

VARIABILITÉ DES PARAMÈTRES  
STABILOMÉTRIQUES AU DÉPART D'UNE  
ÉPREUVE D'ULTRA ENDURANCE DE  
MONTAGNE

Mémoire DIU posturologie clinique 2015

Olivier GARCIN

## INTRODUCTION :

The North-Face® Ultra-trail® du Mont-blanc (UTMB®) est une course d'ultra-endurance en une étape non-stop, d'une distance de 170km et de 9600m de dénivelé positif, se déroulant sur 3 pays pendant un temps maximum de 46 heures. Depuis 2003, nous intervenons en tant que podologue sur cette course au sein d'une équipe médicale formée de médecins, infirmières, kinésithérapeutes, podologues et secouristes.

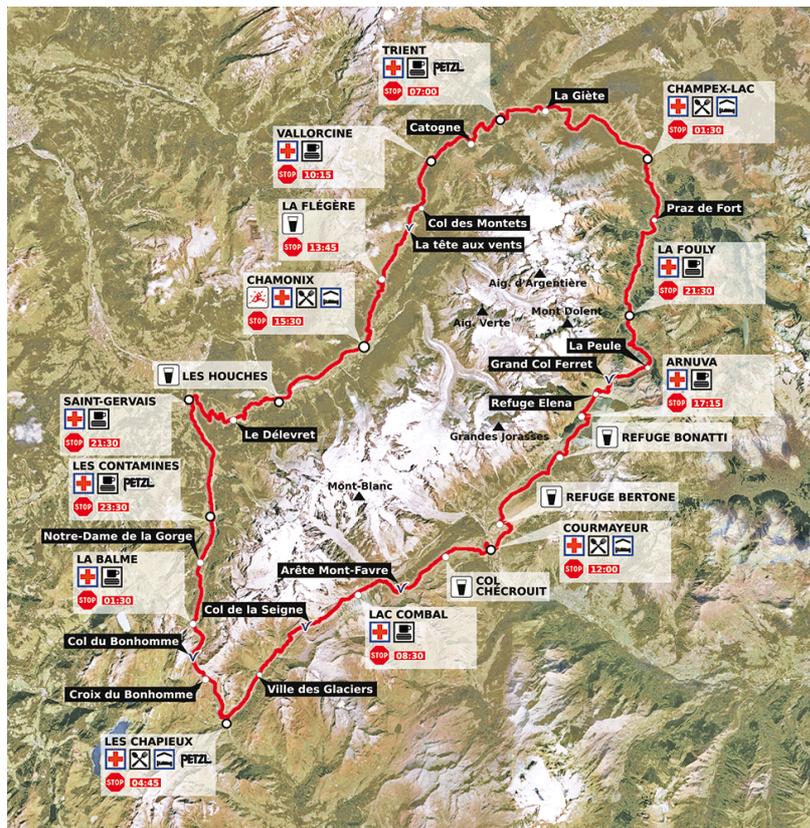


Figure 1 Parcours de l'UTMB

L'UTMB® est une course de nature extrême qui entraîne une fatigue sans égal amenant le coureur à ses limites physiques, physiologiques et mentales. Ce type d'épreuve physique épuisante diminue l'efficacité du système musculaire (Iepers et al., 1997 ; Narbonne et al., 2004 ; Guichard et al., 2002). Le tonus musculaire gère la station érigée (Gagey et Weber, 2001) et comme une bonne statique prépare une bonne dynamique (Fukuda T., Studies on human dynamic postures from the viewpoint of postural reflexes. 1961) il est logique d'effectuer une étude du statokinésigramme des coureurs sur une telle épreuve.

Selon l'étude menée en 2009 sur le « Motif médical des abandons Ultra-trail du Mont-Blanc®Edition 2009 » étude réalisée par le Club Mont-Blanc Cœur et Sport, en association avec les Trailers du Mont-Blanc, de Sylvain Isnardon et Laurence Poletti; les causes d'abandon sont neuro-musculaires pour près d'un tiers des cas, alimentaire dans un peu moins de 20 % des cas, le reste tient à des imprévus accidentels ou techniques.

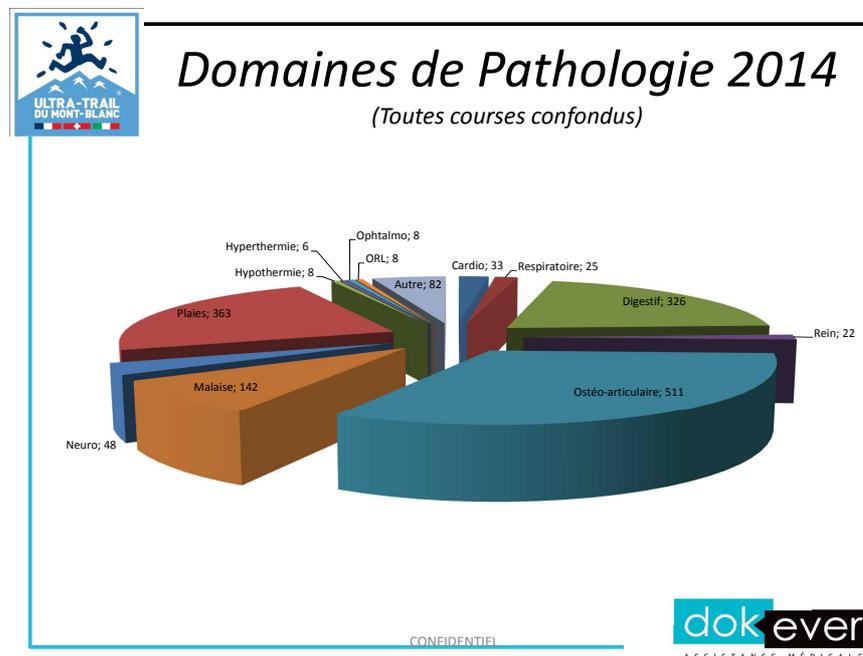


Figure 2 Pathologies recensées sur les courses de l'ultra-trail en 2014

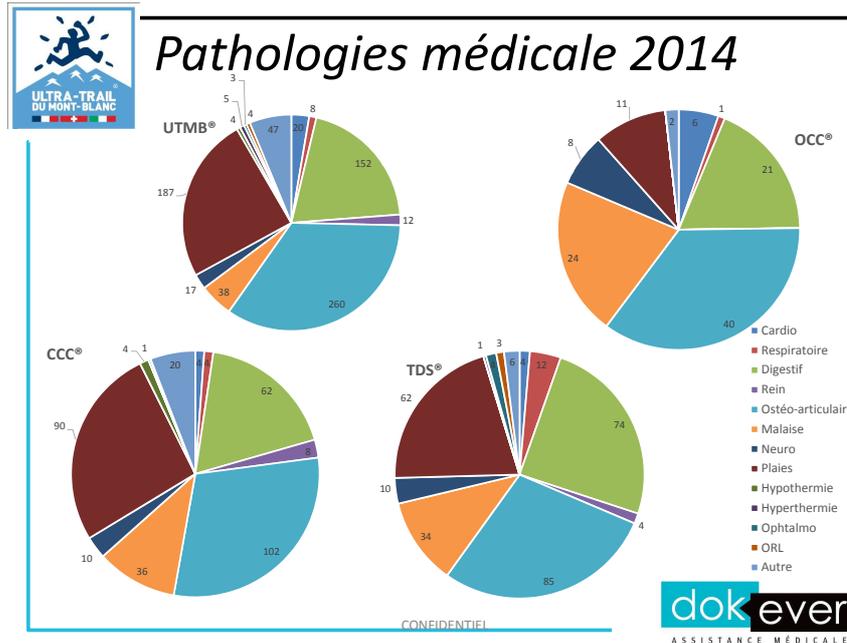


Figure 3 Pathologies recensées course par course en 2014

L'exercice physique est un facteur d'aggravation des oscillations posturales car les contractions des muscles respiratoires et cardiaques, sont générateurs d'oscillations corporelles (Bove et al, 2007). Il a été démontré que les exercices musculaires généraux suffisamment stimulants sur le plan énergétique, tels que la course à pied (lepers et al, 1997), le cyclisme (Derave et al., 1998 ; Vuilmerme et Hintzy, 2007), la marche (Narbonne et al, 1997 ; Gauchard et al., 2002), le triathlon ironman (Nagy et al., 2004 ; Burdet et Rougier,2004), le biathlon (Simoneau et al., 1996), affectent le contrôle postural.

De cette réflexion, Gély et Garcin (Quels sont les paramètres subjectifs ou objectifs qui sont prédictifs d'une performance sur une course d'endurance telle que l'UTMB ®, 2011) ont analysés les facteurs prédictifs d'une performance d'un coureur sur une course d'ultra-endurance telle que l'UTMB® à travers le ressenti de la fatigue ainsi que sur la stabilité posturale. Cette initiative fut motivée par le travail de Guillaume Millet (Neuromuscular

Consequences of an Extreme Mountain Ultra-Marathon, Guillaume Y. Millet, Katja Tomazin, Samuel Verges, Christopher Vincent, Régis Bonnefoy, Renée-Claude Boisson, Laurent Gergelé, Léonard Féasson, Vincent Martin) portant sur la fatigue et la récupération de la fonction neuromusculaire lors d'un effort extrême. Celle-ci met en évidence une perte de capacité d'effort musculaire, consécutive à l'épreuve, de l'ordre de 39% au niveau du triceps sural et 40% du quadriceps.

Le triceps sural est composé du soléaire et des gastrocnémiens, responsable de l'extension du pied en décubitus dorsal et de la force propulsive de la locomotion, mais aussi limite l'avancée du tibia sur le pied lors de la marche et stabilise le genou en position unipodal semi-fléchi du genou. Le soléaire, muscle du triceps sural, gère avec les gastrocnémiens, la verticalité de l'axe corporel (Régulation et dérèglement de la station debout P-M Gagey, B Weber Ed Masson p125). Sa participation à la régulation du tonus postural en tant que muscle antigravitaire représente 10% de sa contraction maximale lors de la station debout (Physiologie de la posture - CoKiNE-Nancy). Selon les conclusions de l'équipe de Guillaume Millet la fatigue neuro-musculaire n'est pas dépendante du niveau de performance, de l'âge ou de l'expérience des sujets.

Le but de l'étude Gély&Garcin de 2011 était d'observer les répercussions de cette fatigabilité sur le tonus postural d'aplomb par le biais de mesures sur plate-forme stabilométrique. Avec ces mesures effectuées sur une quarantaine de coureurs tout au long de la course (départ, km 40, km 80, km 120, km 170) Alexandre Gély a fait une surprenante découverte : les finishers présentent une variable LFS proche de la perfection au moment du départ c'est à dire de 1, tandis que ceux qui s'arrêtent au km 80 et 120 ont une LFS inférieure à 1 (hypercontrôle) et ceux qui s'arrêtent au km 40 voir avant ont une LFS supérieure à 1 (hypocontrôle).

Après discussion, il semblait intéressant de réaliser une contre étude afin de vérifier la véracité des conclusions de cette l'étude. Cette nouvelle étude a été effectuée lors de la 12<sup>ème</sup> édition de l'UTMB® se déroulant du 29 au 31 Août 2014.

Cette nouvelle étude a deux objectifs :

- 1- Vérifier la véracité de l'étude de Gély&Garcin de 2011,
- 2- Etudier si la position des pieds libres ou imposés sur la plate-forme stabilométrique modifient ou pas les paramètres stabilométriques des sujets.

## PROTOCOLE :

Population : Tous coureurs participant à l'UTMB® 2014, homme et femme de tout âge.

Ceux-ci doivent être consentant après l'explication du protocole à suivre. L'étude fut menée sur 31 personnes, soit 30 hommes et 1 femme.

<i>Coureurs</i>	<i>Age</i>	<i>Pointure</i>	<i>Poids (kg)</i>
31	40,64+/- 8,94	43,55+/-1 ,86	70,22+/-6,95

*Tableau I : Données anthropométriques*

Critères d'inclusion : Tous les coureurs de l'édition 2014 de l'UTMB® (ce sont des coureurs expérimentés ayant fait des course qualificatives) sont acceptés. De cette manière nous sommes le plus représentatif de la population globale des coureurs UTMB®.

Poste de mesure : Les sujets sont recrutés au moment du retrait des dossards.

Mise en place des mesures : Avant chaque mesure les volontaires doivent répondre à un questionnaire (Annexe-1).

Les sujets sont placés sur la plate-forme mise à niveau horizontal à 90 cm d'un fil à plomb et au moins à 50 cm des murs latéraux.

Deux mesures seront prises les pieds nus en position imposée et en position libre avec les yeux fermés (afin de reproduire les conditions de l'étude précédente). Les dossards pairs commenceront par la prise d'empreinte en position imposée et les dossards impairs commenceront par la position libre. Pour la prise d'empreinte pied imposé : les pieds du sujet sont placés contre le gabarit de telle manière qu'ils fassent un angle de 30° entre eux, dont la bissectrice coïncide avec l'axe sagittal de la plate-forme. Pour la prise d'empreinte pied libre, nous demandons au sujet de monter sur la plateforme et d'effectuer trois pas de piétinement

sur place afin que chacun trouve sa position de confort. A noter que la position libre des pieds ne permet pas une reproductibilité des mesures dans le temps.



Figure 4. Conditions de prise d'empreinte

Enfin s'il n'y a pas de références sur les conditions de l'environnement sonore, l'attention portée par le coureur sur la mesure ne doit pas être perturbée par des stimulations auditives afin de ne pas fausser les enregistrements stabilométriques. Les consignes sont données avant le début de l'enregistrement afin de s'assurer du bon déroulement de la prise d'empreinte :

- Mettez les bras le long du corps
- Restez tranquille, détendu, sans bouger, en regardant le fil à plomb. N'éternuez pas, ne vous grattez pas
- Regardez le fil
- Fermez les yeux et comptez jusqu'à ce qu'on vous dise que l'enregistrement est fini
- Commencez à compter, c'est parti.

Si une des consignes n'est pas respectée, nous recommençons l'enregistrement.

Les prises d'empreintes n'ont pas pu être prise dans des conditions optimum d'enregistrement comme dans un laboratoire, mais respectent au maximum les mêmes critères d'enregistrement. A noter que les conditions et le milieu de prises d'empreintes de l'étude 2014 sont exactement les mêmes que celle de l'étude de 2011.

Matériel de mesure : L'étude sera faite sur plateforme de stabilométrie Médicapteurs Fusyo 16 bits en 5Hz pendant 51.2s. Le choix du 5Hz pour la prise de mesure est justifié par l'étude de 2011. En effet les mesures précédentes ont été réalisées sur les mêmes plates-formes en 5Hz. Donc afin de comparer les résultats, nous ne pouvons faire les mesures en 40Hz.

<b>Taille (longueur/largeur/hauteur)</b>	<b>530 x 600 x 70 mm</b>
<b>Epaisseur</b>	<b>35 mm</b>
<b>Poids</b>	<b>12,5 kg</b>
<b>Surface active</b>	<b>400 x 400 mm</b>
<b>Charge maximale</b>	<b>250 kg</b>
<b>Capteurs</b>	<b>Pour la podométrie : nouvelle génération de capteurs calibrés garantissant une excellente précision des données. Pour la stabilométrie : 3 jauges de contrainte</b>
<b>Taille du capteur</b>	<b>8 x 8 mm</b>
<b>Epaisseur du capteur</b>	<b>0,15 mm</b>
<b>Nombre de capteurs</b>	<b>2304 soit 48 x 48</b>
<b>Pression mini/maxi par capteur</b>	<b>de 0,4 N à 100 N</b>
<b>Non-linéarité</b>	<b>&lt;0,2%</b>
<b>Fréquence d'acquisition</b>	<b>Pour la podométrie : 200 images / seconde. Pour la stabilométrie : réglable de 5 à 40 Hz</b>
<b>Type d'interface PC/plate-forme</b>	<b>USB</b>
<b>Alimentation</b>	<b>Par le port USB</b>
<b>Système d'exploitation requis</b>	<b>Windows XP, Vista, Seven</b>

*Tableau II : Caractéristiques de la plate-forme Fusyo*

Les prises d'empreintes ont été réalisées dans des conditions qui sont quantifiables et reproductibles selon des normes 85 de l'AFP (édité pour l'ADAP, 20rue du rendez-vous, 75012 Paris). Les mesures sont toutes faites les Yeux Fermés (YF).

La plateforme de stabilométrie enregistre et quantifie la fonction d'équilibration statique. Il s'agit d'une approche globale des systèmes sensori-moteurs impliqués dans la régulation de la posture et de l'équilibre. Elle rend compte du centre de pression podal (CdP) : c'est le point d'application de la résultante des forces de réaction provoquées par la plateforme. Chaque fois que le centre de gravité s'écarte de sa position moyenne, une réponse posturale est déclenchée par les afférences sensorielles signalant l'instabilité posturale, c'est les mécanismes de rétroaction (Massion 1997). L'activité musculaire tonique détermine la position moyenne du corps dans l'espace. L'activité musculaire phasique permet de maintenir par de fins mouvements le corps à l'intérieur du polygone de sustentation. Ces deux activités musculaires sont très liées dans les efférences du système postural fin (Gentaz et al., 1979).

## TRAITEMENT DES DONNEES :

Différents paramètres seront étudiés grâce aux enregistrements :

- Surface du statokinésigramme (SKG) : mesure la précision avec laquelle le système postural situe l'individu dans son environnement. Ce qu'on cherche à évaluer est donc une dispersion : la dispersion des positions successives de la projection du centre de pression sur le polygone de sustentation.
- X-moyen (moyenne des valeurs des abscisses du centre de pression) et Y-moyen (moyenne des valeurs des ordonnées du centre de pression).
- Longueur du SKG et le paramètre LFS (longueur en fonction de la surface) : correspond à la somme des distances entre deux positions successives du CdP. Il augmente avec le temps et la fréquence d'échantillonnage car le nombre de positions enregistrées est alors plus importants (Bazert, 2008). Or le chemin parcouru par le centre de pression est plus ou moins long. Ce chemin que le centre de pression parcourt par unité de surface est comparé à des valeurs normales expérimentales grâce à un paramètre de longueur en fonction de la surface, appelé paramètre LFS. Un chemin strictement normal est représenté par un LFS égal à l'unité (Régulation et dérèglement de la station debout ; P-M Gagey, B Weber Ed Masson p125). Ce paramètre nous fournit très rapidement une **évaluation** de l'économie d'énergie dépensée par le sujet pour contrôler sa posture orthostatique. Le quotient LFS ne mesure pas la dépense d'énergie par le système postural (Vallier, 1995).

## ANALYSES STATISTIQUES :

Le traitement des paramètres de stabilométrie a été effectué par des Analyses en Composantes Principales (ACP).

L'analyse en composante principale a porté sur les enregistrements avant départ. Après vérification de la normalité des distributions par les tests, en admettant que la normalité ne soit reconnue que par un seul de ces tests. Après normalisation des distributions anormales en passant aux valeurs logarithmiques de base e. L'ACP a été réalisée par le programme XLSTAT ® d'Addinsoft. Les résultats seront ensuite validés par une ANOVA

## RÉSULTATS :

1. Etude de la normalité : la surface imposée est normale aux quatre tests, tandis que la surface libre est non symétrique aux quatre tests. La distribution totale des surfaces est normale après être passée au Ln (log népériens). Tous les autres paramètres étudiés, X-moyen, Y-moyen et LFS sont normaux.
2. L'analyse en composante principale (ACP) :

### a) ACP à 1 facteur et 2 modalités de 2014

Les 5 variables aléatoires (Surface (S), Longueur (L), LFS (F), VFY (V), Variance de la vitesse (E)) de 2011, ainsi que le facteur distance courue (Distance 80km (3) et 170km (1)) de l'étude de 2011 sont repris lors de cette ACP.

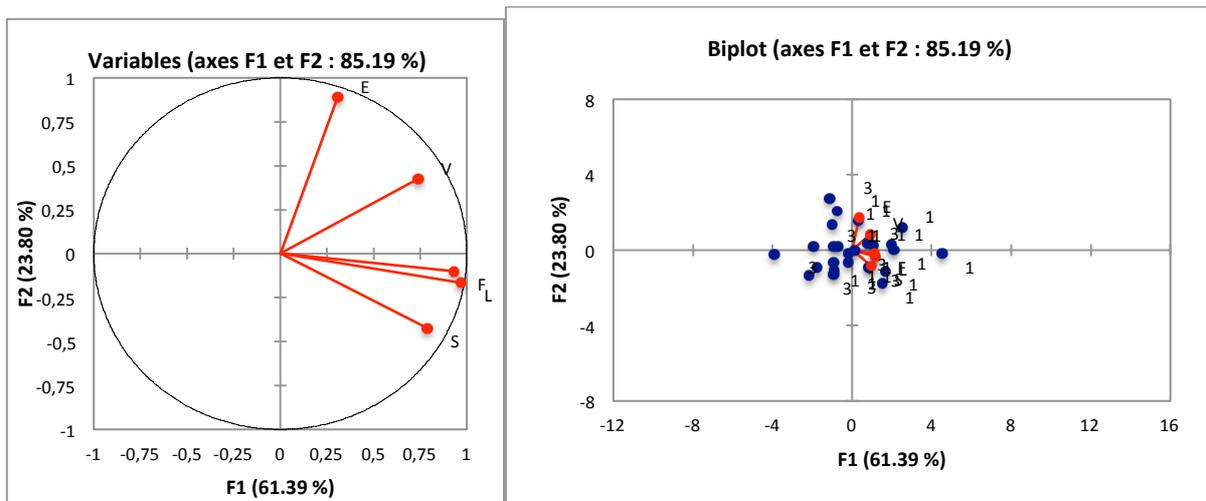


Figure 5 et 7 bis

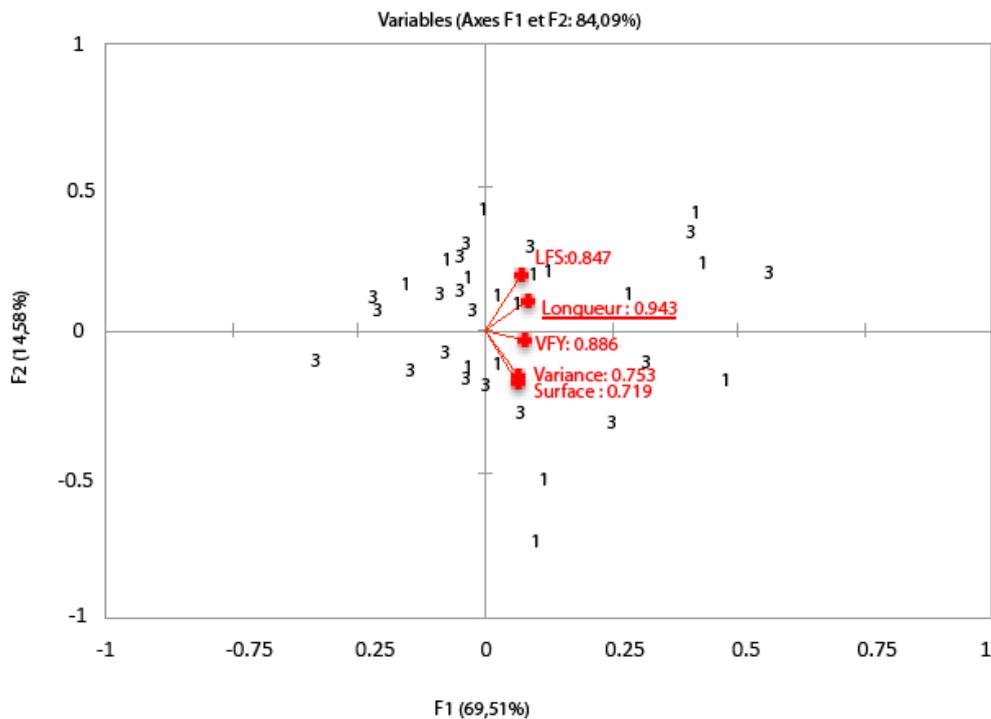
A gauche : les axes du référentiel dans l'espace à 5 dimensions : F : paramètre LFS, L : paramètre Longueur, S : paramètre Surface, V : paramètre VFY, E : paramètre Variance vitesse

A droite : répartition des sujets appartenants aux groupes 170km = 1 et 80km = 3 de 2014

Longueur	VFY	Variance	LFS	Surface
<b>L</b>	<b>V</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>S</b>
0,968	0,740	0,889	0,932	0,789

*Tableau III : Tableau des coefficients de corrélations entre les différentes variables et l'axe 1 de l'ACP de 2014*

Au vu des résultats de l'étude menée en 2011 par Gély&Garcin, où l'ACP à 1 facteur de deux modalités étudiées par 5 variables aléatoires sont similaires.



**Figure 6**

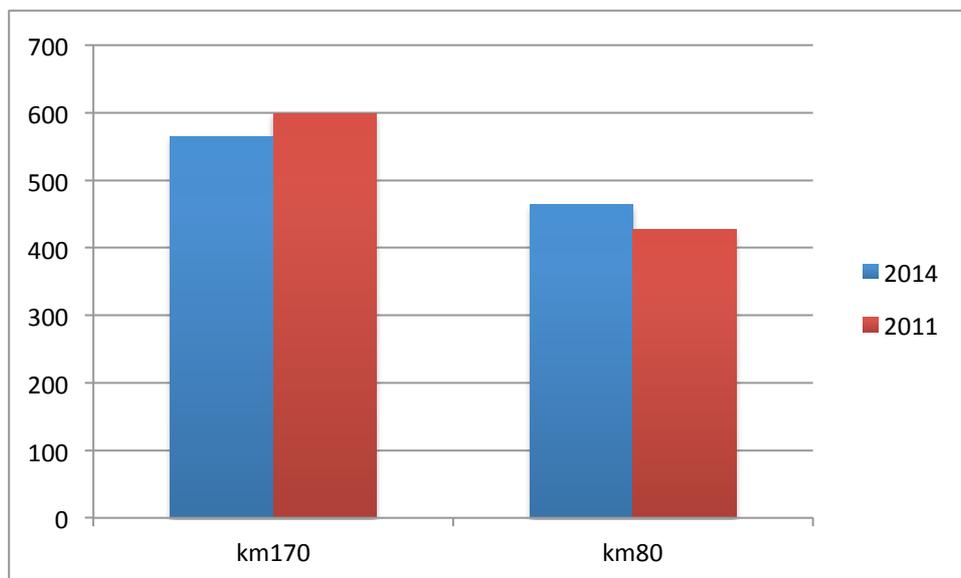
*Représentation d'une ACP à un facteur à deux modalités (G Finishers :1; G 80 : 3) et 5 variables (Longueur, VFY, Variance, LFS, Surface) lors de l'étude de Gély & Garcin en 2011*

Longueur	VFY	Variance	LFS	Surface
<b>L</b>	<b>V</b>	<b>C</b>	<b>F</b>	<b>S</b>
0,943	0,886	0,753	0,847	0,719

*Tableau IV : Tableau des coefficients de corrélations entre les différentes variables et l'axe 1 de l'ACP de l'étude de Gély & Garcin 2011.*

Le même schéma de projection plane du nuage de points à 5 dimensions se retrouve entre 2011 et 2014 et donne une assez bonne image de la variabilité du nuage : 84,09% pour 2011 et 85,19% pour 2014.

Par conséquent un observatoire des longueurs et LFS au départ est intéressant afin de comparer à celle de 2011.



**Figure 7 Comparaison des longueurs XY 2014 & 2011**

Le groupe finisher présente une longueur de l'ordre de 565,05mm en 2014 contre 599,03mm en 2011. Le groupe 80 km présente une longueur du statokinésigramme de 464,32mm en 2014 contre 426,48mm en 2011.

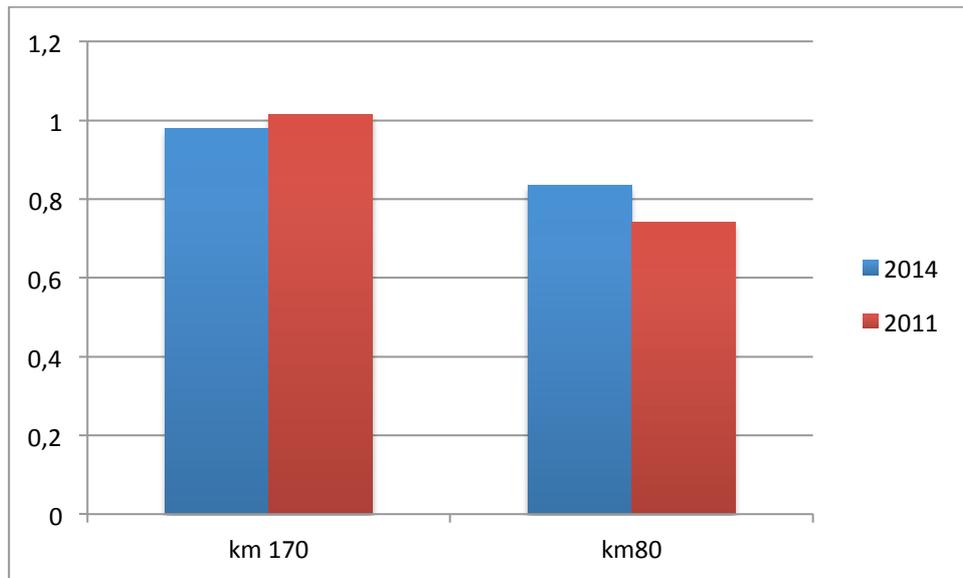


Figure 8 Comparaison des moyennes des LFS au départ des groupes 170 et 80 km en 2014 & 2011

Il en est de même pour les moyennes des LFS au départ de la course, qui pour le groupe des finshers est de 0,978 en 2014 contre 1,015 en 2011 et de 0,836 en 2014 contre 0,74 en 2011 pour le groupe 80 km.

	S	L	F	V	E
R <sup>2</sup>	0,077	0,174	0,201	0,044	0,045
F	1,916	4,841	5,769	1,061	1,079
Pr > F	0,180	0,038	0,025	0,314	0,310
M	1,916	4,841	5,769	1,061	1,079
	0,180	0,038	0,025	0,314	0,310

Tableau V : ANOVA associée aux ACP

Les ANOVA associées aux ACP montrent que la longueur et le LFS distinguent significativement les modalités 1 (170 km) et 3 (80km) dans les deux cas(2011 et 2014).

### 3. Etude au t de student de la position des pieds libres ou imposés :

#### Préparation

Nous faisons la différence entre le paramètre en position imposée moins le paramètre en position libre : I-L

Nous vérifions la normalité de ces distributions des différences. Toutes sont normales.

Pour les surfaces nous faisons aussi le rapport des Surfaces (Max/Min) et pour les Y-moyens nous faisons aussi la différence des valeurs absolues.

### **t de Student**

Pour chaque distribution nous calculons le t de Student de l'échantillon comparé à une distribution fictive dont la moyenne est  $\emptyset$ . Si la moyenne des différences est pratiquement égale à  $\emptyset$ , cela signifie que nous ne trouvons pas de différence **SYSTÉMATIQUE** dans un sens ou dans un autre. Les différences varient aléatoirement, mais nous ne pouvons pas dire qu'elles sont systématisées.

Variable	t de student	ddl	p
Surface: S	0,128	30	ns
Longueur: L	1,361	30	ns
X-moyen: X	1,648	30	ns
Y-moyen: Y	3,636	30	<0,05
LFS: F	1,741	30	ns
VFY: V	0,515	30	ns
Variance Vitesse: A	3,299	30	<0,05
ANØ2X: X2	0,949	30	ns
ANØ2Y: Y2	1,96	30	ns

*Tableau VI : t de Student de la comparaison des moyennes des différences appariées des différents paramètres entre les positions (imposée moins libre).*

## DISCUSSION :

Les différentes ACP montrent que ce sont les paramètres phasiques Longueur et LFS qui départagent les groupes de coureurs comme en 2011 avec l'étude de Gély&Garcin, mais seulement pour les distances 80 km et 170km.

Alexandre Gély disait en 2011 : « *On peut donc proposer que le rapport, entretenu par le coureur, entre l'effort effectué pour la stabilisation du système postural d'aplomb (représenté par la Longueur) et la qualité de la stabilité de ce système postural d'aplomb (représenté par la Surface) puisse permettre au coureur d'aller plus loin. Ainsi donc le paramètre LFS est ici prédictif de performance dans cette épreuve d'endurance.* ». Ceci se confirme avec l'étude de 2014 .

Pour la position des pieds libre ou imposée, nous pouvons dire que cela induit :

- Pour les X-moyens des différences systématiques, dues au changement de position,
- Pour les Y-moyens des différences systématiques, dues au changement de position, et curieusement souvent vers l'avant... Mais rien ne peut être conclu.
- Pour les Surfaces, cela n'entraîne pratiquement aucun changement systématique.
- Pour la Variance de la Vitesse nous constatons, sur le t de Student, que la moyenne des différences n'est pas comparable à une moyenne nulle. Il y a donc un effet systématique de la position des pieds sur la Variance de la Vitesse; cet effet est une réduction, dans 25 cas sur 30, de la variance de la vitesse en situation pieds libres.

Nous pouvons remarquer que l'équation aux dimensions de la variance de la vitesse est identique à celle d'une accélération [ $LT^{-2}$ ]. Gagey a montré sur un échantillon de 152 sujets, que le coefficient de corrélation entre la variance de la vitesse du CdP et l'accélération du CdG est de 0,883 (non encore publié). Il semblerait donc que les sujets dépensent moins d'énergie lorsqu'ils sont enregistrés en situation libre des pieds.

## CONCLUSION :

L'étude de Gély&Garcin de 2011 montrait deux paramètres qui semblaient prédictifs de la performance du coureur en ultra endurance en tant que finir ou non. Devant un tel résultat, une certaine incertitude était de mise. Ce paramètre LFS indique que les personnes ayant un tonus postural le plus performant, ou le plus économique, leur permettant une meilleure stabilisation de leur corps dans un environnement donné, sont plus aptes à finir la course.

Un tel résultat nous amène à nous questionner sur le poids des entrées posturales pour une meilleure performance des coureurs d'ultra endurance. En effet, avec des épreuves se déroulant sur une durée de 46 heures, de jour comme de nuit, l'intégration des différentes entrées sensorielles doit être optimum. Lors des parties nocturnes, l'entrée visuelle étant erronée, les entrées plantaires (par le tact proprioceptif et somesthésique) et vestibulaires compensent la perte de repère visuelle (vicariance idiosyncrasique).

Le critère de performance du tonus postural ( $LFS = 1$ ) devient un nouveau paramètre à prendre en compte pour la préparation d'épreuve d'ultra endurance.

Lors de la première étude en 2011, les sujets ont été enregistré en position imposée. L'étude de 2014 a mis en opposition la position des pieds : libres ou imposées. Ormis la position du sujet en X et en Y due au changement de position du sujet, il n'y a pas de différence significatives en ce qui concerne les paramètres surface, longueur, LFS. Le paramètre « variance de la vitesse » est réduit de manière significative au t de student ( $p < 0,05$ ). En effet, le sujet en se positionnant de manière spontanée et libre sur la plate-forme dépenserait moins d'énergie à sa stabilisation. La mise en tension musculaire pour rattraper le déséquilibre permanent du sujet est moins importante (Walsh E.G., Muscles, masses and motion. The physiology of normality, hypotonicity, spasticity and rigidity. 1992).

Cette nouvelle hypothèse est d'actualité avec le débat permanent sur la position des pieds pour les prises d'empreintes stabilométriques. L'étude 2014 a pu montrer une certaine

reproductibilité des résultats de celle de 2011. Ce qui nous amènerait à effectuer une troisième étude pied libre afin de vérifier les résultats de 2014 avec toujours la même question en toile de fond : la reproductibilité de la mesure du SKG en position pied libre.

## REMERCIEMENT A

L'organisation de l'Ultra-Trail du Mont-Blanc : Catherine et Michel Poletti

P.M. Gagey

Mon ami Alexandre Gély

Tous mes collègues et amis intervenant en tant que podologue sur l'UTMB depuis de  
nombreuses années

A ma femme et collègue sur la course

L'association Podo'xygène