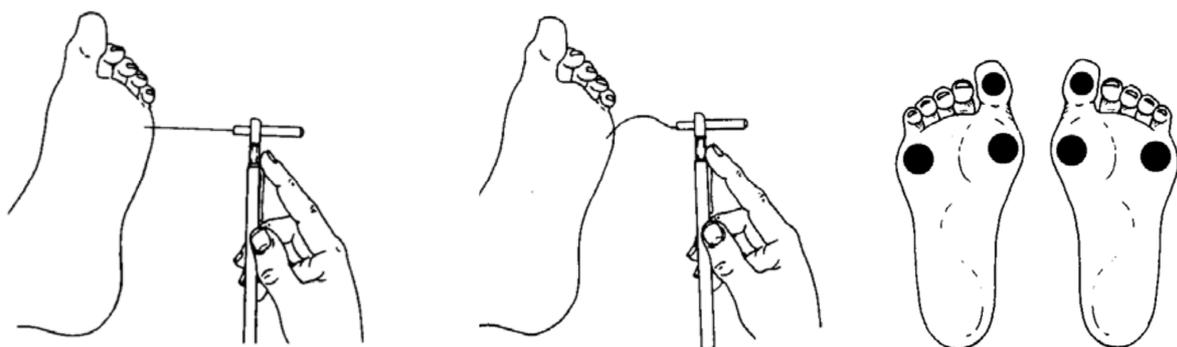
## 2/MATERIEL ET METHODES

### Tests cliniques sensoriels

Les 2 tests retenus pour cette étude sont les tests requis pour l'examen initial du patient diabétique. L'évaluation sensorielle peut être complétée par le piqué-touché et le compas de Weber. Les tests sont réalisés en décubitus, dans un ordre aléatoire et hors de la vue des patients.

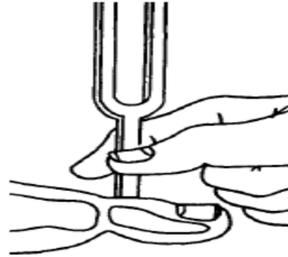
#### Test du monofilament (Semmes-Weinsten 5,07) :

Il s'agit d'un filament de nylon fin calibré pour fléchir à 10 g de pression exercée. Le monofilament est appliqué perpendiculairement à la surface de la peau jusqu'à flexion. Le test est fiable, reproductible et suit un protocole normalisé.



## Test du diapason (Rydel-Seiffer) :

Il permet de transmettre une vibration de 30 à 256 Hz et teste la sensibilité vibratoire (pallesthésie) assurée par les 4 mécanorécepteurs (Roll 1994) mais notamment les corpuscules de Meissner et de Pacini.

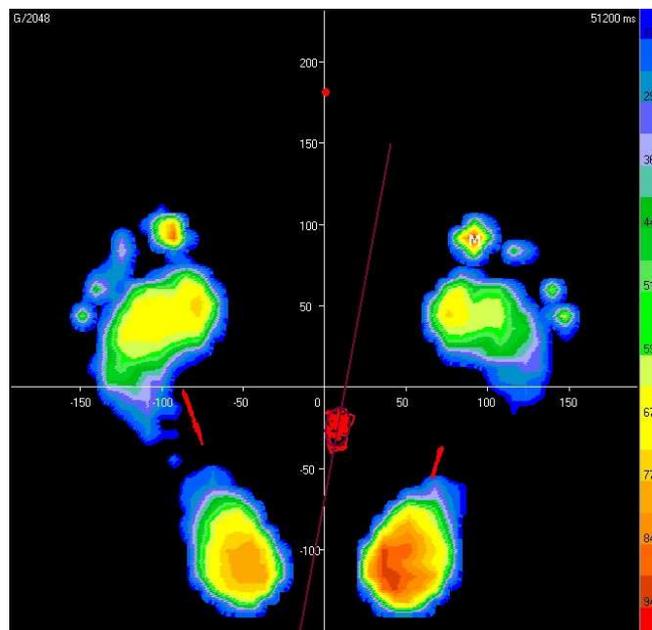


## Evaluation de la performance posturale

### Stabilo-Baropodométrie :



Plate-forme, gabarit de position et stand de mise en place

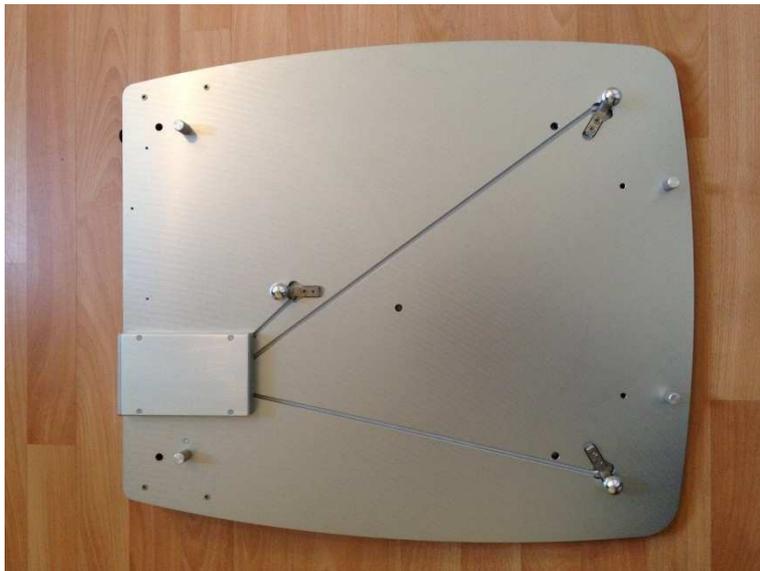


Stabilo-Baropodométrie

L'appareil utilisé est une plate-forme FUSYO (Société Médicapteurs) qui présente l'avantage de réaliser :

un examen de Baro-Podométrie grâce à 2304 capteurs de pressions à la capacité de charge allant de 0,4 N à 100 N sur une surface active de 400mm par 400 mm avec un échantillonnage jusqu'à 200 images secondes en dynamique,

et un enregistrement stabilométrique grâce à un plateau indéformable et 3 jauges de contrainte disposées en triangle dont la fréquence d'acquisition peut être réglé de 5 à 40 Hz.



Dessous de la plateforme, disposition en triangle des jauges de contraintes



Jauge de contrainte

Pour cette étude, j'ai utilisé la fréquence de 40 Hz, reconnue aujourd'hui comme étant le meilleur niveau d'enregistrement du déplacement du CdP. La fréquence de 5 Hz (utilisée pour la réalisation des Normes 85 qui servent

encore de référence à défaut de normes réalisées avec un échantillonnage supérieur) ne permet pas de capter les fréquences d'oscillations élevées et une analyse spectrale correcte. (Association française de Posturologie / Normes 85).

Le codage est en 16 bits, ce qui permet une précision de 0,76g (49g en 8 bits pour comparaison).

La plate-forme est USB-alimentée et l'ordinateur est branché sur un onduleur pour obtenir une alimentation bien régulée et sans bruit.

Le logiciel contrôle la pertinence des signaux des jauges de contraintes et peut alerter d'un mauvais fonctionnement ou réglage notamment en relation avec la déformation du sol.

Un référentiel amovible impose un angle d'ouverture de 30° entre les 2 pieds. Le Logiciel Fusyo utilise une passerelle vers PosturoPro® (Framiral) utilisant les méthodes les plus récentes d'analyse du signal stabilométrique. De la mousse type Prosport ® (Crispin) de 4mm d'épaisseur, SHORE 18, sera utilisée pour une série d'enregistrement.

## **Choix des paramètres mesurant la stabilité posturale**

### **Paramètres « standards » :**

#### Surface du statokinésigramme (mm<sup>2</sup>) :

Évalue la dispersion des positions successives du CdP. Le Logiciel Fusyo utilise une ellipse de confiance correspondant à 90 % des points.

#### La vitesse Moyenne (mm/s) :

Je n'ai pas retenu la longueur du Statokinésigramme qui est dépendante de la durée d'enregistrement et sensible au bruit ainsi que l'analyse rapide de Fourier (FFT) du spectre fréquentiel qui présuppose que celui-ci soit constant dans le temps ce qui n'est pas le cas.

### **Paramètres PosturoPro® (Framiral)**

#### **Analyse qualitative du signal stabilométrique :**

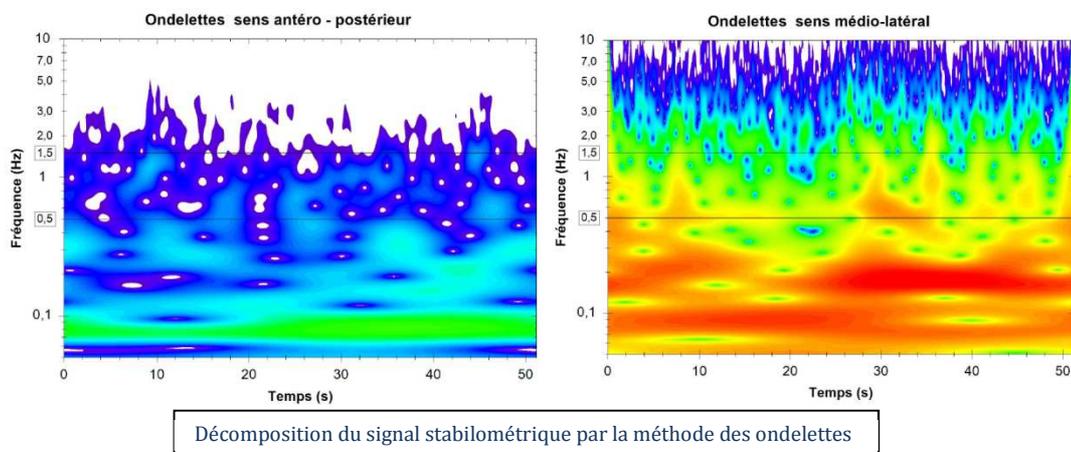
#### Décomposition par ondelettes :

Fournit une cartographie 3D de l'enregistrement postural, semblable aux courbes d'état-major et introduisant cette fois le paramètre temps du signal en abscisse. La fréquence est en ordonnée et la puissance du contenu fréquentiel figurée par un code couleur.

Les couleurs chaudes (jaunes, orange, rouge) pour les puissances élevés et les couleurs froides (vert, bleu, blanc) pour les puissances faibles ou nulles, pour une fréquence donnée ou déterminée.

### Rapidement l'image renseigne :

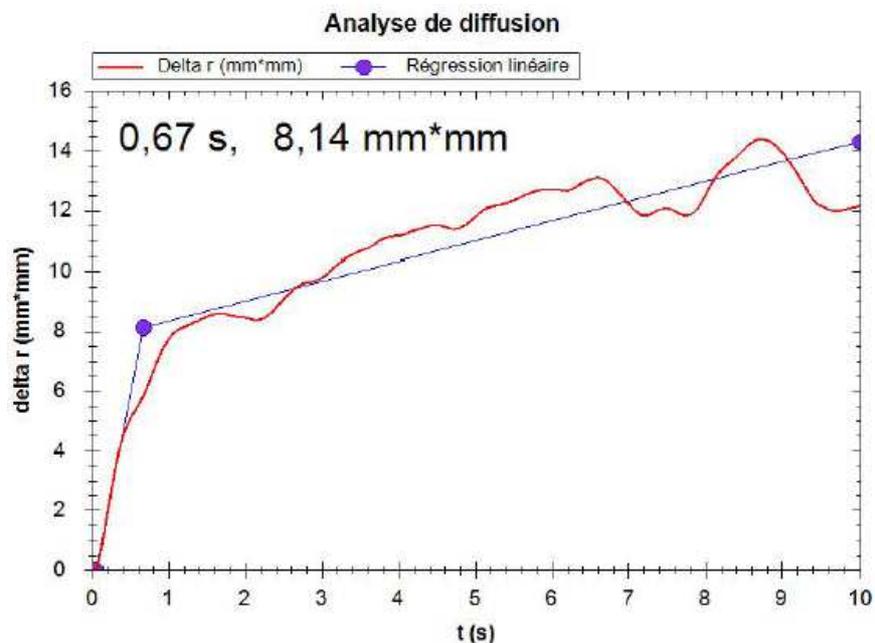
- sur la dépense énergétique de maintien de son équilibre postural (prédominance de couleurs chaudes vs froides)
- sur le type du contenu fréquentiel (compris entre 0 et 3-4Hz). Des fréquences élevées peuvent révéler l'existence d'un processus pathologique.
- Sur l'aspect homogène ou non dans le temps. Un accroissement subit d'une puissance limitée dans le temps due à une instabilité transitoire peut être ainsi analysé comme résultant d'un artefact (ce qui ne serait pas possible à distinguer en FFT).
- Le blanc signe les temps d'annulation résultant d'un contrôle postural efficace.



## Analyse quantitative du signal stabilométrique :

### L'analyse de diffusion :

Qui permet sur le statokinésigramme de déterminer les coordonnées du point critique et le coefficient de diffusion. Ces indices pour les auteurs Collins et De Luca signalent le passage d'un mode de régulation en boucle ouverte (déplacement stochastique du CdP) à un mode de fonctionnement en boucle fermée (intervention de mécanismes de la régulation posturale). Les coordonnées du point critique sont données par le temps (s) en abscisse et le déplacement quadratique moyen (delta r (mm\*mm) en ordonnée.



### Indices de contrôle postural (ICP) :

Ils correspondent au temps d'annulation d'une bande de fréquence déterminée ou sur l'ensemble du domaine harmonique, calculés à partir de l'intégrale des surfaces dessinées par les courbes des temps d'annulation.

Un ICP élevé signe un contrôle postural performant.

### Indices de puissance (IP) :

Ils correspondent aux analyses des puissances exprimées en millions dans les 3 domaines fréquentiels délimités (0-0,5 Hz / 0,5-2 Hz / >2Hz) ou sur la totalité du domaine harmonique.

Calculés à partir de l'intégrale des surfaces dessinées par les courbes de puissances, ils correspondent à l'énergie utilisée au contrôle postural.

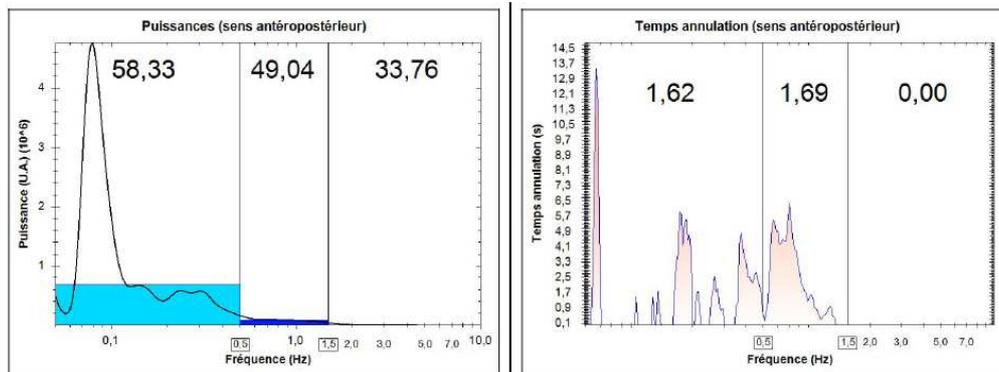
Plus l'IP est faible plus ce contrôle est efficace et inversement.

### Indice d'instabilité posturale (IIP) :

Cet indice est calculé à partir de l'ICP et l'IP et permet une évaluation rapide de la performance posturale du patient à partir de ce rapport :

$$IIP = \sum_x \sum_y IP (F1, F2, F3) / ICP (F1, F2, F3)$$

Plus le résultat est bas plus le contrôle postural est performant.



### Protocole d'examen FUSYO®

Le patient se place sur la plate-forme en utilisant le positionneur (Angle de 30° entre les pieds / 2 cm entre les talons) qui est ensuite ôté. Un dispositif latéral facilite la montée et la descente de la plate-forme, et permet de sécuriser le sujet en cas de forte instabilité. Les bras sont le long du corps, la bouche est fermée sans contact dentaire. Une cible visuelle est située à 90cm devant et à hauteur des yeux du sujet. Il est demandé de rester immobile en utilisant la même consigne.

3 séries d'enregistrements de 51,2 s sont réalisés avec un temps de repos entre eux.

Yeux Ouverts statique

Yeux Ouverts statique / Yeux Fermés statique

Yeux Ouverts Mousse / Yeux Fermés Mousse

Le premier enregistrement correspond à la phase de familiarisation au dispositif expérimental et ne sera pas conservé.

## Sujets

### Diabétiques :

7 Sujets diabétiques (2 femmes et 5 hommes) présentant au moins 2 points d'insensibilité sur 3 au monofilament et absence de sensibilité au diapason.

### Sujets témoins :

6 sujets (6 femmes) présentant une sensibilité complète au monofilament et au diapason.

Sans troubles de l'équilibre, vertiges et pathologie neurologique.

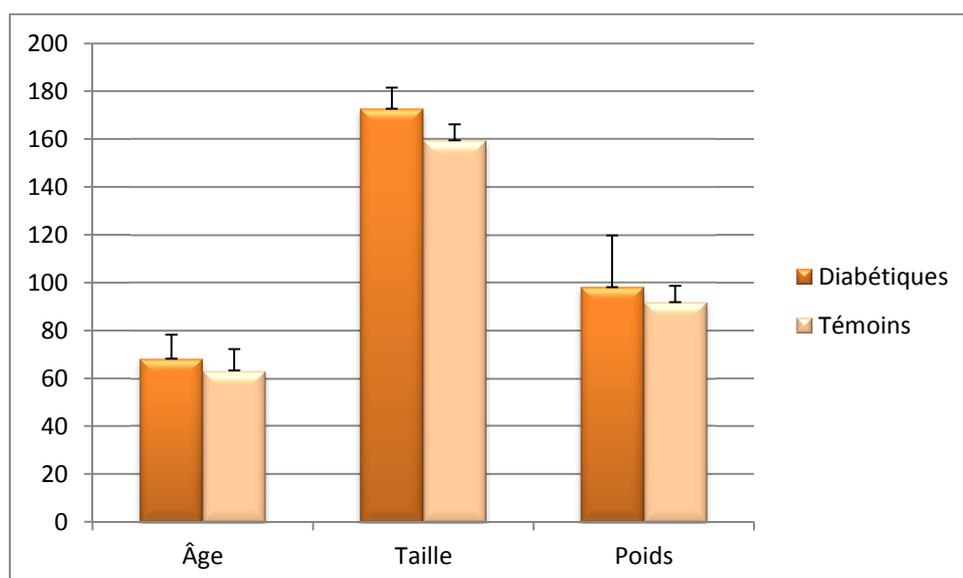


Figure 1

# 3 / RESULTATS

Diabétiques

Témoins

Surface du statokinésigramme (mm<sup>2</sup>) :

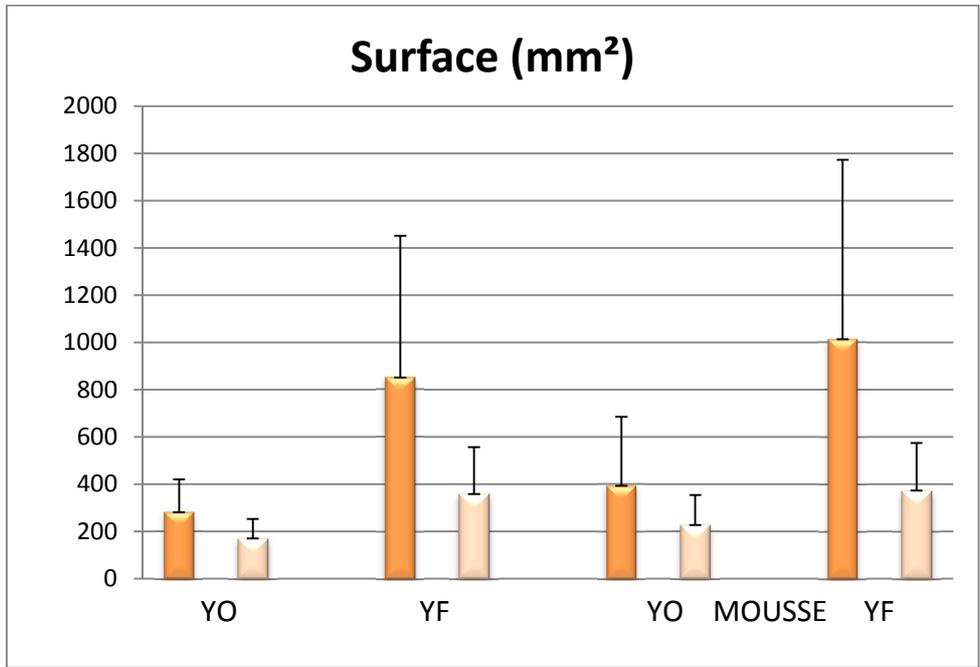


Figure 2

La vitesse Moyenne (mm/s)

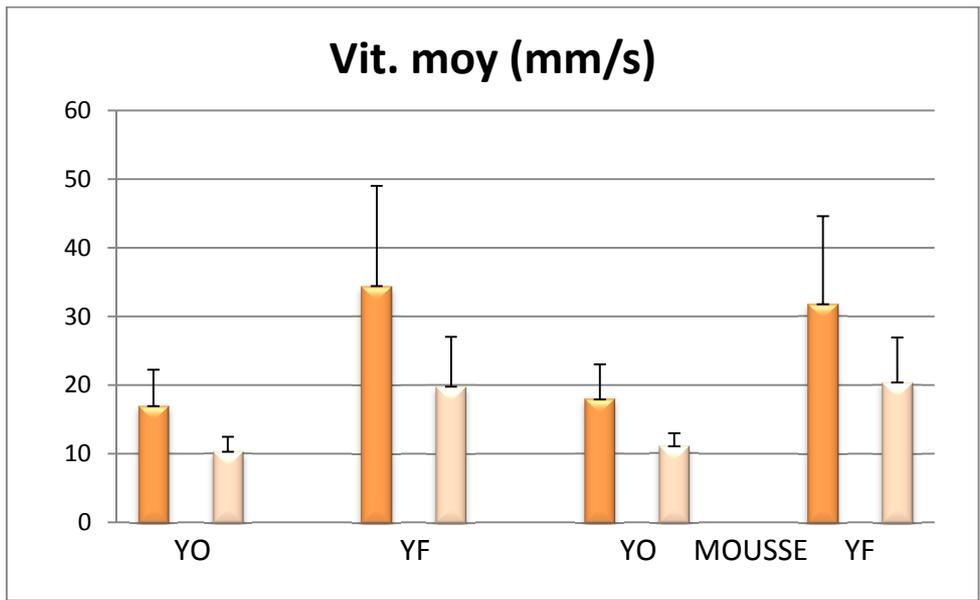
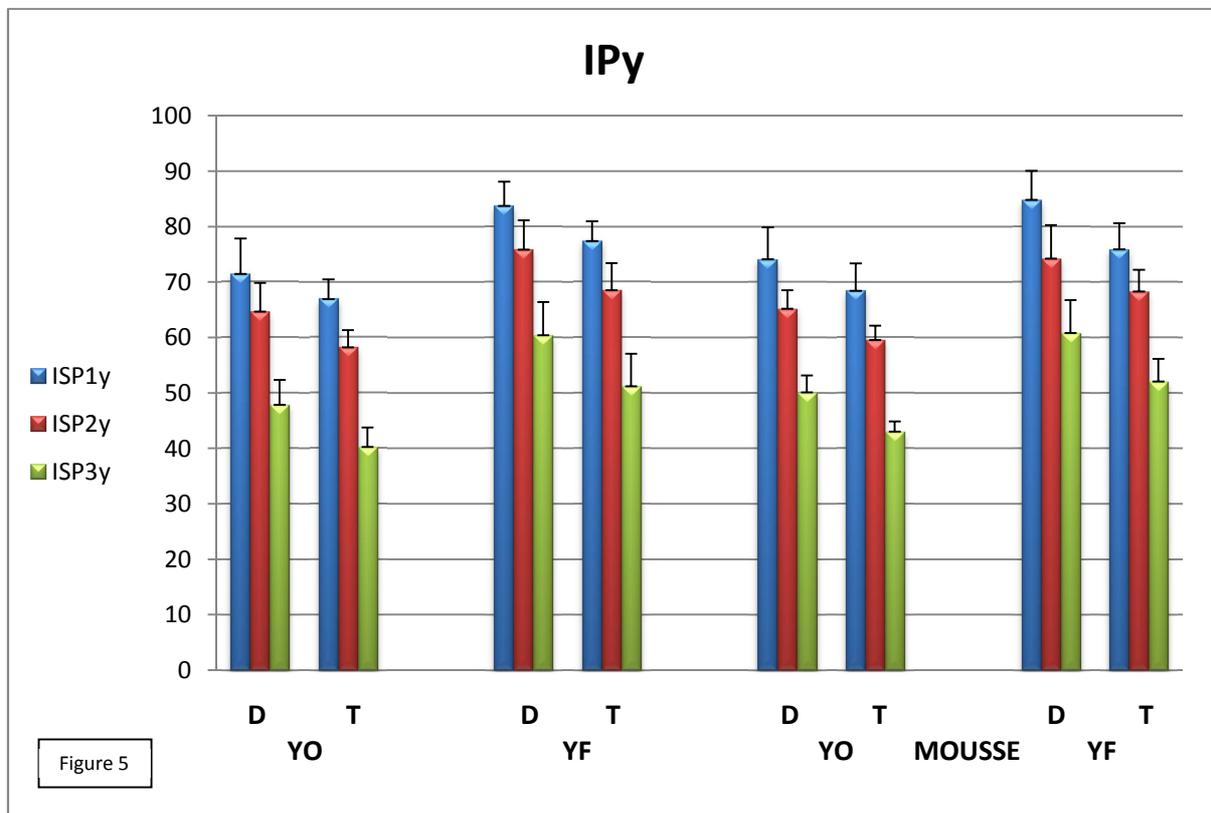
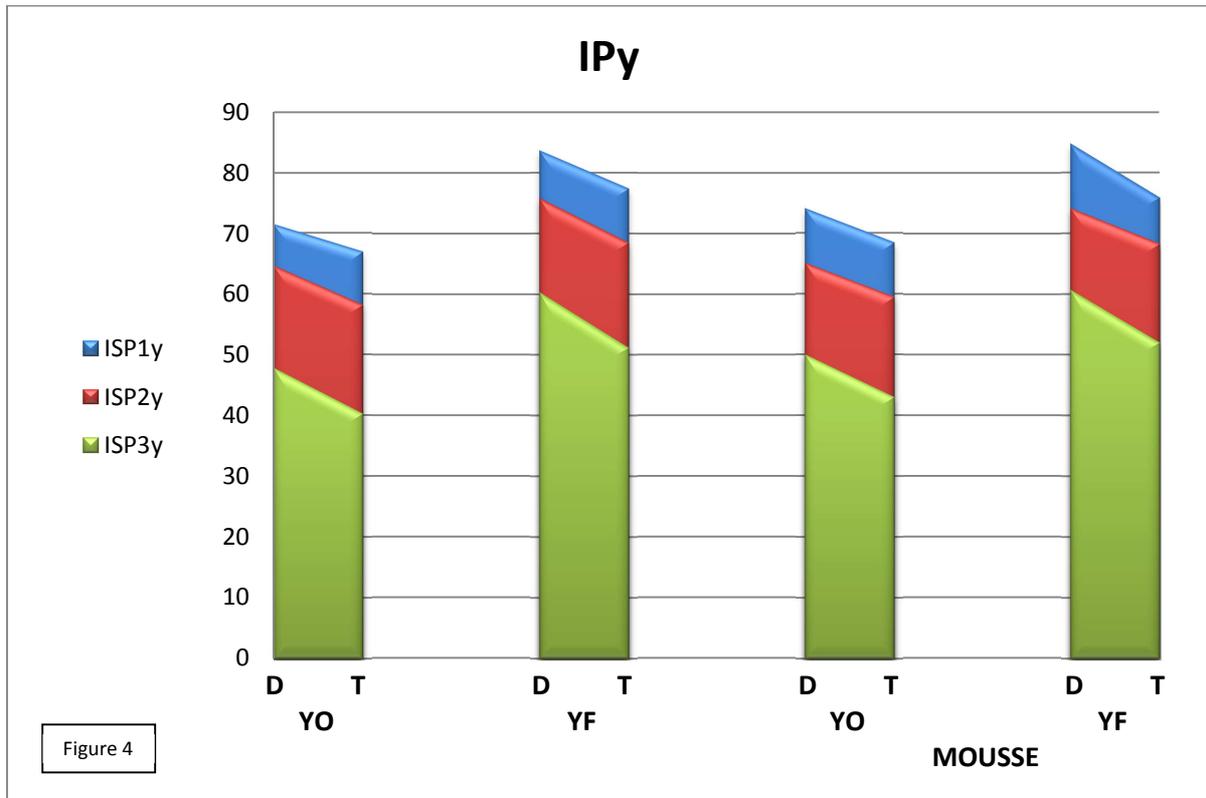
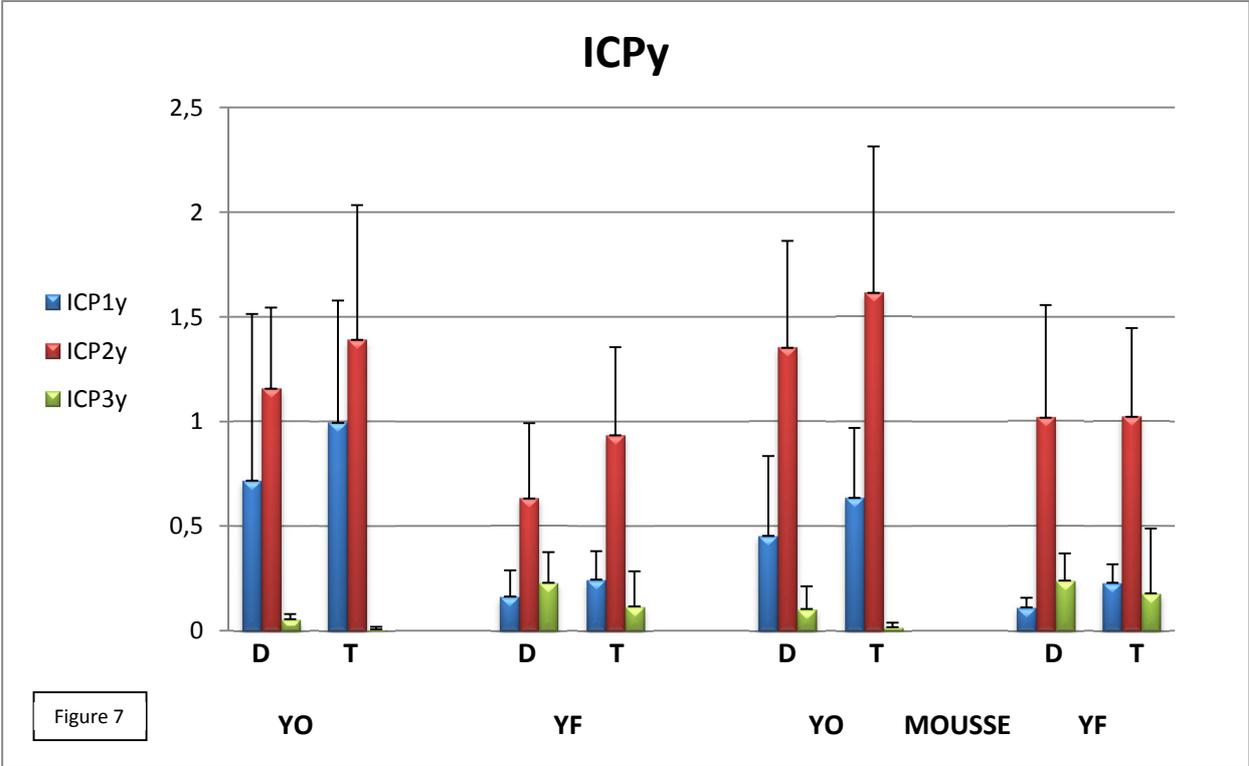
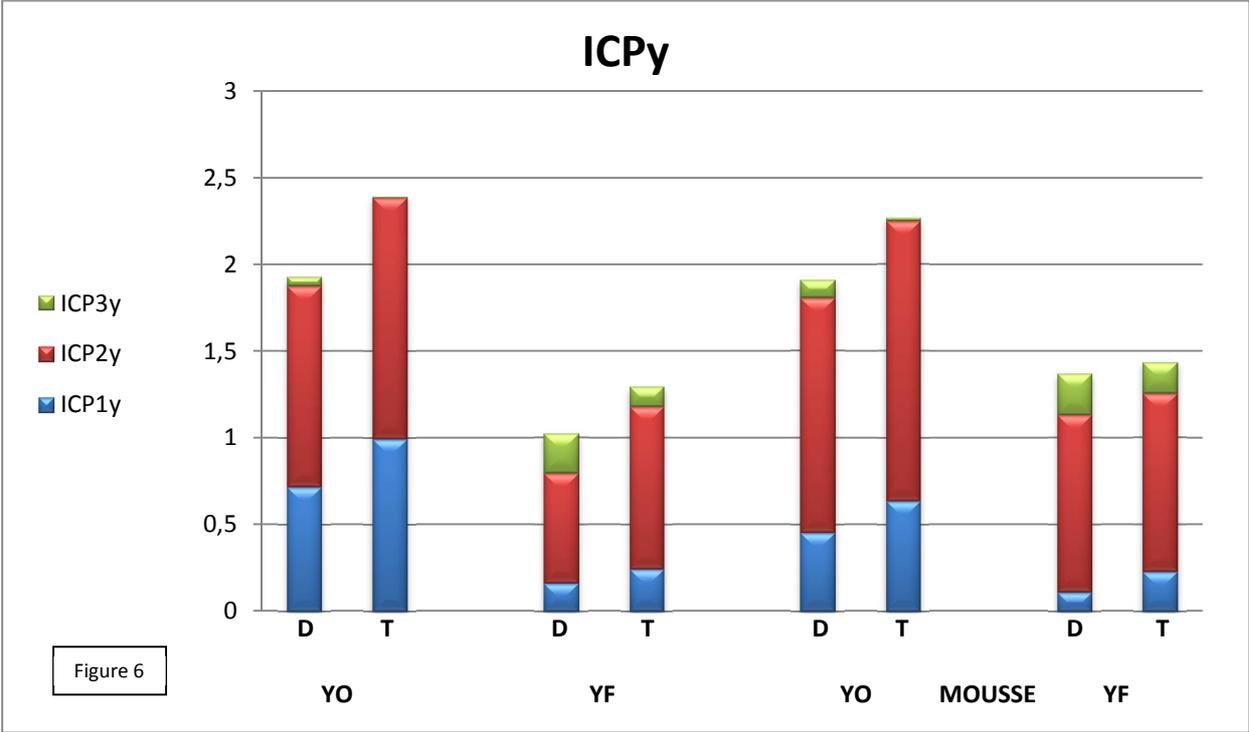


Figure 3

## Indices de puissance en Y :



Indices de contrôle postural en Y :



Indice d'instabilité posturale :

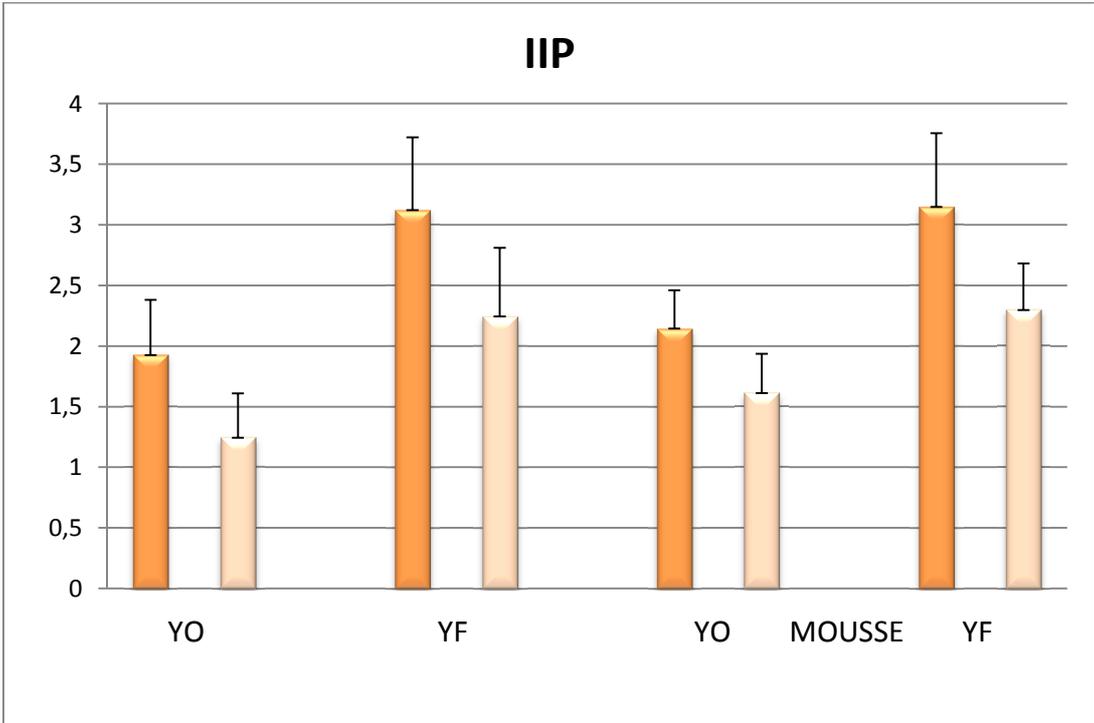


Figure 8

L'analyse de diffusion :

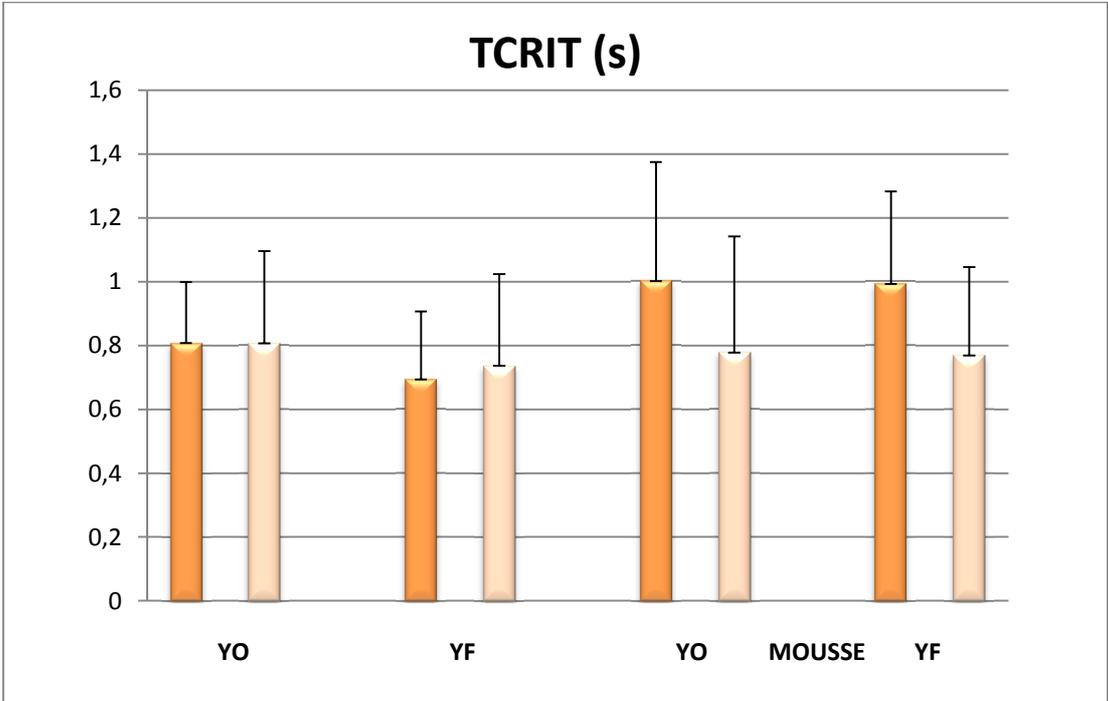
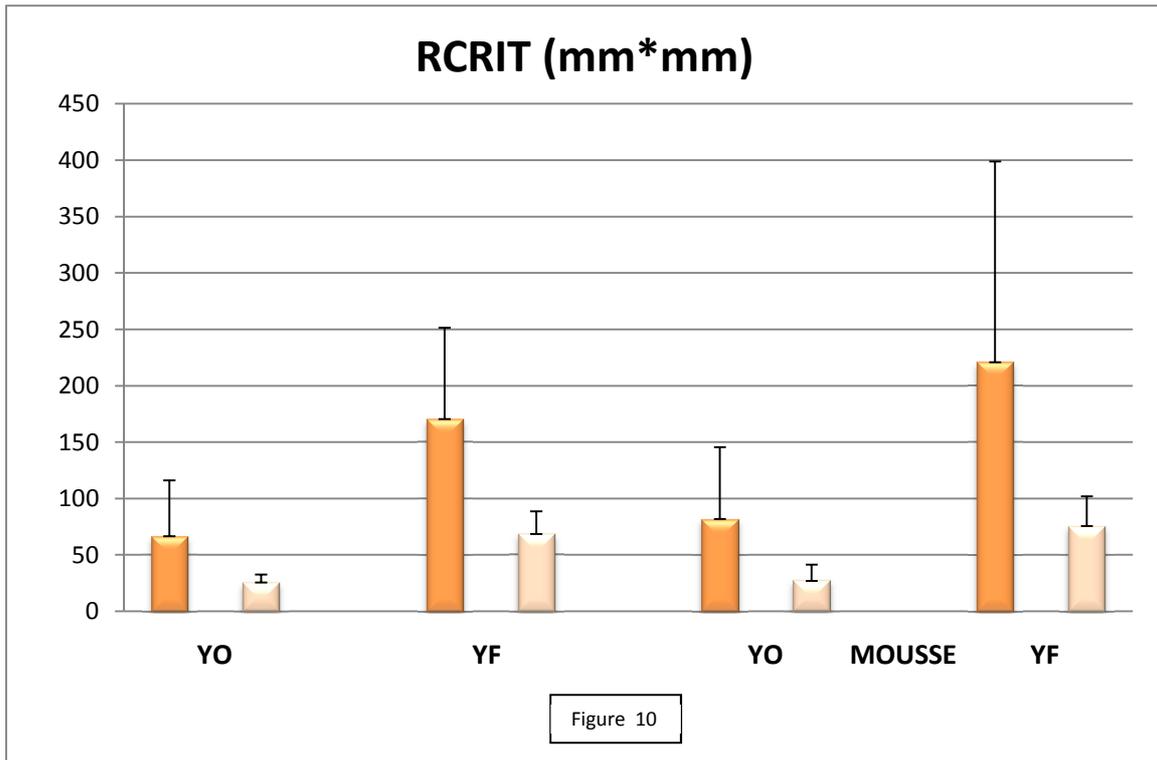


Figure 9



Quotients de Romberg et Plantaire (Surface, vitesse, IIP) :

-Romberg:  $YF / YO * 100$  indice de dépendance visuelle

-Plantaire:  $YO \text{ Mousse} / YO \text{ sol dur} * 100$  indice de dépendance plantaire

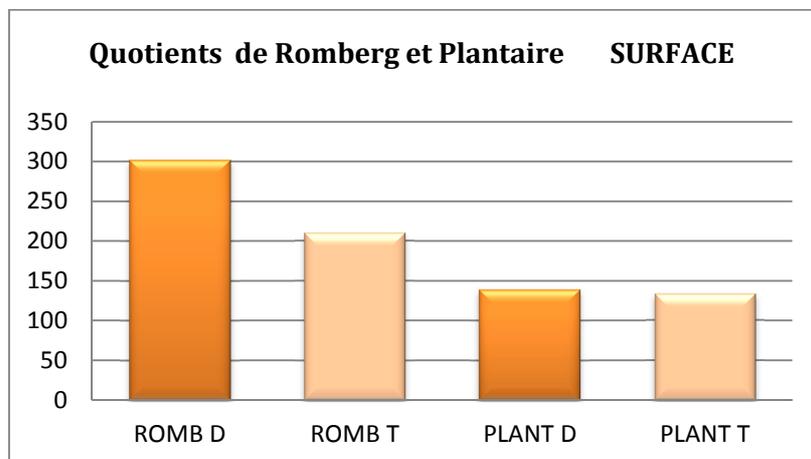


Figure 11

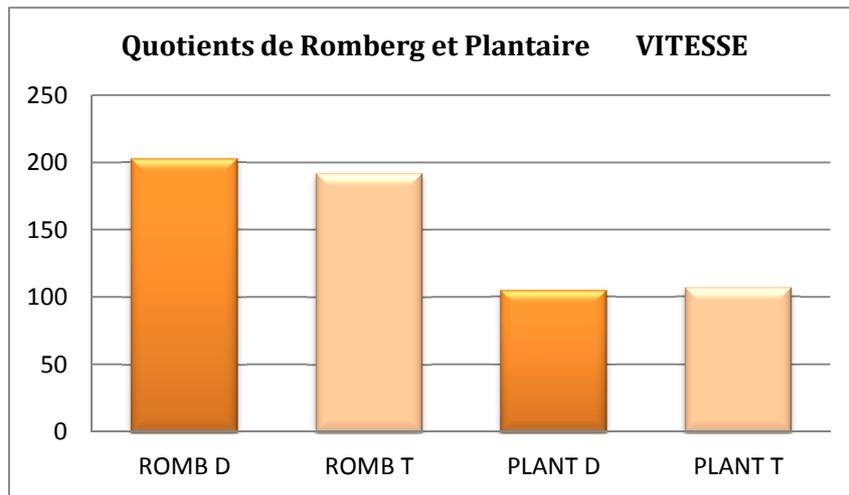


Figure 12

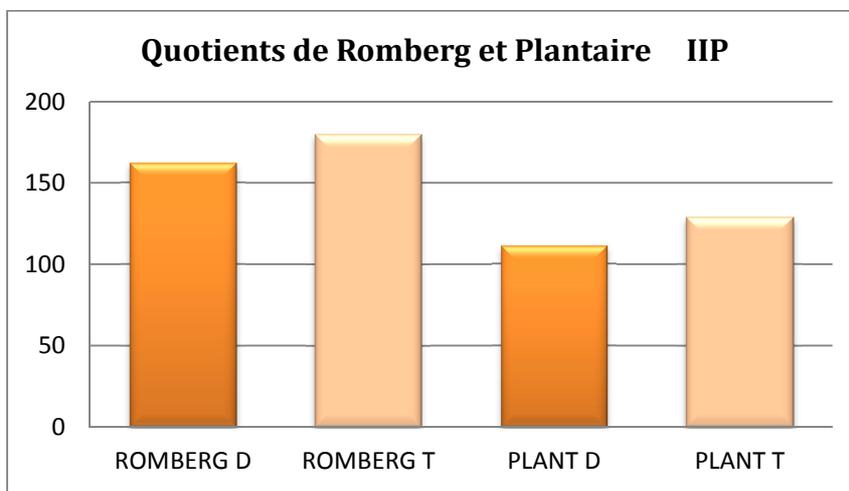


Figure 13

Exemple d'analyse par la méthode des Ondelettes

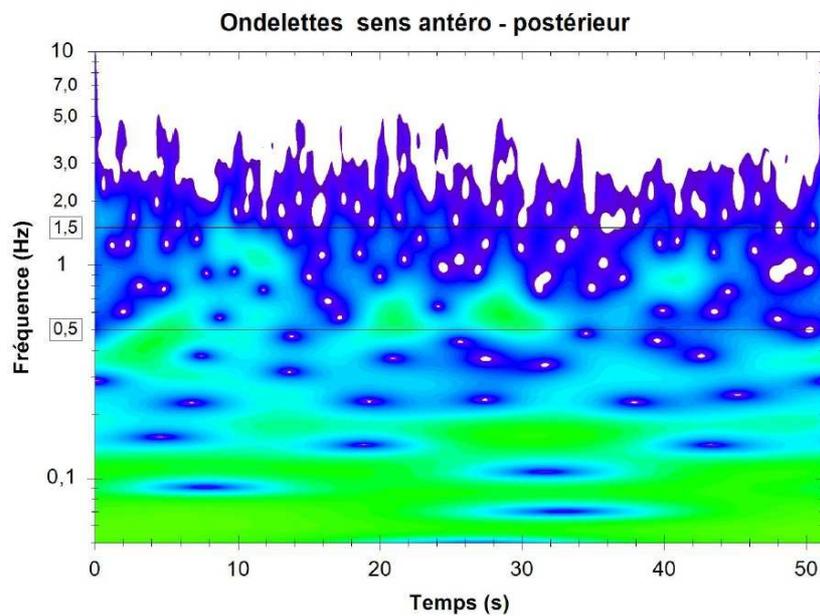
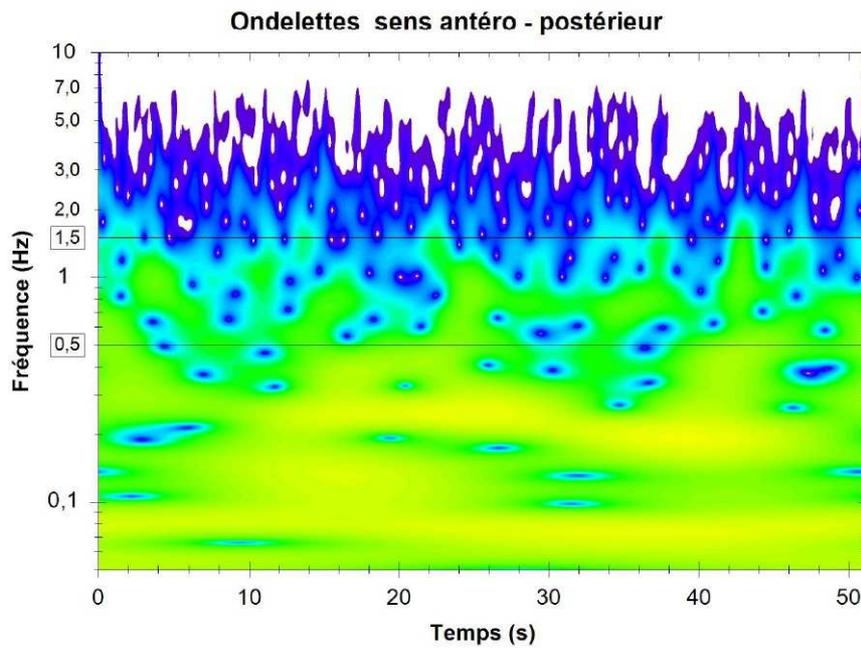


Figure 14  
Témoïn  
ENR YO



## 4 / DISCUSSION

L'ensemble des paramètres étudiés distingue le groupe Diabétiques du groupe Témoins dans les 4 conditions d'enregistrement.

Les deux groupes sont dépendants visuels sur tous les paramètres, toutefois les paramètres standards (Surface et vitesse) donnent une plus grande dépendance aux Diabétiques contrairement au paramètre IIP.

Peu de paramètres distinguent nettement le sol (Surface et Analyse de diffusion). Les coefficients Plantaires montrent ainsi une faible dépendance au type de sol avec des résultats proches de 100 (Vitesse, IIP, surface) sans différence franche des 2 groupes.

L'analyse de diffusion (Figures 9 et 10) est intéressante car elle montre une augmentation du temps critique pour les Diabétiques en fonction du sol (sans différence pour les Témoins) et une augmentation de la surface critique les yeux fermés (avec une faible différence pour les Témoins). Pris globalement, les résultats de cette analyse discriminent les diabétiques suggérant que les corrections posturales par rétroaction (boucle fermée) surviennent plus tard et après de plus grandes oscillations.

L'étude des résultats des Indices de Puissance (ISPy figure 4) montre une répartition (en fonction des groupes) et une augmentation (en fonction des conditions) des trois plages de fréquences, de manière proportionnelle. Il semble donc qu'il n'y ait pas de modification spécifique d'une plage fréquentielle donnée en relation avec la baisse de sensibilité plantaire sur ces enregistrements.

Il faut remarquer par ailleurs la présence de temps d'annulation dans les Hautes Fréquences (ICP 3y) (Figure 6) dans tous les enregistrements des Diabétiques, ces temps se retrouvent uniquement en condition yeux fermés des Témoins et de manière plus faible or la somme des temps d'annulation de ceux-ci reste plus élevée. Un sujet normal ne présente pas d'oscillations HF, il est donc logique de ne pas retrouver de temps d'annulation dans ce domaine de fréquence contrairement aux autres domaines où ils signent l'intervention du système de stabilisation posturale (Lacour et Dumitrescu).

Sur ce critère, on note bien l'influence de l'absence de vision : baisse importante des basses fréquences (visuelles et vestibulaires) et moindrement des fréquences intermédiaires (Proprioception consciente et inconsciente).

L'ensemble des résultats est à considérer en fonction de la faiblesse de l'échantillon (N = 7 groupes D et N = 6 groupe T) : il m'a semblé essentiel d'apparier le plus possible l'âge, la taille mais surtout le poids (98 Kg en moyenne pour le groupe D) ce qui a compliqué le recrutement des témoins en plus des critères d'exclusion. Par ailleurs le groupe T ne comprend que des femmes ce qui peut avoir son importance.

L'absence de différence significative au niveau de conditions de sol pour les deux groupes sur la plupart des paramètres m'amène à m'interroger sur le choix de la mousse. Le quotient plantaire proche de 100 pourrait valider l'hypothèse du défaut d'intégration d'entrée podale par comparaison à un quotient nettement supérieur dans le groupe T. Il est reconnu que les mousses entraînent chez l'individu normal une diminution de sa stabilité en fonction de la dureté (Shore) et l'épaisseur (P.-M Gagey et B. Weber) or il n'existe pas de norme d'utilisation d'une mousse par rapport à une autre et les résultats ne peuvent être comparés.

La comparaison avec un groupe Diabétique Non Neuropathique aurait pu être utilisée pour distinguer l'influence de celle-ci.

J'ai retenu l'étude de l'équilibre dans le sens Antéro-postérieur dans un souci de clarté, les mesures dans le sens Médio-latéral ont sensiblement donné des résultats comparables.

La piètre performance posturale de certains sujets m'a par contre dissuadé d'employer une plate-forme à bascule pour des enregistrements dynamiques (Poids de la sensibilité plantaire et de la proprioceptivité de Tibio-tarsienne...)

Je note enfin que la méthode des ondelettes fournit rapidement une information qualitative de la performance posturale. L'image peut être comparée à une véritable « signature posturale » (Lacour et Dumitrescu) des sujets pathologiques et sains.

## 5 / CONCLUSION

L'analyse stabilométrique sur plate-forme statique utilisant des critères standards (Surface, Vitesse) et issus du logiciel Posturo Pro ® (IIP, IP, ICP Analyse de diffusion) a permis de discriminer la performance posturale de sujets diabétiques souffrant de neuropathie. Toutefois, ces résultats ne permettent pas d'impliquer directement la baisse de sensibilité plantaire dans la dégradation posturale.

Je pense poursuivre cette étude avec un nombre plus important de sujets dans les deux groupes, la création d'un groupe Diabétique non Neuropathique et la réalisation de comparaison avec différentes mousses. L'utilisation des nouveaux paramètres de traitement du signal posturographique m'apparaît très utile en pratique clinique et complémentaire aux paramètres standards. La méthode des ondelettes et plus encore l'indice IIP nous renseignent, rapidement et de manière accessible pour le patient, sur la qualité de la stabilité posturale.

## 6 / RESUME

L'objectif de cette étude est d'évaluer la performance posturale de sujets diabétiques souffrant de neuropathie périphérique comparativement à des sujets sains et de distinguer l'impact de cette neuropathie. Pour cela, j'ai utilisé une plate-forme de stabilométrie statique fournissant des paramètres «standards» (Vitesse, Surface...) mais aussi de nouveaux paramètres (Indice d'instabilité, Indice de contrôle postural, Indice de puissance, Analyse de diffusion, Ondelettes...). Les résultats discriminent la stabilité des diabétiques sans toutefois distinguer l'importance de la neuropathie dans cette dégradation.

# 7/Références bibliographiques

---

Murray HJ, Young MJ, Hollis S, Boulton AJM. The association between callus formation, high pressures and neuropathy in diabetic foot ulceration. *Diabet Med* 1996;13(11):979-82.

Séances de prévention des lésions des pieds chez le patient diabétique, par le Pédicure-Podologue, HAS juillet 2007

ECODIA 2 Dr M.Varrioud-Vial, Pr B.Guerci, Pr C.Attali, Dr D.Simon, Dr B.Detournay, Pr S.Halimi, Dr S.Bouée, Dr G.Brami, Dr A.Fagot-Campagna, F.Nachit-Ouinekh, Dr E. Eschwege, Pr B.Charbonnel, Pr A.Grimaldi: prise en charge du diabète en France: des progrès certains; Réseaux diabète, mars 2007, 31, 4-9.

Richard JL. Dépistage et prévention du pied diabétique à risque. In: Richard JL, Vannereau D, ed. *Le pied diabétique*. Paris: Editions MF; 2002. p.209-46.

Richard JL. Comment dépister les diabétiques à risque podologique ? *Diabetes Metab* 1996; 22(3):210-

Richard JL, Vannereau D, Parer-Richard C, Jourdan N, Brunon A. Conseils aux patients diabétiques concernant leurs pieds. *J Plaie Cicatrisations* 2004;41:17-23.

Thoumie P. Pied, posture et équilibre. *Encycl Méd Chir Podol* 1999;27-020-A-10.

Association française de Posturologie / Normes 85

Dumitrescu, M., Lacour, M. (2004). Analyse mathématique par décomposition en ondelettes des signaux stabilométriques. Avantages par rapport à l'approche classique de la FFT. In: Lacour, M., (Ed). *Posture et Equilibre*. Solal, Marseille, pp 13-24

Dumitrescu, M., Lacour, M. (2006). Nouveaux critères quantitatifs d'analyse du contrôle postural : illustrations en pathologie et chez la personne âgée. In: Pérennou, D., Lacour, M., (Eds). *Posture et Equilibre*. Solal, Marseille, pp 65-75

Collins, J.J., De Luca, C.J. (1993). Open-loop and closed loop control of posture: a random walk analysis of center of pressure trajectory. *Exp Brain Res*, 95, 308-318.

Collins, J.J., De Luca, C.J. (1995). The effect of visual input on open loop and closed loop postural control mechanisms. *Exp Brain Res*, 103, 151-163

Collins, J.J., De Luca, C.J., Burrows, A., Lipsitz, L.A. (1995). Age-related changes in open-loop and closed loop postural control mechanisms. *Exp Brain Res*, 104, 480-492

Horak, F.B., Dickstein, R., Peterka, R.J. (2002) Diabetic neuropathy and surface sway-referencing disrupt somatosensory information for postural stability in stance.

Simmons, R.W., Richardson, C. (2001) The effects of muscle activation on postural stability in diabetes mellitus patients with cutaneous sensory deficit in the foot.

Gagey, P.-M., Weber, B. (2004 "3<sup>ème</sup> éd.) Masson (Ed) *Posturologie et dérèglements de la station debout* .

Framiral / Présentation de PosturoPro® version 5.0 ([www.framiral.fr/fr/doc/Presentation\\_POSTURO-PRO.pdf](http://www.framiral.fr/fr/doc/Presentation_POSTURO-PRO.pdf))

Médicaps / Manuel d'installation et d'utilisation FUSYO