

Influence de la cadence d'échantillonnage sur les paramètres stabilométriques

Bernard & Pierre-Marie GAGEY

Étude à partir d'enregistrements réalisés à 40 Hz

Profitant d'une base de données relativement large d'enregistrements stabilométriques à 40 Hz (596 enregistrements), nous avons voulu en profiter pour regarder l'influence de la cadence d'échantillonnage sur différents paramètres calculés à partir de ces enregistrements. Pour cela, nous avons, pour chaque enregistrement 'déduit' de nouveaux enregistrements en sous-échantillonnant à 20, 10, 8, 5 et 4 Hz et, pour chaque fréquence, en prenant les relevés suivants :

- à 20 Hz nous avons 2 enregistrements 'déduts', en prenant soit les points pairs soit les impairs,
- à 10 Hz nous avons 4 enregistrements 'déduts'
- Etc.

Nous avons calculés les paramètres pour tous ces enregistrements 'déduts'.

Puis ces paramètres ont été «normés», c'est à dire divisés par leur valeur à 40 Hz, puis multipliés par 1000. Ce qui permet de comparer ces paramètres 'déduts' aux paramètres obtenus à partir de la mesure à 40 Hz (on multiplie par 1000 pour faciliter la lisibilité).

Pour chaque paramètre, pour chaque mesure, pour chaque fréquence, nous avons regardé la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart maximum-minimum.

Puis, en synthèse, pour chaque paramètre, pour chaque enregistrement, pour chaque fréquence, nous avons calculé la moyenne, le minimum et le maximum des paramètres obtenus pour tous les « enregistrements déduts » des 596 de départ. Pour simplifier la visualisation de ce tableau complexe (Voir Annexe 1), nous avons coloré la trame des fréquences à partir desquelles l'erreur pouvait dépasser 10%.

Nous ne prétendons pas que les 596 enregistrements de base soient un « échantillon représentatif », mais ils correspondent à des jeunes, des vieux, enregistrés yeux ouverts ou fermés, et ils donnent vraisemblablement une bonne idée de ce que l'on cherche.

Couper à 10% peut sembler beaucoup, mais ces 10% sont une erreur extrême.

Les paramètres étudiés sont classiques: « surface de l'ellipse contenant 90% des positions échantillonnées du centre de pression P » [Ellipse _P] et L_P; vitesse moyenne de P = «Longueur de la courbe divisé par le temps »

Mais nous avons utilisé aussi nos travaux qui permettent de calculer, à partir des positions du centre de pression, la courbe des positions de la projection du centre de gravité G. Nous avons donc calculé les paramètres:

- « surface de l'ellipse contenant 90% des positions échantillonnées du centre de gravité G » Ellipse_G, et L_G,
- «vitesse des déplacements de G» (paramètres : Ellipse_V, et L_V),
- «accélération de G» (paramètres: Ellipse_C, et L_C),
- constante de temps: Abscisse du 0,5 crossing de la fonction d'autocorrélation de l'accélération.

Analyse des résultats.

L'Ellipse de pression (Ellipse_P) est d'une remarquable stabilité. Cela tient au fait que c'est une mesure « statistique », mais à 4 Hz on commence à manquer de point.

En revanche la « vitesse de P » L_P s'avère très sensible à la fréquence. Pour comprendre, il faut réaliser que P est la somme de G (centre de gravité) et de son accélération, celle-ci étant pour beaucoup le résultat d'impulsions musculaires créant des « pics » de largeur de quelque 5 millisecondes. Avec un échantillonnage faible, beaucoup de ces pics sont écrétés, d'où une diminution de LP quand la fréquence diminue. De plus, en augmentant les cadences on ne réduit pas le bruit.

Pour les autres paramètres, il faut se rappeler que la méthode de calcul de G à partir de P effectue l'équivalent d'un filtrage (qui éliminent les pics cités plus haut), et donne un résultat relativement stable en fonction de la fréquence, ce qu'on vérifie par la bonne stabilité de L_G, et en partie de Ellipse _G.

En conclusion de cette première étude qui aurait voulu déduire indirectement si 40 Hz était une cadence suffisante, on peut dire que c'est vrai pour l'ellipse_P et L_G, mais pour L_P et la constante de temps, il y a un problème et pour progresser, sinon conclure, il faut refaire le même travail à partir de mesures effectuées à 300 Hz.

Étude à partir d'enregistrements réalisés à 300 Hz

Les analyses ont été réalisées par le même procédé que pour l'étude à partir d'enregistrements à 40 Hz, mais les résultats sont publiés sous forme de graphiques pour une plus grande facilité de lecture.

Les courbes affichées correspondent à :

- NOIR : ellipse du centre de pression
- ROUGE : ellipse du centre de gravité
- VERT : ellipse de la vitesse du centre de gravité
- BLEU : ellipse de l'accélération du centre de gravité

Vu l'objectif de ce travail, ce n'est pas la valeur du paramètre qui est tracée, mais cette valeur divisée par une moyenne prise sur la moitié la plus élevée des fréquences, donc TOUTES CES COURBES DOIVENT AVOIR LA VALEUR 1 COMME ORDONNÉE. ATTENTION A L'ÉCHELLE DES ORDONNÉES, elle change avec les figures.

Plus la cadence est élevée, moins les valeurs varient,

A 40 Hz on est déjà avec une stabilité de l'ordre du 1000^{ème} pour G et P et du 100^{ème} pour V et C (fig. 1).

A 5 Hz, la variation de G et P reste encore très faible, de l'ordre de 4.000^{ème}, mais elle augmente pour V et C pour atteindre le 100^{ème} (fig. 2).

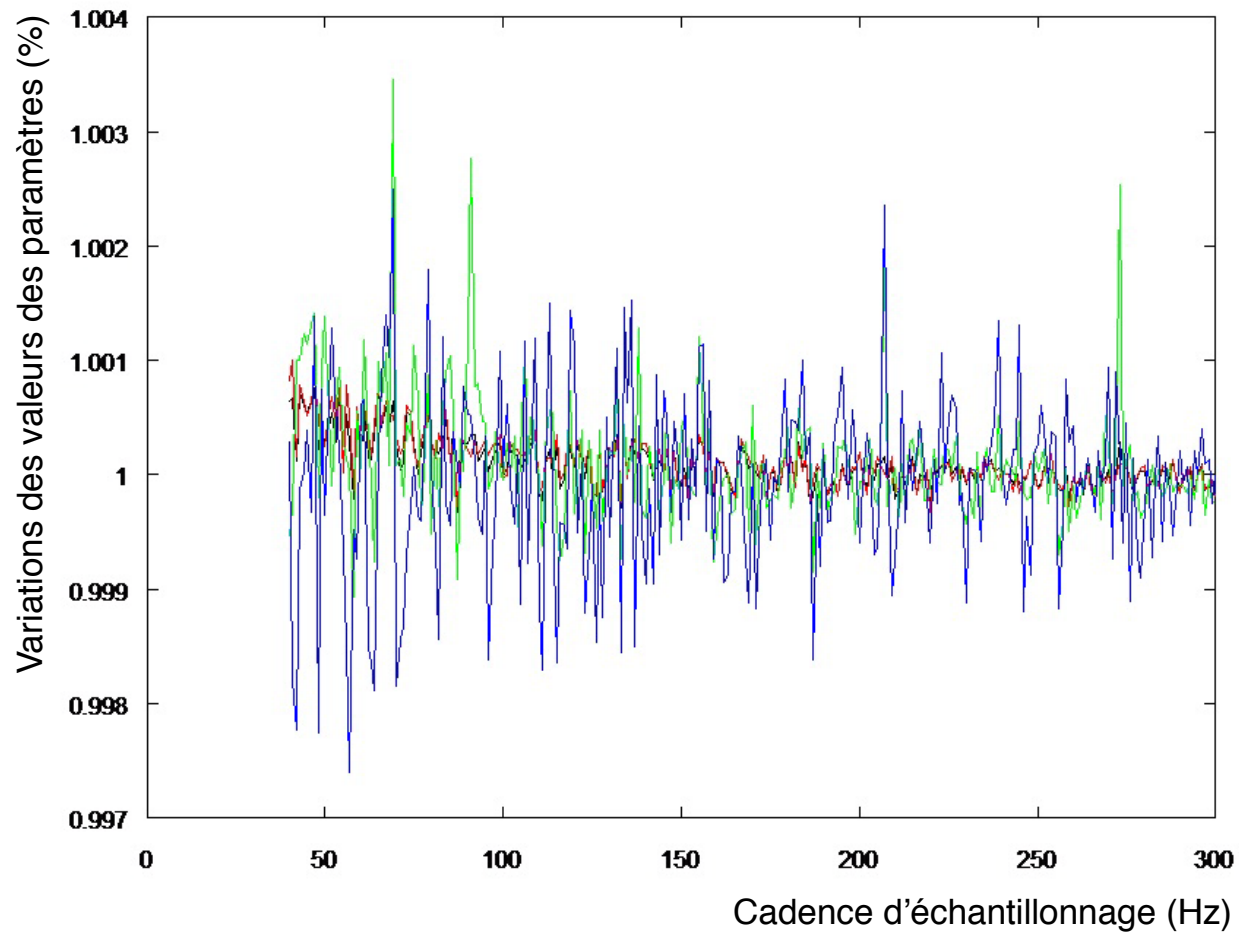


FIG. 1 — Rapport des valeurs des paramètres selon les cadences d'échantillonnage, de 40 à 300 Hz

Noir : ellipse du centre de pression; Rouge : ellipse du centre de gravité; Vert : ellipse de la vitesse du centre de gravité; Bleu : ellipse de l'accélération du centre de gravité. Pour une cadence de 40 Hz la variation atteint, pour les paramètres de vitesse et d'accélération du centre de gravité, 3 ou 4 millièmes des valeurs trouvées avec les cadences de 300 Hz. Pour les paramètres de positions du centre de pression et du centre de gravité la variation est inférieure à un millième.

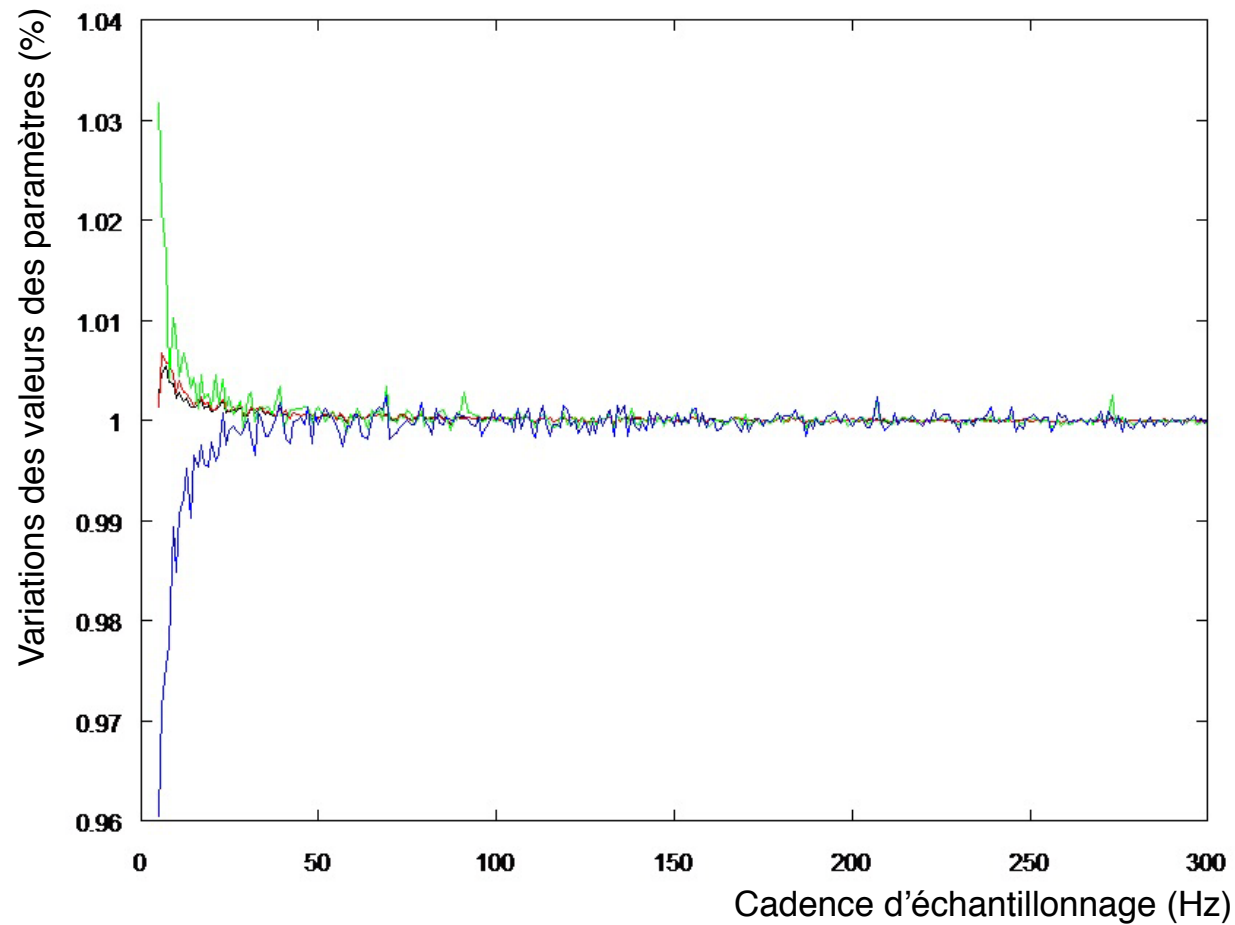


FIG. 2 — Rapport des valeurs des paramètres selon les cadences d'échantillonnage, de 5 à 300 Hz

Noir : ellipse du centre de pression; Rouge : ellipse du centre de gravité; Vert : ellipse de la vitesse du centre de gravité; Bleu : ellipse de l'accélération du centre de gravité. Pour une cadence de 5 Hz la variation atteint, pour les paramètres de vitesse et d'accélération du centre de gravité, 3 ou 4 centièmes des valeurs trouvées avec les cadences de 300 Hz. Pour les paramètres de positions du centre de pression et du centre de gravité la variation est inférieure à un centième.

Discussion

On sait que la longueur du statokinésigramme du centre de pression augmente régulièrement avec la cadence d'échantillonnage (fig. 3). Jusqu'à présent ce phénomène n'a été expliqué que par la segmentation de la courbe du statokinésigramme, comme si, jamais, et aussi élevée que soit la cadence d'échantillonnage, on ne pouvait trouver deux points successifs échantillonnés séparés par une droite; selon l'image de la longueur des cotes de la Bretagne rendue célèbre par Mandelbrot (1989). Cette supposition gratuite ne rend pas compte de la physionomie de la courbe observée sur la figure 3; Pourquoi ce changement de pente autour de 20 Hz?

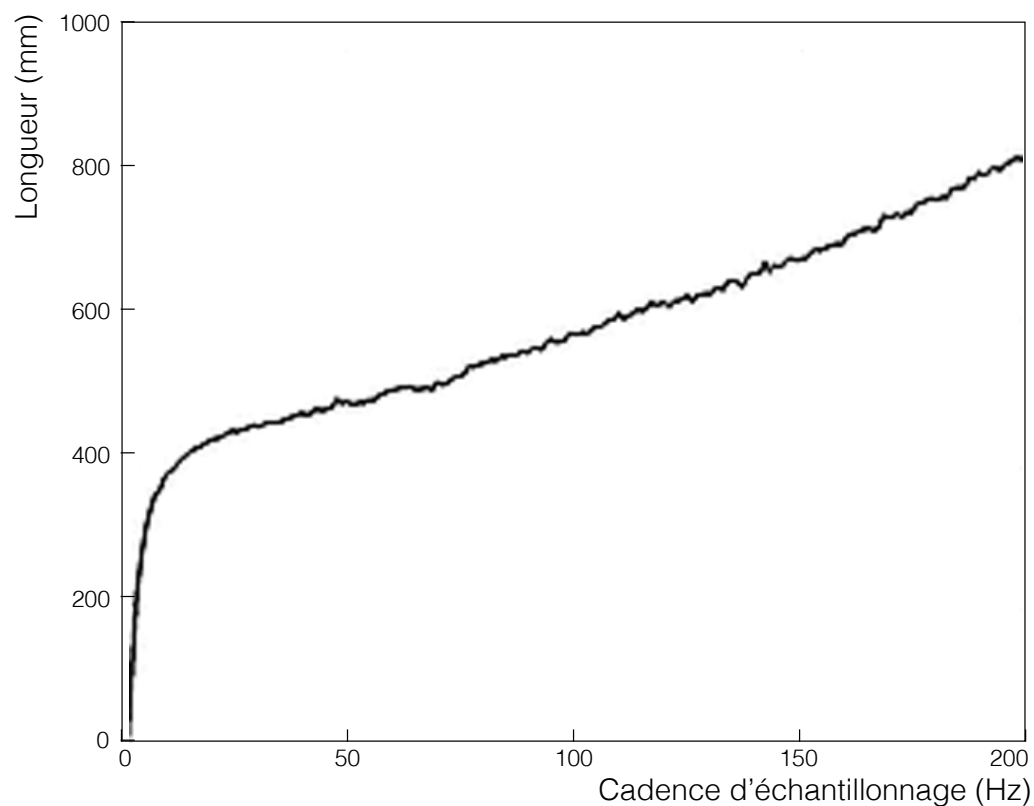


FIG. 3 — Longueur du statokinésigramme du centre de pression en fonction de la cadence d'échantillonnage.

Cette supposition oublie aussi que l'erreur maximale tolérée pour l'évaluation des distances entre deux positions successives échantillonnées du centre de pression est d'un dixième de millimètre, avec une «résolution» de cinq centièmes de millimètre.

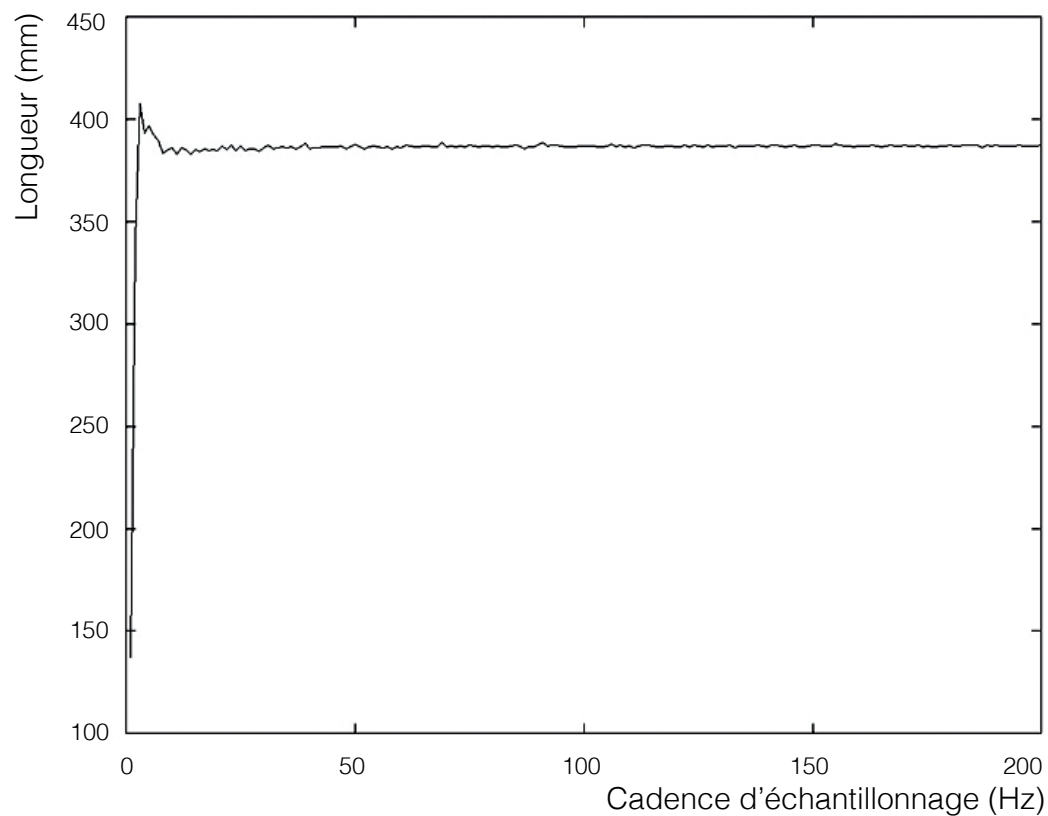


FIG. 4 — Longueur du statokinésigramme du centre de gravité en fonction de la cadence d'échantillonnage.

L'appareil de mesure a des limites, au-delà desquelles les informations de précision qu'il fournit ne sont plus que des bruits aléatoires. Lorsque le signal est échantillonné à 40 Hz, on sait que 10% déjà de la précision des informations fournies par la

plateforme n'est que du bruit (Gagey et al., 2001). La longueur du statokinésigramme étant calculée par une somme, ces bruits s'ajoutent à la valeur supposée de la longueur du statokinésigramme pour la faire croître constamment et régulièrement, aussi élevée que soit la cadence d'échantillonnage.

Il nous semble possible d'expliquer la forme de la courbe de la figure 3 en admettant qu'à partir de 20 Hz environ, la courbe du statokinésigramme séparant deux points successifs échantillonnés n'est plus segmentée, mais rectiligne, en moyenne et de plus en plus souvent au fur et à mesure qu'on monte en fréquence. A partir de 20 Hz environ l'augmentation supposée de la longueur du statokinésigramme serait due essentiellement au bruit de l'appareil de mesure.

Contrairement à la longueur du statokinésigramme du centre de pression, celle du centre de gravité (fig. 4) est retrouvée égale à elle-même à partir d'une cadence d'échantillonnage de 10 Hz environ jusque, dans cette étude, une cadence de 200 Hz. La masse du sujet agit comme un filtre passe-bas qui ne laisse pas passer beaucoup de déplacements du centre de gravité à une fréquence supérieure à 5 Hz. De plus on constate que la résolution analytique de l'équation de Winter (Gagey B, 2013) supprime le bruit de l'appareil de mesure.

Bibliographie

Mandelbrot B. (1989) Les objets fractals. Forme, hasard et dimension. Flammarion, Paris.

Gagey P.M. Ouaknine M., Sasaki O. (2001) Pour manifester la dynamique de la stabilisation: la plate-forme AFP40/16. In M. Lacour (Ed.) Posture et équilibre. Nouveautés 2001, conceptuelles, instrumentales et cliniques. Solal, Marseille, 95-106.

(Traduction anglaise: <http://ada-posturologie.fr/AFP4016Dyn-a.htm>)

Gagey B (2013) Du centre de pression au centre de gravité par un calcul analytique http://ada-posturologie.fr/CoP-CoG_analytical_calcul-f.pdf

Gagey B (2013) From the center of pressure to the center of gravity by an analytical calculation

http://ada-posturologie.fr/CoP-CoG_analytical_calcul-a.pdf

Annexe 1

Ellipse_P																					
		20 moyen ne	20 min	20 max	20 eca rt	10 moyen ne	10 min	10 max	10 eca rt	8 moyen ne	8 min	8 max	8 eca rt	5 moyen ne	5 min	5 max	5 eca rt	4 moyen ne	4 min	4 max	4 eca rt
	moyen ne	1000,5	1000,0	1001,1	1,1	1001,6	1000,2	1002,9	2,7	1001,3	999,0	1003,6	4,6	1003,7	997,5	1009,9	12,4	1002,4	992,0	1012,4	20,4
	min	1000,5	997,0	1001,0	0,0	1001,3	992,0	1002,0	0,0	982,6	970,0	996,0	0,0	1002,5	943,0	1004,0	1,0	953,0	916,0	977,0	1,0
	max	1001,0	1001,0	1004,0	7,0	1002,0	1002,0	1011,0	19,0	1004,0	1003,0	1018,0	35,0	1004,0	1003,0	1064,0	121,0	1009,2	1007,0	1095,0	179,0
			0%				1%				3%				6%				10%		
Ellipse_G																					
		20 moyen ne	20 min	20 max	20 eca rt	10 moyen ne	10 min	10 max	10 eca rt	8 moyen ne	8 min	8 max	8 eca rt	5 moyen ne	5 min	5 max	5 eca rt	4 moyen ne	4 min	4 max	4 eca rt
	moyen ne	1000,7	1000,2	1001,1	1,0	1002,2	1000,8	1003,6	2,8	1002,0	999,6	1004,6	5,0	1007,6	1000,7	1014,4	13,8	1008,7	998,3	1018,7	20,3
	min	1000,0	998,0	1000,0	0,0	1001,0	993,0	1001,0	0,0	988,2	976,0	997,0	0,0	1002,3	963,0	1003,0	1,0	969,1	930,0	985,0	1,0
	max	1004,5	1004,0	1005,0	5,0	1023,8	1019,0	1031,0	17,0	1035,8	1033,0	1038,0	56,0	1130,5	1093,0	1168,0	136,0	1182,3	1164,0	1213,0	211,0
			1%				3%				4%				17%				21%		
Ellipse_V																					
		20 moyen ne	20 min	20 max	20 eca rt	10 moyen ne	10 min	10 max	10 eca rt	8 moyen ne	8 min	8 max	8 eca rt	5 moyen ne	5 min	5 max	5 eca rt	4 moyen ne	4 min	4 max	4 eca rt
	moyen ne	1001,4	1001,1	1001,7	0,6	1005,8	1004,4	1007,2	2,7	1009,2	1006,4	1012,1	5,7	1025,3	1016,7	1033,7	16,9	1040,3	1025,6	1055,1	29,6
	min	998,0	995,0	1000,0	0,0	994,0	985,0	1001,0	0,0	991,6	982,0	998,0	0,0	988,4	972,0	1002,0	1,0	985,8	970,0	1000,0	2,0

	max	1006,0	1006,0	1006,0	6,0	1033,8	1030,0	1038,0	18,0	1063,4	1046,0	1080,0	34,0	1173,1	1126,0	1233,0	167,0	1288,4	1238,0	1361,0	256,0
			6%				38%				80%				233%				361%		
Ellipse_C																					
		20 moyenne	20 min	20 max	20 ecart	10 moyenne	10 min	10 max	10 ecart	8 moyenne	8 min	8 max	8 ecart	5 moyenne	5 min	5 max	5 ecart	4 moyenne	4 min	4 max	4 ecart
	moyenne	998,8	998,4	999,2	0,8	992,7	990,4	995,1	4,7	986,8	982,1	991,6	9,5	959,9	946,3	973,4	27,1	930,8	906,7	954,7	48,1
	min	998,0	993,0	998,0	0,0	987,5	945,0	988,0	0,0	955,2	900,0	973,0	0,0	907,1	781,0	936,0	2,0	850,1	735,0	876,0	5,0
	max	999,5	999,0	1005,0	12,0	996,5	996,0	1035,0	88,0	994,6	993,0	1058,0	154,0	978,5	975,0	1075,0	269,0	965,8	957,0	1094,0	297,0
			1%				6%				10%				22%				27%		
Constante temps																					
		20 moyenne	20 min	20 max	20 ecart	10 moyenne	10 min	10 max	10 ecart	8 moyenne	8 min	8 max	8 ecart	5 moyenne	5 min	5 max	5 ecart	4 moyenne	4 min	4 max	4 ecart
	moyenne	1001,1	1000,7	1001,4	0,7	1005,0	1002,3	1007,6	5,2	1007,5	1002,0	1012,9	10,8	1006,2	989,9	1023,5	33,6	978,8	953,5	1006,2	52,7
	min	993,0	993,0	993,0	0,0	983,3	949,0	986,0	0,0	950,6	825,0	961,0	0,0	791,3	786,0	799,0	1,0	770,9	760,0	781,0	5,0
	max	1022,5	1021,0	1024,0	6,0	1074,5	1047,0	1134,0	185,0	1082,6	1080,0	1231,0	406,0	1224,9	1167,0	1431,0	479,0	1270,3	1203,0	1531,0	487,0
			2%				13%				23%				43%				53%		
L_P																					
		20 moyenne	20 min	20 max	20 ecart	10 moyenne	10 min	10 max	10 ecart	8 moyenne	8 min	8 max	8 ecart	5 moyenne	5 min	5 max	5 ecart	4 moyenne	4 min	4 max	4 ecart
	moyenne	983,1	982,5	983,7	1,2	936,9	933,5	940,3	6,8	911,4	906,8	916,1	9,4	848,2	839,3	856,9	17,6	804,6	791,9	817,0	25,1
	min	914,0	910,0	918,0	0,0	714,3	703,0	728,0	0,0	654,4	651,0	657,0	0,0	544,4	510,0	579,0	3,0	495,9	469,0	517,0	4,0

	max	996,0	996,0	997,0	8,0	984,8	983,0	986,0	36,0	978,8	978,0	980,0	53,0	959,8	954,0	963,0	69,0	944,9	932,0	956,0	80,0
			9%				30%				35%				49%				53%		
L_G																					
		20 moyenne	20 min	20 max	20 ecart	10 moyenne	10 min	10 max	10 ecart	8 moyenne	8 min	8 max	8 ecart	5 moyenne	5 min	5 max	5 ecart	4 moyenne	4 min	4 max	4 ecart
	moyenne	999,7	999,5	999,9	0,4	999,4	998,6	1000,1	1,4	997,9	996,6	999,2	2,6	1001,3	997,5	1005,1	7,6	999,1	992,8	1005,4	12,7
	min	998,5	998,0	999,0	0,0	996,0	994,0	997,0	0,0	990,8	989,0	992,0	0,0	991,3	983,0	994,0	0,0	979,6	970,0	984,0	2,0
	max	1002,0	1002,0	1002,0	2,0	1011,3	1009,0	1014,0	7,0	1017,2	1013,0	1021,0	11,0	1054,0	1039,0	1077,0	71,0	1083,0	1066,0	1114,0	77,0
			0%				1%				2%				8%				11%		
L_V																					
		20 moyenne	20 min	20 max	20 ecart	10 moyenne	10 min	10 max	10 ecart	8 moyenne	8 min	8 max	8 ecart	5 moyenne	5 min	5 max	5 ecart	4 moyenne	4 min	4 max	4 ecart
	moyenne	998,7	998,4	998,9	0,5	994,1	992,4	995,8	3,3	989,0	985,8	992,2	6,4	975,3	967,0	983,3	16,4	956,0	942,4	969,2	26,8
	min	996,5	995,0	997,0	0,0	988,3	981,0	990,0	0,0	977,4	953,0	980,0	0,0	950,3	906,0	961,0	2,0	919,5	877,0	930,0	3,0
	max	1001,5	1001,0	1002,0	3,0	1006,0	996,0	1030,0	49,0	1005,0	992,0	1052,0	91,0	1013,4	982,0	1054,0	124,0	1001,5	967,0	1048,0	149,0
			1%				3%				5%				9%				12%		
L_C																					
		20 moyenne	20 min	20 max	20 ecart	10 moyenne	10 min	10 max	10 ecart	8 moyenne	8 min	8 max	8 ecart	5 moyenne	5 min	5 max	5 ecart	4 moyenne	4 min	4 max	4 ecart
	moyenne	972,7	971,9	973,5	1,7	896,9	892,1	901,6	9,5	855,3	848,4	862,3	13,9	746,3	734,1	758,0	23,8	673,6	658,0	688,7	30,8
	min	894,0	893,0	895,0	0,0	631,3	621,0	644,0	0,0	551,0	545,0	557,0	1,0	449,3	422,0	456,0	5,0	375,3	362,0	383,0	4,0
	max	990,0	990,0	990,0	9,0	958,8	958,0	962,0	47,0	941,0	937,0	955,0	138,0	889,3	886,0	893,0	172,0	850,0	841,0	856,0	179,0
			11%				38%				46%				58%				64%		

