

Clarification de la notion clinique d'épine irritative d'appui plantaire – effets posturaux et oculomoteurs et intérêt diagnostique du quotient plantaire

Clarification of the clinical notion of plantar irritating stimulus – postural and oculomotor effects and diagnostic value of the plantar quotient

ARNAUD FOISY (Podologue DE, DO, PhD)^{1, 2}, ZOI KAPOULA (PhD)²

1 Podologue indépendant, Vigneux, France

2 Groupe IRIS, Université Paris Descartes, Paris, France

Sources de financement

Arnaud Foisy a obtenu le soutien financier du Collège Ostéopathique Européen (3000 €), de l'Association de Posturologie Internationale (560€) et de l'Institut d'Assas (375€). Aucun de ces sponsors n'a eu d'implication dans l'étude.

Conflits d'intérêts

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt ayant pu influencer les résultats de l'étude.

Keywords

Exteroception, proprioception, Plantar Exteroceptive Inefficiency, Plantar Irritating Stimulus, Plantar Quotient, insoles, foot, postural control, vergence, eye movement

Mots clés

Extéroception, proprioception, Inefficiency des Afférences Plantaires, Epines Irritatives d'Appui Plantaire, Quotient Plantaire, semelles, pied, contrôle postural, vergence, mouvement des yeux

Abstract

Introduction: we assessed whether subjects with Plantar Exteroceptive Inefficiency (PEI), characterized by a Plantar Quotient (PQ) <100, are more unstable and have a less efficient control of vergence than subjects with a normal PQ (i.e. >100, NPQS). We also aimed at identifying which parameters of stability are affected by foam interposition within each group of subjects.

Methods: We assessed the degree of utilization of plantar exteroceptive afferents of 31 young and healthy subjects by the Plantar Quotient method (PQ = SurfaceCoP on firm ground / SurfaceCoP on foam x100). We analyzed their postural (in visual fixation and during eye movements) and oculomotor performances after having classified them into two groups depending on their PQ.

Résumé

Introduction: nous avons évalué si des sujets avec Inefficiency des Afférences Plantaires (IAP), caractérisés par un Quotient Plantaire (QP) <100, sont plus instables et contrôlent moins bien leur vergence que les sujets au QP normal (i.e. >100, SQPN). Nous avons aussi recherché quels paramètres de stabilité sont affectés par l'interposition de mousse dans les deux groupes.

Méthode: nous avons évalué le degré d'utilisation des afférences extéroceptives plantaires de 31 sujets jeunes et sains par la méthode du QP (QP = SurfaceCPP sur sol dur / SurfaceCPP sur mousse x100). Nous avons analysé leurs performances posturales (en fixation visuelle et lors de mouvements oculaires) et oculomotrices après les avoir classés en deux groupes en fonction de leur QP.

Results: the results did not show any significant differences between the groups neither concerning vergence control, nor posture (except on Surface, which is used to classify the subjects). However, the PEI subjects showed a better stability on extruded polystyrene foam (6mm thick, shore 20A), including as regards the Length and Variance of Speed parameters, whereas it was the opposite for the NPQS.

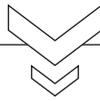
Discussion: this paradoxical behaviour of the PEI subjects along with their lesser use of plantar exteroceptive afferents sustains the validity of the clinical notion of unconscious plantar nociception called « Plantar Irritating Stimulus ».

Conclusion: it is likely that a « Plantar Irritating Stimulus » needs to be present for a longer period in order to produce differences between groups concerning postural and oculomotor control, and perhaps eventually symptoms.

Résultats: les résultats n'ont pas montré de différences significatives entre les deux groupes de sujets sur le contrôle de la vergence, ni de la posture (sauf la surface, intervenant dans la classification des sujets). En revanche les sujets IAP présentent une stabilité améliorée sur mousse (polystyrène extrudé, 6mm, shore 20A), y compris sur la Longueur et la variance de la vitesse, alors que c'est l'inverse pour les SQPN.

Discussion: ce comportement paradoxal des sujets IAP ainsi que leur utilisation moindre des afférences extéroceptives plantaires valident la notion clinique de nociception plantaire non consciente nommée « Epine Irritative d'Appui Plantaire ».

Conclusion: il est probable qu'elle doit être présente plus longtemps pour produire des différences entre les groupes sur le plan du contrôle postural, oculomoteur, voire symptomatique.



Introduction

Le contrôle de la posture met en jeu un système multisensoriel dans lequel les informations provenant des récepteurs de la peau plantaire jouent un rôle important ⁽¹⁾. Ces afférences somesthésiques peuvent être altérées expérimentalement par l'interposition de mousse entre le sol et les pieds du sujet. Toutes les expériences ayant utilisé cette méthode ont démontré que les sujets sont plus instables lorsqu'ils se tiennent debout sur la mousse (2,3,4 parmi d'autres). En effet, l'interposition de mousse a des effets comparables à une anesthésie, diminuant l'information provenant des pieds ^(3,5).

Une autre façon de manipuler l'extéroception plantaire consiste non pas à atténuer ces afférences, mais au contraire à enrichir le signal. Cela peut être fait par différentes méthodes, comme l'application de vibrations mécaniques à la peau plantaire ⁽¹⁾, ou l'utilisation d'inserts plantaires fins (< 4mm). Cette dernière technique a notamment été proposée suite à des observations cliniques répétées, dans le but de modifier différents paramètres posturaux chez des patients ^(6,7,8,9,10). De premières études cliniques ont suggéré que des tels inserts plantaires permettent d'améliorer la qualité du contrôle postural ^(11,12), et une étude expérimentale de *Janin* et *Dupui* ⁽¹³⁾ a montré qu'un insert médio-interne unilatéral de 3mm d'épaisseur latéralise le Centre des Pressions Plantaires (CPP) du côté opposé à la stimulation. De la même manière, plusieurs thérapeutes ont proposé que l'interposition d'une couche de mousse ⁽¹⁴⁾ ou de stimulations plantaires fines sous les pieds des sujets ^(15,16,17) modifie les phories (i.e. l'alignement binoculaire des axes visuels).

Un précédent travail ⁽¹⁸⁾ a récemment apporté une première confirmation que la stimulation de l'extéroception plantaire par des inserts plantaires fins bilatéraux internes (EMI® - déposé par *Sylvie* et *Philippe Villeneuve*, INPI N° 938 925 à 938 841) ou externes (EME) en résine dure (shore 60A) de 3mm d'épaisseur produit des effets à la fois sur le contrôle postural et oculomoteur. Dans cette étude, les sujets se tenaient debout et réalisaient des mouvements de saccades oculaires

puis de vergence. La qualité de leur contrôle postural a été enregistrée par plateforme de forces (Cyber Sabots, Techno-Concept) et leurs mouvements des yeux à l'aide d'un eye-tracker (Chronos Skalar). Avec les stimulations plantaires (surtout internes), les sujets sont plus stables pour un coût énergétique moindre, et sont moins antériorisés. De plus, ils présentent des modifications significatives des amplitudes de vergence, et ce de manière spécifique en fonction de la zone plantaire stimulée. La vergence est un mouvement des yeux disconjugué, c'est-à-dire au cours duquel les axes visuels se déplacent en sens opposé, ce qui permet l'exploration de la profondeur. La convergence correspond à un rapprochement des axes visuels et survient lorsqu'on regarde une cible visuelle plus proche que la précédente; et inversement pour la divergence. Les résultats ont montré que les inserts internes augmentent l'amplitude de la partie initiale (phasique) du mouvement de divergence, celle-ci ayant lieu en boucle ouverte (i.e. sans influence de la rétroaction visuelle), résultant en un mouvement davantage pré-programmé (une part plus importante du mouvement ayant lieu dans les 80 premières millisecondes - voir 19). A l'inverse, les inserts externes augmentent l'amplitude de la partie terminale (tonique) du mouvement de convergence, qui se produit donc davantage sous influence de la rétroaction visuelle.

Il y a une trentaine d'années, des cliniciens évoquaient l'existence de possibles « circuits pathogènes parasites » ⁽⁶⁾, de « souffrances du pied (...) conscientes ou inconscientes » susceptibles d'entraver les effets des stimulations plantaires fines ⁽⁸⁾, ou encore « d'influence perturbatrice de l'afférence podale » ⁽²⁰⁾. Un tel phénomène pourrait avoir des conséquences thérapeutiques immédiates: pour *Gagey* et *Weber* ⁽²¹⁾, il est indispensable de supprimer toute information nociceptive avant d'entreprendre des traitements de rééducation, si l'on veut que leurs effets soient durables.

Peu après, *Leporck* et *Villeneuve* ⁽²²⁾ ont nommé cette information parasite podale « Epines Irritatives d'Appui Plantaire » (EIAP), la définissant comme des « zones nociceptives podales

conscientes ou non, qui lors de leur mise en contact avec l'environnement entraînent une modification de la posture ou de l'équilibre chez l'homme debout. Leur inhibition doit entraîner des variations posturales cliniquement et instrumentalement objectivables ». Cette définition est donc basée sur une observation des effets supposés de l'EIAP: plusieurs études cliniques suggèrent que l'interposition de mousse améliore de façon paradoxale la stabilité orthostatique de sujets symptomatiques ou asymptomatiques ^(20,23,24,25,26,27). La mousse permettant d'atténuer les afférences plantaires ⁽⁵⁾, les auteurs ont proposé que cette amélioration du contrôle postural s'explique par la neutralisation d'afférences plantaires perturbatrices ²².

Un précédent travail a également apporté une première validation de ces observations et études cliniques ⁽¹⁸⁾. Nous avons remarqué une grande variabilité inter-individuelle des effets posturaux et oculomoteurs enregistrés dans l'étude réalisée précédemment ⁽¹⁸⁾. De telles différences entre les sujets avaient déjà été rapportées par d'autres auteurs, aussi bien en ce qui concerne le contrôle de l'équilibre ^(3, 4, 5) que les mouvements des yeux ^(29, 30), sans toutefois être expliquées.

Nous avons donc fait l'hypothèse que cette variabilité puisse être liée au degré d'utilisation des informations plantaires. Celui-ci est classiquement évalué en comparant la stabilité des sujets (en termes de surface d'oscillations du CPP) lorsqu'ils se tiennent debout sur un sol dur et sur mousse, par le biais d'un rapport entre ces deux mesures: le Quotient Plantaire (QP) ^{20,31,32}. Plus ce quotient est élevé, plus le sujet utilise les informations cutanées plantaires pour s'équilibrer; si le QP est inférieur à 100, le sujet est paradoxalement plus stable sur mousse que sur sol dur.

Nous avons donc évalué le degré d'utilisation des informations plantaires de la population de notre première expérience ⁽¹⁸⁾ au moyen du Quotient Plantaire. Nous avons ensuite ré-analysé les données de la première expérimentation en fonction de chaque sous-groupe, défini par ce quotient. Les résultats ont montré que les sujets dont le QP est inférieur à 100 utilisent moins leurs afférences plantaires à la fois pour le contrôle postural et oculomoteur: chez ces sujets il n'y a plus d'effet significatif des stimulations plantaires fines, alors que ces effets sont toujours visibles dans le sous-groupe des sujets au QP supérieur à 100 ⁽²⁸⁾. Partant de ces observations, nous avons nommé cette situation « Inefficacité des Afférences Plantaires » (IAP), et proposé, après Janin ⁽³³⁾, qu'elle soit due à une hyper-pronation (pieds valgus), responsable d'hyperpressions plantaires localisées aboutissant à une altération des signaux extéroceptifs. Celle-ci correspondrait à un bruit non conscient assimilable à une nociception perturbant l'intégration des afférences plantaires. Les mesures objectives et statistiquement significatives que nous avons obtenues corroborent donc la notion clinique d'EIAP.

Dans le présent article, nous présentons de nouveaux résultats portant sur la même population que précédemment ⁽²⁸⁾, et permettant de répondre aux questions suivantes:

(i) y a-t-il des différences dans le contrôle postural entre les sujets au QP < 100 (sujets IAP) et les sujets au QP > 100 (sujets

au QP normal – SQPN) en condition de fixation visuelle, et lors de mouvements oculaires? Compte tenu de la non utilisation des afférences plantaires des sujets IAP que nous pensons liée à un signal nociceptif, nous faisons l'hypothèse que les sujets IAP seront moins stables que les SQPN.

(ii) y a-t-il des différences dans le contrôle de la vergence entre les deux groupes de sujets? Pour la même raison, nous faisons l'hypothèse que les sujets IAP présenteront un contrôle de la vergence de moins bonne qualité que les SQPN.

(iii) quels paramètres de la stabilité sont affectés par la mousse dans les deux groupes de sujets?

Ces questions sont importantes car l'extéroception plantaire est une source majeure d'informations pour le contrôle postural ⁽¹⁾. Une altération du fonctionnement de cette entrée sensorielle pourrait provoquer une instabilité et mener à terme à ses conséquences, telles que les douleurs mécaniques ⁽³⁴⁾, ce que suggèrent plusieurs études cliniques.

Méthode

L'investigation a adhéré aux principes de la Déclaration d'Hel-sinki et a été approuvée par le « Comité de Protection des Personnes » (CPP) Ile de France VI (No: 07035), Hôpital Necker, Paris. Les participants ont donné leur consentement écrit après que la nature de l'expérience leur ait été expliquée.

Trente et un sujets (25,7 ± 3,8 ans) ont participé à l'étude (14 hommes et 17 femmes). Nous avons utilisé une plateforme de forces (Cyber Sabots, TechnoConcept) pour enregistrer les déplacements du CPP pendant 51.2 secondes à 40Hz (36). Deux enregistrements ont été réalisés dans un ordre aléatoire: un sur sol dur, et un avec interposition d'une couche de mousse de polystyrène extrudé de 6mm d'épaisseur (Dépron® Classic gris, dureté shore 20A, www.depronfoam.fr) sous leurs pieds, reprenant la méthode de *Dujols* ⁽²⁰⁾. Les sujets fixaient une cible située à 90 cm, devant leurs yeux, la position de leurs pieds sur la plateforme était standardisée: les talons séparés de 4 cm et les pieds ouverts à 30°. Le Quotient Plantaire a été calculé: $QP = \text{Surface CPP mousse} / \text{Surface CPP sol dur} \times 100$. Leurs caractéristiques sont résumées dans le [Tableau 1](#).

L'échantillon a été réparti en 2 groupes: ceux qui avaient une réponse normale, étant plus stables sur sol dur que sur mousse (QP > 100) que nous avons nommés « Sujets au Quotient Plantaire Normal » (SQPN); et ceux qui étaient plus stables sur mousse que sur sol dur (QP < 100), que nous avons nommés sujets avec « Inefficacité des Afférences Plantaires » (sujets IAP).

Afin de répondre aux questions posées, nous avons:

(i) comparé le contrôle postural des deux groupes de sujets d'une part en condition de fixation visuelle (cible à 90 cm) sur sol dur et sur mousse, et d'autre part lors des mouvements des yeux, sans stimulation plantaire, avec inserts plantaires internes ou externes bilatéraux.

Sujet	Groupe	QP	Sexe	Age	Taille cm	Poids (kg)	TNO	Parinaud	Accom- modation
S3	Sujet IAP	93	F	33	163	51	30	2	6,25
S6	Sujet IAP	86	F	22	172	66	60	2	11,11
S7	Sujet IAP	94	F	22	156	58	30	2	8,96
S11	Sujet IAP	41	M	25	175	72	60	2	7,23
S13	Sujet IAP	81	F	23	170	57	30	2	10,20
S18	Sujet IAP	22	M	24	182	72	30	2	8,70
S21	Sujet IAP	91	F	24	167	85	60	2	6,65
S25	Sujet IAP	63	F	25	158	53	60	2	8,85
S27	Sujet IAP	76	M	30	186	72	60	2	10,53
S28	Sujet IAP	76	F	26	158	55	30	2	7,21
S29	Sujet IAP	59	F	29	168	61	30	2	11,32
S31	Sujet IAP	49	M	24	176	74	60	2	10,53
M		69		25,6	169,3	64,7	45,00	2,00	8,96
ET		23		12	33	36	54	0	6
S1	SQPN	115	F	31	172	74	30	2	8,33
S2	SQPN	124	M	25	173	71	30	2	12,05
S4	SQPN	109	F	22	168	62	60	2	8,88
S5	SQPN	255	M	23	184	75	60	2	9,32
S8	SQPN	346	M	31	185	67	60	2	7,79
S9	SQPN	158	M	22	183	76	60	2	10,71
S10	SQPN	163	F	35	160	61	30	2	6,67
S12	SQPN	120	F	22	169	52	30	2,5	9,55
S14	SQPN	114	M	24	173	76	30	2	9,52
S15	SQPN	229	M	26	178	79	60	2	10,71
S16	SQPN	173	M	33	187	89	15	2	9,38
S17	SQPN	114	F	23	171	57	30	2	9,23
S19	SQPN	130	F	22	162	52	30	2	7,79
S20	SQPN	166	M	23	166	54	60	2	7,41
S22	SQPN	207	F	25	168	55	15	2	7,14
S23	SQPN	137	F	23	168	51	15	2	8,15
S24	SQPN	153	F	25	160	57	15	2	8,20
S26	SQPN	164	M	29	166	64	15	2	9,52
S30	SQPN	109	M	25	180	64	30	3	10,71
M		162		25,7	172,3	65,1	35,53	2,08	9,00
ET		61		18	37	48	79	1	6
Valeurs de p		0,00		0,87	0,39	0,87	0,11	0,25	0,87

› Tableau 1 : caractéristiques des sujets, avec leurs moyennes (M) et écarts-types (ET)

Pour chaque sujet : Quotient Plantaire (QP), Taille (cm), Poids (kg), stereoacuité (TNO), acuité visuelle de près (Parinaud, moyenne des 2 yeux). Les valeurs normales sont < 100 pour le TNO, < 3 pour le Parinaud < 9.5 ± 2 pour l'amplitude d'accommodation.

- (ii) comparé le contrôle de la vergence des deux groupes, sans stimulation plantaire, avec inserts plantaires internes ou externes bilatéraux (sur les données de 18).
- (iii) évalué les effets posturaux de la mousse sur l'ensemble des sujets, puis sur chaque groupe.

Les paramètres posturaux analysés étaient la Surface des déplacements du CPP, correspondant à 90% des positions instantanées du CPP incluses dans l'ellipse de confiance⁽³⁷⁾; la Longueur des déplacements du CPP et la Variance de la Vitesse de ses déplacements. Les paramètres oculomoteurs analysés étaient les paramètres de vergence qui avaient présenté des variations significatives lors de la première expérience⁽¹⁸⁾: la latence

(i.e. le temps séparant l'apparition de la cible visuelle et le début du mouvement des yeux); les amplitudes totales de convergence et de divergence; et les amplitudes de la partie initiale (phasique) et terminale (tonique) de convergence et de divergence.

L'analyse statistique a été réalisée sous Statsoft / Statistica (7.1). Les statistiques descriptives ont rapporté la moyenne et la dispersion (écarts-types et erreurs standards) des valeurs étudiées. Les statistiques inférentielles se sont appuyées sur des tests non paramétriques (i.e tests de Mann-Whitney, de Kruskal-Wallis ou de Wilcoxon) étant donné que le test de Shapiro-Wilk a révélé que certaines distributions ne suivaient pas la loi normale et étaient impossibles à normaliser. Une valeur de $p < 0,05$ a été considérée comme significative.

Résultats

Résultats des Quotients Plantaires et constitution des groupes

Nous avons obtenu un QP moyen de 126, similaire à celui de Dujols (20). Dix-neuf sujets avaient un QP > 100 (162 ± 61) et ont

été classés « SQPN », et 12 sujets avaient un QP < 100 (69 ± 23) et ont été classés « sujets IAP ».

Les deux groupes n'étaient pas significativement différents en ce qui concerne l'âge, la taille, le poids, la stéréo-acuité, l'acuité visuelle, et l'amplitude d'accommodation ($p > 0,05$). La seule différence entre les deux groupes était leur QP ($p < 0,01$), les sujets IAP ayant un QP plus bas que les SQPN (Tableau 1).

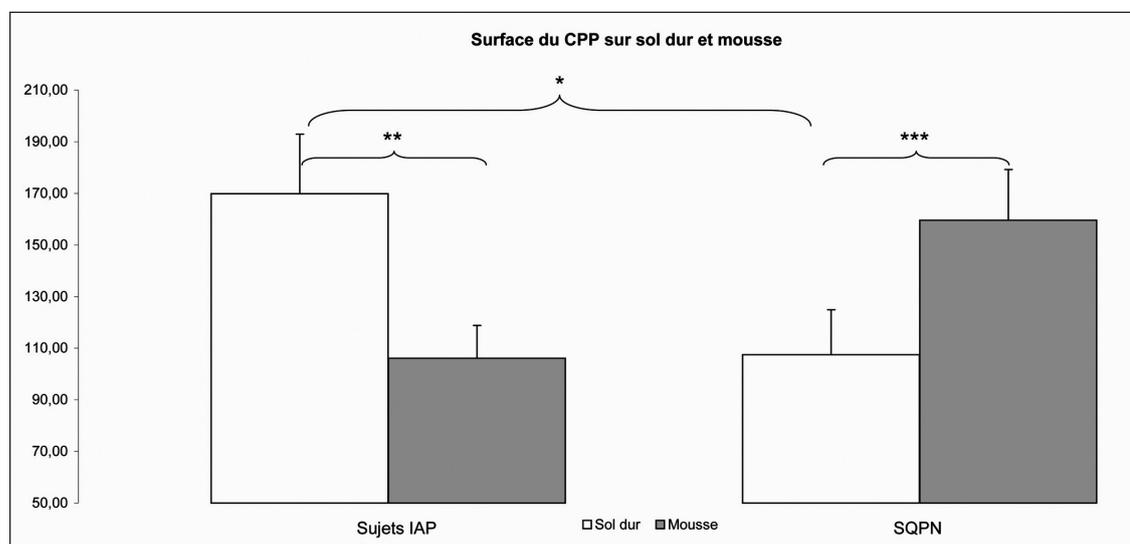
Comparaison de la qualité du contrôle postural des deux groupes

En condition de fixation visuelle, la Surface des sujets IAP était significativement plus grande sur sol dur ($p = 0,01$). Sur mousse, la Surface des sujets IAP présente une tendance à être plus petite que celle des SQPN ($p = 0,07$).

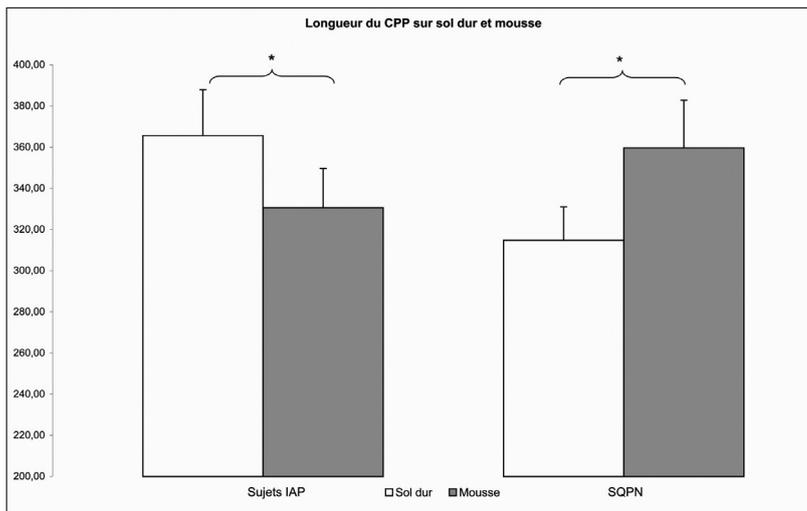
Les deux groupes de sujets ne présentaient de différence significative ($p > 0,05$) sur aucun des autres paramètres posturaux (Longueur et Variance de la Vitesse sur sol dur et sur mousse). Ces résultats sont résumés dans le Tableau 2 et présentés dans les Figures 1, 2 et 3.

	En fixation visuelle		Lors des mouvements des yeux		
	Sol dur	Mousse	Contrôle	EMI®	EME
Surface du CPP (mm²)					
Sujets IAP	169,83 ± 79.95	106,09 ± 44.13	121 ± 34.64	97 ± 34.64	107 ± 24.25
SQPN	107,49 ± 76.15	159,58 ± 85.48	106 ± 34.87	85 ± 17.44	95 ± 26.15
Longueur du CPP (mm)					
Sujets IAP	365,60 ± 77.32	330,58 ± 65.96	300,48 ± 50.30	319,80 ± 77.15	306,11 ± 57.82
SQPN	314,74 ± 70.79	359,67 ± 100.95	332,85 ± 72.58	325,57 ± 74.67	316,49 ± 69.44
Variance de la Vitesse du CPP (mm²/s²)					
Sujets IAP	27,96 ± 24.04	18,46 ± 9.08	17 ± 6.93	14 ± 3.46	14 ± 3.46
SQPN	16,73 ± 7.54	26,69 ± 21.88	17 ± 4.36	15 ± 4.36	15 ± 4.36

> Tableau 2: performances posturales des sujets / Moyennes et écart-types des paramètres posturaux dans chaque condition

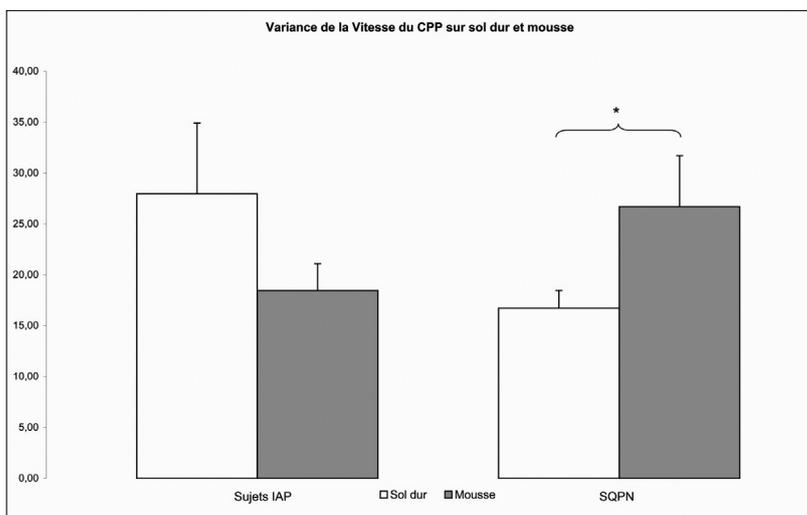


> Figure 1: surface d'oscillation du CPP des sujets IAP et des SQPN (mm²). Moyenne de la Surface des excursions du Centre des Pressions Plantaires pour chaque condition testée. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards; les astérisques indiquent les différences significatives, avec * pour $p < 0,05$, ** pour $p < 0,01$, *** pour $p < 0,001$.



› Figure 2 : longueur des déplacements du CPP des sujets IAP et des SQPN (mm).

Moyenne de la Longueur des déplacements du Centre des Pressions Plantaires pour chaque condition testée. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards; les astérisques indiquent les différences significatives, avec * pour $p < 0.05$.



› Figure 3 : variance de la Vitesse des déplacements du CPP des sujets IAP et des SQPN (mm²/s²).

Moyenne de la Variance de la Vitesse des déplacements du Centre des Pressions Plantaires pour chaque condition testée. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards; les astérisques indiquent les différences significatives, avec * pour $p < 0.05$.

Lors des mouvements des yeux, il n'y avait aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les sujets IAP et les SQPN quelle que soit la condition de stimulation plantaire (sans stimulation, avec inserts plantaires internes ou externes bilatéraux), sur aucun paramètre postural.

Comparaison de la qualité du contrôle de la vergence des deux groupes

Il n'y avait aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les deux groupes de sujets quelle que soit la condition de stimulation plantaire, sur aucun paramètre de la vergence. Ces résultats sont résumés dans le [Tableau 3](#).

Effets de la mousse

Sur l'ensemble des sujets, il n'y avait aucun effet significatif de la mousse concernant les différents paramètres posturaux ($p > 0,05$). Cette absence d'effet significatif sur l'ensemble des sujets est due à des comportements opposés de chaque sous-groupe.

En effet, chez les SQPN, l'interposition de mousse s'accompagne d'une augmentation significative de la Surface ($p < 0,01$), de la Longueur ($p = 0,01$) et de la Variance de la Vitesse ($p = 0,04$) du CPP comparativement au sol dur, indiquant un contrôle postural de moins bonne qualité dans cette condition.

Chez les sujets IAP, à l'inverse, l'interposition de mousse s'accompagne d'une diminution significative de la Surface ($p < 0,01$), et de la Longueur ($p = 0,02$) du CPP comparativement au sol dur, indiquant un contrôle postural de meilleure qualité dans cette condition. De plus il y a une tendance parasignificative à l'augmentation de la Variance de la Vitesse ($p = 0,07$) sur mousse comparé au sol dur ([Fig.1, 2 et 3](#)).

Discussion

Résultats des Quotients Plantaires

Avec un QP moyen de 126 nos résultats sont en accord avec la littérature ⁽²⁰⁾, et confirment que les sujets sont plus stables sur sol dur que sur mousse, ce qui se traduit par un QP > 100. Il faut noter que dans la littérature les auteurs utilisent des plaques de mousse molle et épaisse de plusieurs centimètres, qui induisent des effets mécaniques et sensoriels ⁽³⁾, ces derniers impliquent aussi bien l'extéroception que la proprioception plantaire ^(2,3). Ici, nous avons utilisé une mousse fine et ferme afin de focaliser l'action sur les afférences cutanées ^(20,22,23).

Comparaison de la qualité du contrôle postural et oculomoteur des deux groupes

Les sujets IAP semblent plus instables (Surface significativement plus importante) que les SQPN lorsqu'ils se tiennent sur

	Contrôle	EMI®	EME
DIVERGENCE			
Amplitude totale (degrés)			
Sujets IAP	3.91 ± 0.80	3.92 ± 0.52	3.90 ± 0.66
SQPN	3.98 ± 0.83	3.89 ± 0.78	4.08 ± 0.70
Amplitude phasique (degrés)			
Sujets IAP	0.99 ± 0.17	1.06 ± 0.17	1.05 ± 0.17
SQPN	0.97 ± 0.31	1.06 ± 0.31	1.00 ± 0.31
Amplitude tonique (degrés)			
Sujets IAP	2.97 ± 0.83	2.91 ± 0.55	2.84 ± 0.83
SQPN	3.01 ± 0.65	2.83 ± 0.65	3.08 ± 0.57
Latence (millisecondes)			
Sujets IAP	206 ± 28	215 ± 28	217 ± 35
SQPN	210 ± 44	211 ± 44	211 ± 44
CONVERGENCE			
Amplitude totale (degrés)			
Sujets IAP	5.59 ± 1.28	5.56 ± 1.28	5.61 ± 1.35
SQPN	5.44 ± 1.87	5.60 ± 1.79	5.66 ± 1.61
Amplitude phasique (degrés)			
Sujets IAP	1.49 ± 0.48	1.57 ± 0.55	1.54 ± 0.59
SQPN	1.65 ± 0.57	1.81 ± 0.70	1.70 ± 0.65
Amplitude tonique (degrés)			
Sujets IAP	4.09 ± 1.00	3.99 ± 1.00	4.07 ± 1.00
SQPN	3.79 ± 1.26	3.90 ± 1.26	4.02 ± 1.26
Latence (millisecondes)			
Sujets IAP	190 ± 21	190 ± 21	193 ± 24
SQPN	186 ± 26	185 ± 26	190 ± 35

› Tableau 3: performances oculomotrices des sujets

Moyennes et écarts-types des paramètres oculomoteurs dans chaque condition

un sol dur et en condition de fixation visuelle uniquement (pas lors des mouvements des yeux). Ce résultat est cependant à relativiser car le seul indicateur significatif d'une différence de stabilité entre les deux groupes de sujets est la Surface d'oscillations du CPP, or ce critère intervient dans la classification des sujets (i.e. calcul du QP). Il n'y a pas de différences significatives entre les groupes concernant le contrôle de la vergence. Les deux premières hypothèses posées sont donc rejetées. Deux raisons peuvent être avancées pour expliquer ces résultats.

Tout d'abord, il faut rappeler que la population était composée de sujets jeunes et sains. Il est donc probable que la présence de l'IAP était trop récente pour induire une différence de qualité de contrôle postural et oculomoteur entre les groupes, malgré l'existence d'une différence significative dans l'utilisation des afférences plantaires, aussi bien pour le contrôle postural que pour le contrôle de la vergence⁽¹⁸⁾. En effet, plusieurs auteurs considèrent qu'en raison de l'adaptabilité du système postural⁽³⁸⁾, le passage d'un état « normal » à un état « pa-

thologique » se fait de manière très progressive, avec d'abord des dysfonctionnements asymptomatiques, puis l'apparition de symptômes (douleurs...) et enfin de lésions^(39,40,41,42).

Une autre explication possible est que l'utilisation différente des afférences cutanées plantaires ne relève pas d'une dysfonction latente des récepteurs plantaires, mais d'une simple idiosyncrasie : certains sujets seraient physiologiquement plus « dépendants » d'autres sources d'information. Cette hypothèse nous semble peu probable car il est connu qu'en physiologie les afférences podales constituent une source d'informations majeure pour assurer la stabilité en orthostatisme⁽⁴³⁾, avec en particulier un rôle prépondérant des afférences cutanées plantaires⁽¹⁾. C'est la raison pour laquelle nous avons retenu l'hypothèse de nociception non consciente (Inefficacité des Afférences Plantaires et non simple « indépendance plantaire »), rejoignant la notion clinique d'EIAP (voir 18 pour une explication plus complète). Les résultats obtenus concernant les performances posturales sur mousse confirment aussi cette interprétation.

Effets de la mousse

L'absence d'effet significatif de la mousse sur le contrôle postural sur l'ensemble de la population suggère qu'une mousse présentant ces caractéristiques d'épaisseur et de dureté n'induit pas d'instabilité mécanique susceptible d'engager les afférences proprioceptives des muscles du pied et de la cheville, contrairement aux mousses plus épaisses. Il semble donc que son action concerne les afférences extéroceptives plantaires, confirmant l'avis de cliniciens ^(22,23).

Cette absence d'effet significatif sur l'ensemble de la population s'explique par des effets opposés dans chaque sous-groupe: la mousse rend les SQPN plus instables (sur les critères de Surface, Longueur et Variance de la Vitesse du CPP), alors qu'elle rend les sujets IAP plus stables sur ces mêmes critères. La mousse permettant de réharmoniser la répartition des pressions plantaires ⁽²⁾ et d'atténuer les afférences cutanées ⁽⁵⁾, ces résultats plaident donc en faveur de l'hypothèse d'Inefficacité des Afférences Plantaires non symptomatique. En effet, l'atténuation d'afférences normales dans le groupe des SQPN rend logiquement ces sujets plus instables, alors que l'atténuation d'afférences nociceptives dans le groupe des sujets IAP améliore leur stabilité. Lorsque la nociception est supprimée par la mousse il n'y a plus de différence significative dans la stabilité des sujets IAP et des SQPN.

Enfin, des résultats obtenus dans une autre étude ⁽⁴⁴⁾ confirment aussi cette explication: les sujets IAP intègrent moins bien leurs afférences visuo-oculomotrices que les SQPN, situation que nous avons nommée « asynergie visuo-podale ». Cela ne semble pas avoir d'intérêt physiologique, et ne semble donc pas compatible avec l'hypothèse de repondération / variation physiologique dans l'utilisation des afférences cutanées plantaires. En effet, plusieurs auteurs proposent que le « poids » affecté à l'intégration des différents signaux sensoriels est ajusté de façon dynamique par un mécanisme dit de « repondération sensorielle », et dépend de leur fiabilité et du contexte environnemental (voir 32 pour revue). Selon ces auteurs, l'ajustement optimal du poids des entrées sensorielles consiste à diminuer l'utilisation de celles qui sont génératrices de bruit, et augmenter celles qui sont capables de fournir un cadre de référence fiable.

Conséquences diagnostiques

Le caractère asymptotique de cette nociception plantaire incite à les rechercher systématiquement chez les patients ⁽²²⁾. Ces auteurs ont proposé initialement que des « variations posturales cliniquement et instrumentalement objectivables » permettent de les mettre en évidence suite à leur « inhibition ». Cependant, comme le soulignent *Weber et al* ⁽²⁶⁾, la définition de cette entité clinique reste « imprécise » et nécessite d'être clarifiée. Quels descripteurs posturographiques pourraient-ils être considérés comme nécessaires et suffisants pour affirmer un diagnostic d'EIAP? Quelle mousse doit être utilisée? *Nouhet et Villeneuve* ⁽²³⁾ ont suggéré qu'une mousse fine et ferme (Orthomic, 3mm d'épaisseur, dureté shore 37A) induise des variations de la Surface d'oscillation du CPP, avec le plus souvent une augmentation de la Surface, mais parfois une diminution. Cependant cette première étude clinique ne comprenait pas d'analyse statistique et portait sur une population importante mais non sélectionnée (sujets asymptotiques ou douloureux, âgés de 21 à 71 ans). En outre, les conditions

d'une éventuelle randomisation n'étaient pas précisées. Peu après *Weber et al* ⁽²⁵⁾ ont remis en question ces premiers résultats. Les auteurs ont évalué les effets stabilométriques de l'Orthomic (3 ou 6 mm) sur un onze sujets sains (avec randomisation et analyse statistique). Leurs résultats n'ont pas permis de mettre en évidence de variation significative des critères de Surface, Vitesse Moyenne et Variance de la Vitesse du CPP par rapport au sol dur (Yeux Ouverts, pour 3 et 6 mm d'épaisseur). *Weber et Gagey* ⁽²⁴⁾ rapportent quant à eux une augmentation significative de la Surface, Longueur et Variance de la Vitesse du CPP (Yeux Ouverts ou Yeux Fermés) lors de l'interposition d'un polystyrène expansé « ferme » de 15 mm d'épaisseur chez 21 sujets jeunes et sains. Mais ces résultats obtenus avec une mousse plus épaisse peuvent être dus à des effets à la fois mécaniques et sensoriels, impliquant donc l'extéroception et la proprioception plantaire ^(2,3).

L'ensemble de nos résultats répondent à la troisième question que nous avons posé et précisent les effets d'une mousse fine sur le contrôle postural, apportant une première clarification à la définition des EIAP. Ils montrent que l'interposition de la mousse choisie permet de mettre en évidence des différences de comportement postural sur les critères de Surface, mais aussi de Longueur et, dans une moindre mesure de Variance de Vitesse du CPP, confirmant et complétant les résultats de *Dujols* ⁽²⁰⁾. La classification des sujets en fonction de leur QP (inférieur ou supérieur à 100) sur cette mousse révèle aussi des comportements différents dans l'utilisation des afférences plantaires lors de leur stimulation par des inserts plantaires fins ⁽²⁸⁾.

En effet, il existe également des méthodes cliniques de diagnostic de cette nociception plantaire. L'amélioration des résultats de tests cliniques comme le *Bassani* (test des pouces montants) ou l'Épreuve Posturo-Dynamique permettrait de la mettre en évidence ^(8,22,26). Cependant les quelques études cliniques ayant tenté d'évaluer la qualité diagnostique de tests concluent que leur reproductibilité est insuffisante, que ce soit pour la partie podo-pelvienne de l'Épreuve Posturo-Dynamique ⁽⁴⁵⁾, ou pour l'ensemble de ce test ⁽²⁷⁾. Selon ces auteurs la définition clinique de l'EIAP est donc contestable.

De même *Leporck et Villeneuve* ⁽²²⁾ ont proposé initialement que la « stimulation [des EIAP] par une palpation appuyée doit réveiller la douleur », mais ces mêmes études ^(45,26,27) ont montré de faibles reproductibilités (intra et inter praticien) du diagnostic de point douloureux plantaire à la palpation; ainsi qu'une faible corrélation de l'amélioration de l'Épreuve Posturo-Dynamique sur mousse et de la présence de point douloureux plantaire à la palpation. *Weber et al* ⁽²⁶⁾ concluent qu'« aucune des épreuves cliniques qui permettent d'observer les réponses à la mise sur mousse n'est actuellement validée ». Pour ces raisons, en attendant que des études métrologiques de meilleur niveau soient entreprises pour ces tests cliniques, nous avons préféré utiliser la méthode objective du QP, qui reste à ce jour la seule à être basée sur une littérature internationale indexée.

Nous avons également fait le choix de ne pas utiliser de tests subjectifs d'évaluation de la sensibilité plantaire. En effet, notre population était composée de sujets jeunes et sains (notamment sans pathologie neurologique); les sujets n'avaient donc pas de raison de présenter de déficit sensitif. Une étude clinique de *Janin et Dupui* ⁽⁴⁸⁾ a suggéré une absence de différence de perception

d'un mono-filament de 10g chez des sujets porteurs et non porteurs d'EIAP. Cette même étude suggère aussi une augmentation du seuil de discrimination (évalué au compas de Weber) chez les sujets porteurs d'EIAP. Cependant, l'utilisation de tests comme le mono-filament ou le compas de Weber (ou esthésiomètre) implique une absence d'hyperkératose plantaire au niveau des zones testées. Or, des durillons plantaires (non douloureux) sont fréquents mais l'étude précitée ne précise pas l'éventuelle prise en compte de ce facteur et avait utilisé la méthode de diagnostic clinique (discutable) des EIAP pour catégoriser les sujets. Nous avons donc choisi de ne pas nous appuyer sur ces résultats, tant que des preuves scientifiques plus robustes concernant une éventuelle différence de sensibilité plantaire entre sujets porteurs et non porteurs d'EIAP ne sont pas apportées.

Récemment, Janin⁽⁴⁶⁾ a comparé la méthode clinique (comparaison de l'Epreuve Posturo-Dynamique sur sol dur et sur mousse de 3mm d'épaisseur) et la méthode stabilométrique (QP sur mousse de 6mm). Les résultats non concordants entre les deux méthodes suggèrent également que la méthode clinique (dépendante de l'appréciation du praticien, contrairement au QP) soit contestable. Cependant, l'auteur fait remarquer que ces deux approches évaluent des aspects différents du contrôle moteur : la méthode clinique s'intéresse d'éventuelles variations lors d'un acte moteur volontaire (le sujet doit réaliser des inflexions rachidiennes), alors que la méthode stabilométrique évalue le contrôle postural (automatique). Ces résultats appellent donc eux aussi une clarification de la définition originelle des EIAP, qui ne fait pas cette distinction, et regroupe douleurs conscientes et nociceptions non conscientes, susceptibles d'impliquer des bases neurales différentes. Le support neuro-anatomique de ce processus nociceptif reste inconnu à ce jour^(33, 28), bien que la réversibilité rapide des effets suggère l'implication de processus neuro-fonctionnels plus que lésionnels⁽⁴⁴⁾.

Conséquences thérapeutiques

Plusieurs auteurs suggèrent une prévalence considérable de cette nociception plantaire asymptomatique : 21 % de la population saine et 35 à 41 % chez les patients douloureux^(22,23), 66 % chez les enfants dyslexiques⁽⁴⁷⁾, 39 % chez des sujets jeunes et sains^(28, 44).

Comme indiqué précédemment, plusieurs études cliniques (utilisant toutes la méthode de diagnostic clinique, contestable, des EIAP) suggèrent des corrélations entre la présence d'EIAP et différents symptômes^(e.g. 35), ou altérations posturales et sensori-motrices^(48,49). Nos résultats nuancent ces conclusions et suggèrent que la nociception plantaire doit être présente suffisamment longtemps pour produire des effets plus marqués sur ces différents aspects, notamment cliniques. Des expériences longitudinales complémentaires utilisant la méthode objective de diagnostic de l'IAP par le Quotient Plantaire sont donc nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Enfin, des études évaluant les méthodes thérapeutiques destinées à neutraliser cette nociception plantaire mériteraient d'être entreprises. Nos résultats démontrent que la mousse que nous avons utilisé permet de fonctionnaliser les afférences plantaires, confirmant la recommandation de Villeneuve^(8,9). Cependant cette mousse n'est pas adaptée à un usage thérapeutique (dans des se-

melles orthopédiques ou posturales). Quelques études montrent que l'utilisation d'inserts plantaires fins rétrocapitiaux permet de diminuer les pressions⁽⁵⁰⁾, ou les forces⁽⁵¹⁾ sous la première tête métatarsienne lors de la marche; mais il semble que ce ne soit pas le cas en statique⁽⁴⁴⁾. Sachant que la physiopathologie supposée de l'IAP^(33, 28) propose que la nociception soit liée à un excès de pression sous la première tête métatarsienne, les études podométriques précitées^(50,51) suggèrent donc indirectement que l'utilisation de tels inserts plantaires permette de prendre en charge la cause de l'IAP, du moins lors de la marche. Des démonstrations directes seraient toutefois nécessaires pour établir clairement ces liens.

Conclusion

En conclusion, les résultats de cette étude ne permettent pas de montrer que les sujets IAP sont plus instables que les SQPN, hormis sur le critère de Surface d'oscillations du CPP en condition de fixation visuelle, paramètre intervenant dans la classification des sujets. De même, les sujets IAP ne présentent pas un contrôle de la vergence de moins bonne qualité que les SQPN, contrairement à ce que nous attendions. Les deux premières hypothèses posées sont donc invalidées.

En revanche, l'étude des effets de la mousse montre que les sujets IAP présentent une stabilité paradoxalement améliorée lorsqu'ils se tiennent sur celle-ci, y compris sur les critères de Longueur et de Variance de Vitesse, alors que les SQPN sont rendus logiquement plus instables sur ces mêmes critères. Cela permet de répondre à la troisième question posée et confirme que l'IAP est bien liée à un processus nociceptif non conscient assimilable à la notion clinique d'Epine Irritative d'Appui Plantaire, comme le proposent également d'autres études^(28, 44). Enfin, ces résultats montrent que l'utilisation du QP sur une mousse telle que celle utilisée ici, avec une classification basée sur le seuil de 100, est un moyen simple, non invasif et fiable de diagnostic de l'IAP asymptomatique, ce qui pourrait avoir un intérêt curatif et préventif. En outre, ce quotient donne une valeur quantitative permettant d'apprécier la qualité de l'extéroception plantaire de manière plus fine que les tests cliniques.

Implications pour la pratique

- L'inefficacité des Afférences Plantaires (IAP) asymptomatique semble liée à une nociception non consciente, confirmant la notion clinique d'Epine Irritative d'Appui Plantaire.
- Elle peut être objectivée par la méthode stabilométrique du Quotient Plantaire (QP) sur Dépron® 6mm.
- Cette mousse révèle des comportements posturaux différents entre les sujets IAP (QP<100) et les sujets au QP > 100 sur la Surface, la Longueur et la Variance de la Vitesse.
- De jeunes sujets sains IAP et des sujets au QP normal n'ont pas de différences de contrôle de la posture et de la vergence.
- Les sujets IAP utilisent moins leurs afférences plantaires pour le contrôle postural et oculomoteur.

Contact

Arnaud Foisy
arnaud.foisy@gmail.com

Références

- Kavounoudias A, Roll R, Roll JP. Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation. *J Physiol*. 2001;1,532(Pt 3):869-78.
- Chiang JH, Wu G. The influence of foam surfaces on biomechanical variables contributing to postural control. *Gait & Posture*. 1997;5:239-245.
- Patel M, Fransson PA, Lush D, Gomez S. The effect of foam surface properties on postural stability assessment while standing. *Gait Posture*. 2008;28(4):649-56.
- Isableu B, Vuillerme N. Differential integration of kinaesthetic signals to postural control. *Exp Brain Res*. 2006;174:763-768.
- Yi Y, Park S. Effect of reduced cutaneous cues on motion perception and postural control. *Exp Brain Res*. 2009;195(3):361-9. doi: 10.1007/s00221-009-1796-3. Epub 2009 Apr 29.
- Bourdiol RJ, Capelus F, Tan H, Hatoum P. Pied et statique. Paris: Maisonneuve; 1980.
- Villeneuve P. Régulation du tonus postural par informations podales. *Revue de podologie*. 1989;49:54.
- Villeneuve P. Cinquième leçon de Posturologie. In: Gagey PM, Bizzo G, Bonnier L, Gentaz R, Guillaume P, Marucchi C. Les huit leçons de Posturologie. Paris: Association Française de Posturologie; 1990.
- Villeneuve P. Les traitements posturopodiques. In: Villeneuve P. Pied, équilibre et posture. Paris: Frison Roche; 1996.
- Villeneuve P, Villeneuve-Parpay S. Examen clinique postural. *Rev. Podologie*. 1991;59:37-43
- Faugouin A, Helbert S. Etude stabilométrique de l'élément du médio-tarse. In: Villeneuve P. Pied, équilibre et posture. Paris: Frison Roche; 1996.
- Janin M, Toussaint L. Change in center of pressure with stimulations via anterior orthotic devices. *Gait and Posture*. 2005;21: 879.
- Janin M, Dupui P. The effects of unilateral medial arch support stimulation on plantar pressure and center of pressure adjustment in young gymnasts. *Neuroscience Letters*. 2009;461:245-248.
- Garrigues B. Anomalies de la localisation spatiale visuelle chez l'enfant dyslexique. Etude préliminaire. In: Weber B., Villeneuve P. Posturologie clinique. Dysfonctions motrices et cognitives. Paris: Masson ; 2007.
- Desenne P, Schoenstein C. Etude préliminaire sur la modification du bilan orthopédique par stimulation plantaire. In: Villeneuve P. Pied, équilibre et posture. Paris: Frison Roche; 1996.
- Neycenssas C. Effet des orthèses plantaires à visée posturale sur le test de Maddox. La neutralisation des Epines Irritatives d'Appui Plantaire Inconscientes dans cette prise en charge du Syndrome de Déficience Posturale est-elle utile ? Mémoire, DU PATA. Université de Bourgogne. 2013.
- Martins-Lalanne C, Briecke G, Leclerc D, Delterre S. Les barres antérieures influencent elles le maddox postural chez l'enfant normolecteur et chez l'enfant dyslexique ? Mémoire, DU PATA. Université de Bourgogne. 2013.
- Foisy A, Gaertner C, Matheron E, Kapoula Z. Controlling Posture and Vergence Eye Movements in Quiet Stance: Effects of Thin Plantar Inserts. *PLoS One*. 2015;4;10(12):e0143693.
- Leigh R, Zee D. Vergence eye movements. In: Leigh RJ., Zee DS. The neurology of eye movements. Oxford University Press; 2006.
- Dujols A. Quotient plantaire et conflit visuo-podal. *Agressologie*. 1991;32:192-4.
- Gagey PM, Weber B. Posturologie; Régulation et dérèglements de la station debout. Paris: Elsevier Masson; 1995.
- Leporck AM, Villeneuve P. Les épines irritatives d'appui plantaire, objectivation clinique et stabilométrique. In: Villeneuve P. Pied, équilibre et posture. Paris: Frison Roche; 1996.
- Nouhet B, Villeneuve P. La comparaison des enregistrements stabilométriques sur sol dur et sur mousse est-elle utilisable en pratique clinique ? In: Villeneuve P. Pied, équilibre et posture. Paris: Frison Roche; 1996.
- Weber B, Gagey PM. Modification des critères de stabilométrie par interposition d'une mousse entre sole plantaire et plateforme. In: Villeneuve P. Pied, équilibre et rachis. Paris: Frison Roche; 1998.
- Weber B, Nouhet B, Baudin B, Villeneuve-Parpay S, Villeneuve P. L'épaisseur d'une mousse dure entre sole plantaire et plate-forme modifie-t-elle certains critères du stabilogramme ? In: Villeneuve P. Pied, équilibre et rachis. Paris: Frison Roche; 1998.
- Weber B, Nouhet B, Villeneuve-Parpay S. Examen clinique et stabilométrique sur mousse, état de la question. ? In: Villeneuve P. Weber B. Pied équilibre et mouvement. Paris: Masson; 2000.
- Weber B, Villeneuve P, Villeneuve-Parpay S. Epreuve posturodynamique chez le sujet sain. In: Lacour M. Contrôle postural pathologie et traitement, innovations et rééducation. Marseille: Solal, Coll. Posture et Equilibre; 2002.
- Foisy A, Kapoula Z. How Plantar Exteroceptive Efficiency Modulates Postural and Oculomotor Control: Inter-Individual Variability. *Front. Hum. Neurosci*. 2016;10:228.
- Erkelens CJ, Van der Steen J, Steinman RM, Collewijn H. Ocular vergence under natural conditions. I. Continuous changes of target distance along the median plane. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*. 1989;236(1285), 417-440.
- Tyler CW, Elsaid AM, Likova LT, Gill N, Nicholas SC. Analysis of human vergence dynamics. *J Vis*. 2012;12(11). pii: 21.
- Fujimoto C, Murofushi T, Sugawara K, Chihara Y, Ushio M, Yamasoba T, Iwasaki S. Assessment of postural stability using foam posturography at the chronic stage after acute unilateral peripheral vestibular dysfunction. *Otol Neurotol*. 2012;33(3):432-6.
- Okumura T, Horii A, Kitahara T, Imai T, Uno A, Osaki Y, Inohara H. Somatosensory shift of postural control in dizzy patients. *Acta Otolaryngol*. 2015;135(9):925-30.
- Janin M. Sensibilité et motricité podales : leur influence sur le contrôle des activités posturo-cinétiques de sujets sains et pathologiques. Thèse de Doctorat. Comportement, Langage, Éducation, Socialisation, Cognition, Université de Toulouse III. 2009.
- Missauoui B, Portero P, Bendaya S, Hankie O, Thourmie P. Posture and equilibrium in orthopedic and rheumatologic diseases. *Neurophysiol Clin*. 2008;38:447-457.
- Foisy A. Quelles sont les conséquences des Epines Irritatives d'Appui Plantaire sur l'état de santé ? Mémoire d'ostéopathie, Collège Ostéopathique Européen, Paris, 2011.
- Pinsault N, Vuillerme N. Test-retest reliability of centre of foot pressure measures to assess postural control during unperturbed stance. *Med Eng Phys*. 200;931(2):276-86.
- Ruhe A, Fejer R, Walker B. On the relationship between pain intensity and postural sway in patients with non-specific neck pain. *J Back Musculoskelet Rehabil*. 2013;26(4):401-9.
- Winter DA. Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*. 1995;3:193-214.
- Weber B. Agression, médecine, maladie. *Agressologie*. 1964;5,1,3-5.
- Canguilhem G. Le normal et le pathologique. Paris: PUF; 1966.
- Harris AJ. Cortical origin of pathological pain. *The Lancet*. 1999;354:1464-1466.
- Dickey JP, Pierrynowski MR, Bednar DA, Yang SX. Relationship between pain and vertebral motion in chronic low-back pain subjects, *Clinical biomechanics*. 2002;17(5):345-352.
- Fitzpatrick R, McCloskey DI. Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *The Journal of physiology*. 1994;478(Pt1),173-86.
- Foisy A, Kapoula Z. Plantar Exteroceptive Inefficiency causes an asynergic use of plantar and visual afferents for postural control: Best means of remediation. *Brain Behav*. 2017;00:e00658.
- Nouhet B. Validation de l'épreuve posturodynamique : essais et premiers résultats. In: Lacour M. Posture et équilibre. Pathologies, vieillissement, stratégies, modélisation, Montpellier: Solal; 1997.
- Janin M. Quotient plantaire: capacité d'objectiver les épines irritatives d'appuis plantaires *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. 2016;46,4:263.
- Janin M. La répartition de l'Epine Irritative d'Appui Plantaire Inconsciente est-elle différente chez les enfants dyslexiques que chez les non dyslexiques? Congrès APE (SOFPEL), 2012.
- Janin M, Dupui P. Epine irritative d'appui plantaire: posturographie et somesthésie plantaire. In: Borel L., Lacour M. Contrôle postural et représentation spatiale. De la neurobiologie à la clinique. Marseille: Solal; 2007.
- Janin M, Ceci LA, Parreira RB. Nociceptive capacity of plantar irritating stimulus reduction influences postural control in children, teenagers, and adults. *MTP Rehab Journal*. 2015;011,(13):97-115.
- Hayda R, Tremaine MD, Tremaine K, Banco S, Teed K. Effect of metatarsal pads and their positioning: a quantitative assessment. *Foot Ankle Int*. 1994;15(10):561-6.
- Janin M. Marche athlétique: modification des pressions plantaires par des éléments d'orthèse. *Cinésiologie*. 2002;203:13-4.