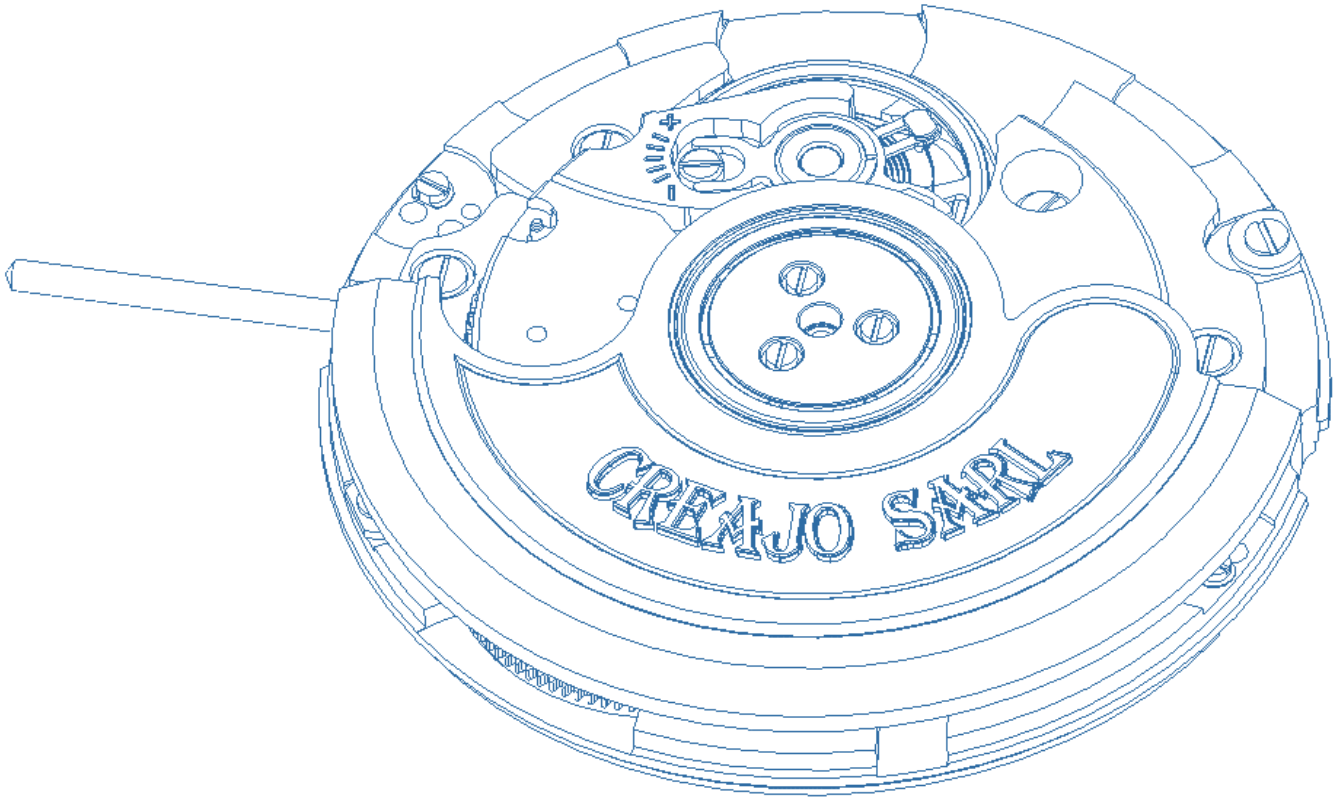


La simulation au cœur de l’amélioration de la qualité de chassage de la virole et de la réduction des coûts de fabrication.

Conséquences de l'évolution technologique

L'introduction du procédé de soudage laser du ressort spiral sur la virole a permis d'automatiser cette opération délicate et d'augmenter la précision de positionnement et la qualité de centrage du spiral.

Pour utiliser cette nouvelle technologie en production, il a été nécessaire de remplacer les viroles en laiton par des viroles en acier inoxydable.

Balancier spiral
Virole Greiner (laiton)

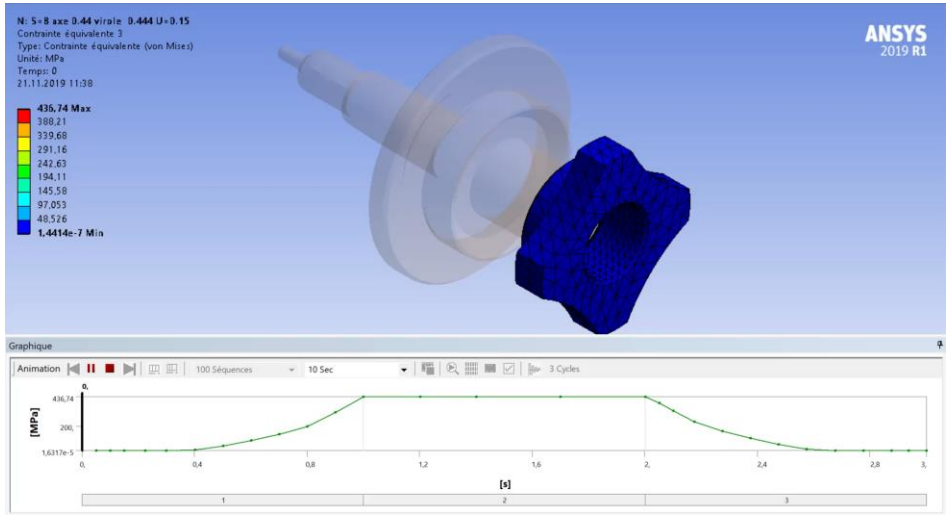
Balancier spiral
Virole soudage laser (acier inoxydable)

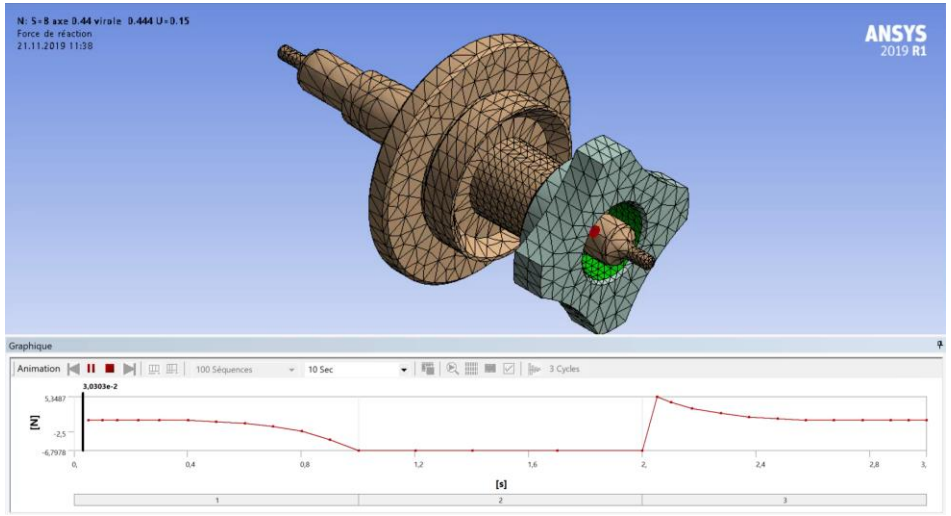
L'acier inoxydable étant moins ductile et malléable que le laiton, le chassage de la virole sur l'axe de balancier est plus délicat que par le passé.

Spiral serti mécaniquement sur une virole en laiton.

Spiral soudé au laser sur une virole en acier inoxydable.

Analyse de la situation de départ





OBJECTIF

Sur la base du modèle 3D conforme au plan de fabrication, définir la force de chassage et la force de tenue de la virole sur l'axe de balancier, sachant que la force de chassage indiquée sur le plan d'assemblage du balancier est ≥15 N.

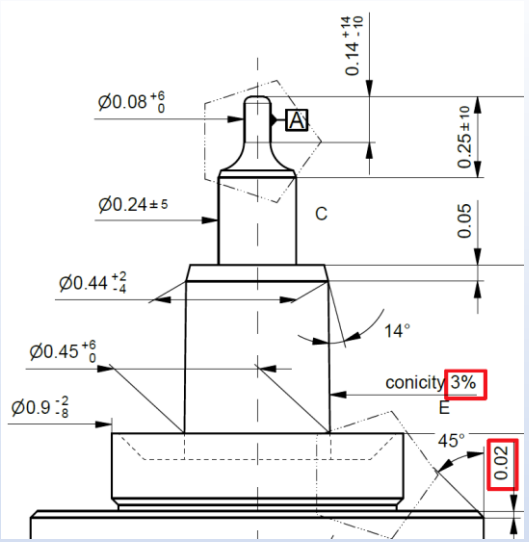
DEROULEMENT / BREVE DESCRIPTION

Pour des coefficients de frottement de 0.1, 0.15 et 0.2, et des tolérances de chassage de 0µm, 2µm, 4µm, 6µm, 8µm, 10µm, 12µm, 14µm, 16µm, 18µm, 20µm, 22µm, 24µm, 26µm, 28µm et 30µm définir la contrainte mesurée sur la virole. Déterminer également les forces de chassage et de tenue de la virole sur l'axe de balancier.

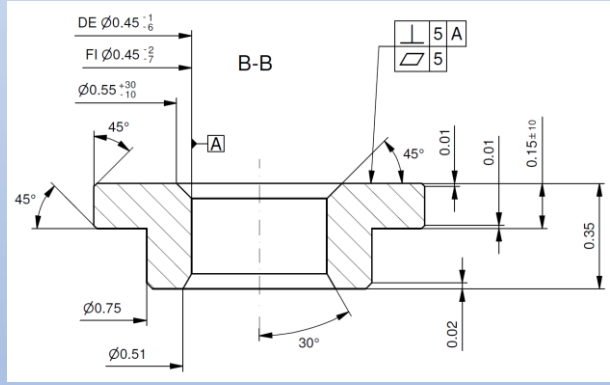
Il est utile de préciser que la contrainte maximale admissible de l'acier 20AP et de l'acier inox 1.4427 So, respectivement utilisés pour la fabrication de l'axe de balancier et la virole, est de (1000 MPa).

Résultats des simulations sous forme d'un tableau de mesures

Assemblage de la virole sur l'axe de balancier						
Tolérance de chassage [µm]	Diamètre axe [mm]	Diamètre virole [mm]	Coefficient de frottement	Force de chassage [N]	Force de tenue [N]	Contrainte continue virole [MPa]
0	0.436	0.448	0,1	6,557e-005	6,557e-005	1,178e-002
			0,15	6,557e-005	6,557e-005	1,178e-002
			0,2	6,557e-005	6,557e-005	1,178e-002
2	0.437	0.447	0,1	0,16611	6,772e-002	38,173
			0,15	0,24905	0,10162	37,628
			0,2	0,33199	0,13551	37,151
4	0.438	0.446	0,1	0,84263	0,58651	126,67
			0,15	1,2622	0,88074	125,67
			0,2	1,6819	1,175	124,85
6	0.439	0.445	0,1	1,9245	1,4122	227,44
			0,15	2,9091	2,1084	225,89
			0,2	3,8695	2,819	224,47
8	0.440	0.444	0,1	4,5353	3,5618	438,49
			0,15	6,7553	5,3487	436,69
			0,2	9,0015	7,1415	436,18
10	0.441	0.443	0,1	8,658	6,8337	699,72
			0,15	12,852	10,267	703,13
			0,2	17,058	13,676	706,81
12	0.442	0.442	0,1	15,033	11,294	1314,9
			0,15	22,007	17,424	1340,5
			0,2	28,826	23,486	1315,1
14	0.443	0.441	0,1	22,18	16,396	2239,4
			0,15	32,055	25,416	2213,4
			0,2	42,278	34,634	2231,4
16	0.444	0.440	0,1	30,63	22,758	3484,1
			0,15	43,893	36,011	3393,7
			0,2	57,668	48,002	3382,6
18	0.445	0.439	0,1	46,779	36,893	4638,1
			0,15	69,406	57,466	4956,4
			0,2	91,078	80,168	4646,2
20	0.446	0.438	0,1	64,998	51,568	5456
			0,15	95,37	80,512	5753,3
			0,2	123,6	107,1	5414,5
22	0.447	0.437	0,1	97,853	68,224	6522,6
			0,15	140,41	109,5	6667,3
			0,2	180,44	148,71	6854
24	0.448	0.436	0,1	125,64	84,829	7784,3
			0,15	178,58	136,32	7765,6
			0,2	232,93	187,05	7753,6
26	0.449	0.435	0,1	155,1	108,23	8545,4
			0,15	220,32	175,05	9252,6
			0,2	288,54	251,31	8665,9
28	0.450	0.434	0,1	175,78	138,31	10713
			0,15	263,74	211,35	10781
			0,2	368,2	286,94	10830
30	0.451	0.433	0,1	204,03	161,13	13073
			0,15	300,83	272,9	13236
			0,2	436,43	352,33	13358

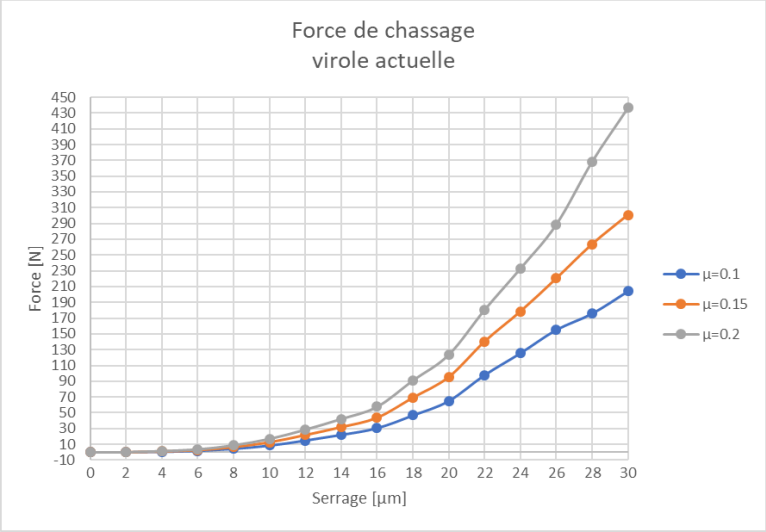


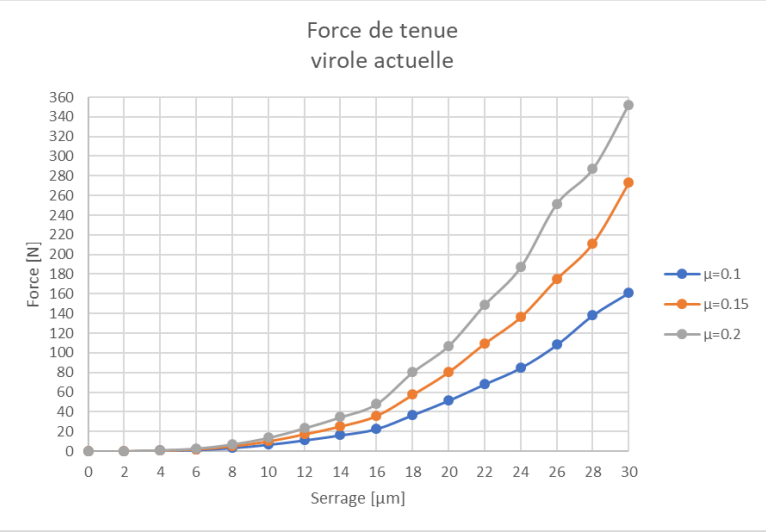
Plan de l'axe de balancier

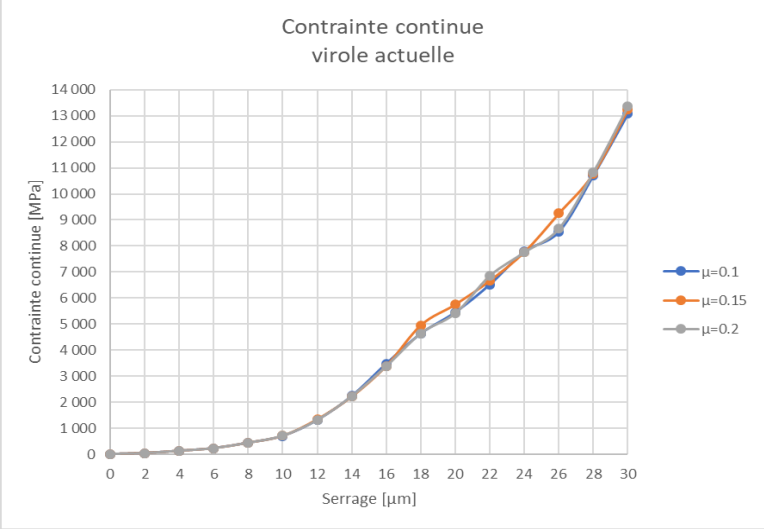


Plan de la virole

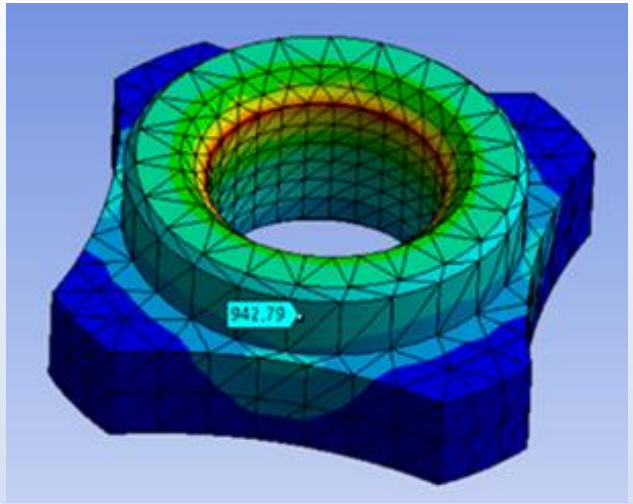
Résultats des simulations sous forme de graphiques







Les contraintes maximales admissibles par ces deux matériaux ainsi que la force maximale de chassage indiquée sur le plan d'assemblage définissent des tolérances de chassage min. et max. comprises entre 2µm et 10µm. A l'intérieur de cette plage la force de chassage varie de 0,16611 N à 17,058 N et la force de tenue de 6,772e-002 N à 13,676 N.



REMARQUE

il faut ajouter que la contrainte mesurée sur le diamètre extérieur, du tube de 0.75 mm de la virole, atteint une valeur de 942.79 MPa proche de la limite de 1000 MPa admissible pour de l'acier inox 1.4427 So pour une valeur de serrage de 16 µm.

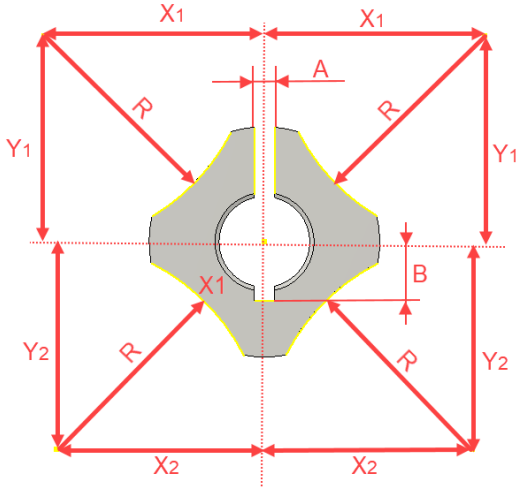
CONCLUSION

On peut donc constater qu'il est très difficile de maîtriser l'opération de chassage de la virole en adaptant uniquement les tolérances de fabrication.

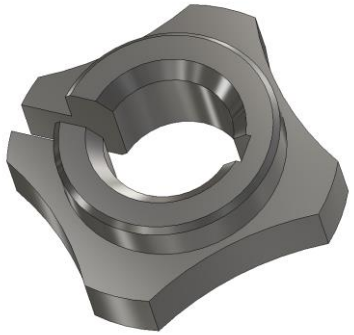
Conception et simulation du fonctionnement d'une virole fendue

Principe de construction de la virole fendue

Pour garantir l'absence de balourd de la virole il faut respecter les cotes et tolérances suivantes :



Cote	Valeur [mm]	Tolérance [µm]
R	1	±10
X1	1.05	±10
Y1	0.9825	±10
X2	0.9923	±10
Y2	0.9923	±10
A	0.1	±10
B	0.28	±10



OBJECTIF

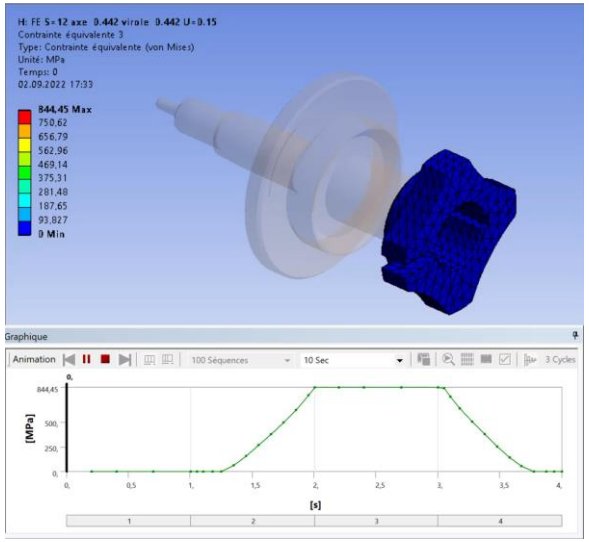
Sur la base du modèle 3D ''Virole fendue axe de balancier'', définir la force de chassage ainsi que le couple et la force de tenue de la virole fendue sur l'axe de balancier, sachant que la force de chassage indiquée sur le plan d'assemblage du balancier est ≥15 N.

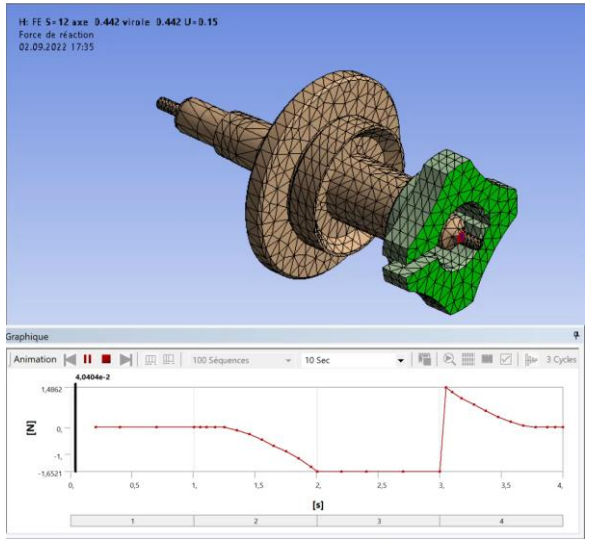
DEROULEMENT / BREVE DESCRIPTION

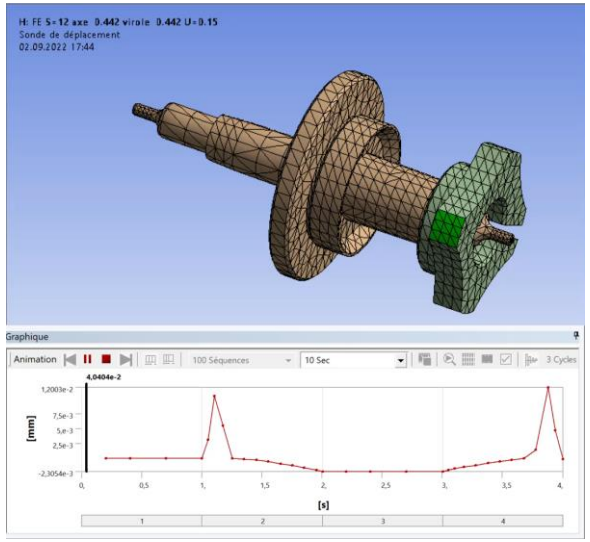
Pour des coefficients de frottement de 0.1, 0.15 et 0.2, et des tolérances de chassage de 10µm, 12µm, 14µm, 16µm, 18µm, 20µm, 22µm, 24µm, 26µm, 28µm et 30µm définir, lors de l'assemblage de la virole fendue sur l'axe de balancier, les paramètres suivants :

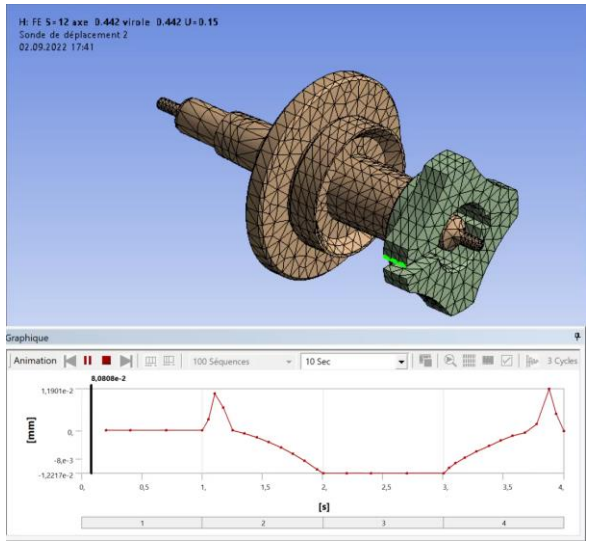
- Contrainte continue dans la virole
- Force de chassage de la virole
- Force de tenue de la virole
- Déplacement du centre de rotation du spiral
- Epaisseur de la fente de la virole
- Couple de tenue de la virole

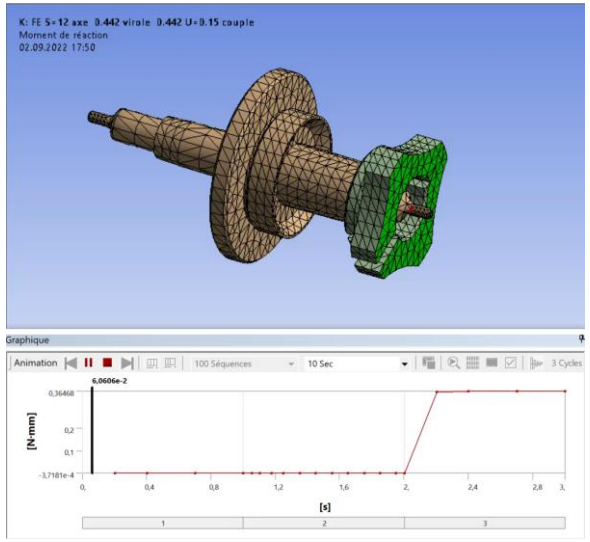
Exemples de simulation des divers paramètres







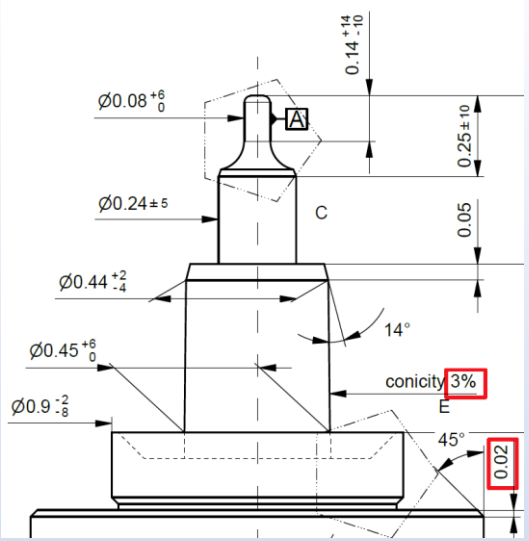




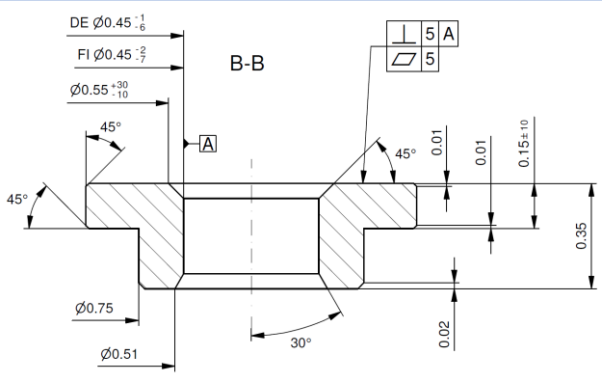
Résultats des simulations sous forme de tableaux de mesures

Serrage [µm]	Force de chassage [N]			Force de tenue [N]			Contrainte continue [MPa]		
	Coefficient de frottement								
	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
10	0,80467	1,2085	1,6078	0,69024	1,0395	1,3889	666,67	670,81	674,91
12	1,1001	1,6511	2,2062	0,97974	1,4862	1,9508	856,55	844,45	832,33
14	1,4375	2,1461	2,8717	1,3057	1,9706	2,6052	1112,2	1108,1	1103,9
16	1,7661	2,6474	3,5312	1,6368	2,4266	3,2756	1423,5	1432,8	1442,1
18	2,1192	3,1773	4,0884	1,9987	2,964	3,9659	1629,2	1632,2	1646,2
20	2,4594	3,7466	4,9864	2,3293	3,5777	4,7526	1812,4	1825,8	1835,9
22	2,8211	4,3573	5,7839	2,8024	4,1731	5,5291	2218,9	2225,7	2228,8
24	3,1831	4,8814	6,565	3,0864	4,8095	6,3665	2271,6	2275,7	2287,8
26	3,6667	5,5889	7,4757	3,5188	5,4518	7,3472	2619,1	2619,9	2665,8
28	4,1265	6,1686	8,3162	4,0182	5,9264	8,1189	2840,9	2937,9	2960,2
30	4,5901	6,8919	9,3783	4,4186	6,7159	9,0934	3241,4	3268,7	3300

Serrage [µm]	Déplacement du centre de rotation du spiral [mm]			Epaisseur de la fente de la virole [mm]			Couple de tenue de la virole [Nmm]		
	Coefficient de frottement								
	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
10	1,69E-03	1,70E-03	1,70E-03	0,1178638	0,1179874	0,1181092	0,17682	0,265	0,35366
12	2,30E-03	2,31E-03	2,31E-03	0,124266	0,124434	0,124602	0,24304	0,36459	0,48653
14	2,97E-03	2,98E-03	2,98E-03	0,131204	0,131428	0,13165	0,31716	0,47642	0,63584
16	3,65E-03	3,65E-03	3,66E-03	0,138118	0,13838	0,138642	0,39103	0,58714	0,7835
18	4,41E-03	4,42E-03	4,36E-03	0,14548	0,14568	0,145834	0,46764	0,70271	0,92787
20	5,16E-03	5,12E-03	5,08E-03	0,152568	0,153236	0,153428	0,54997	0,82676	1,0973
22	6,05E-03	5,91E-03	5,82E-03	0,160872	0,161584	0,161596	0,63234	0,95024	1,2892
24	6,51E-03	6,23E-03	6,28E-03	0,168194	0,169042	0,169624	0,7311	1,1035	1,5112
26	7,24E-03	7,18E-03	7,21E-03	0,175372	0,176742	0,177612	0,82284	1,2658	1,7008
28	7,99E-03	8,03E-03	7,94E-03	0,183788	0,185504	0,18593	0,93012	1,4008	1,8835
30	8,88E-03	8,82E-03	8,79E-03	0,192858	0,19417	0,19556	1,0208	1,5847	2,1151

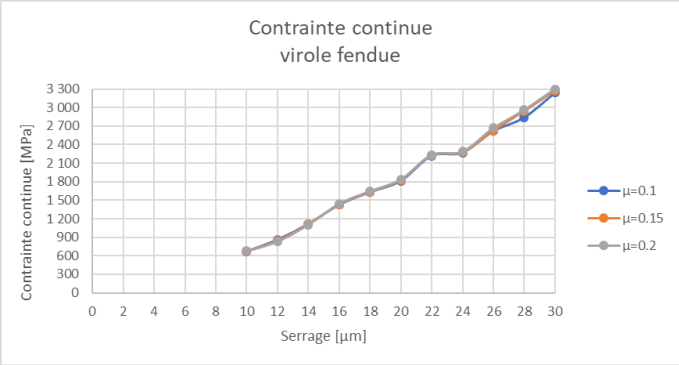


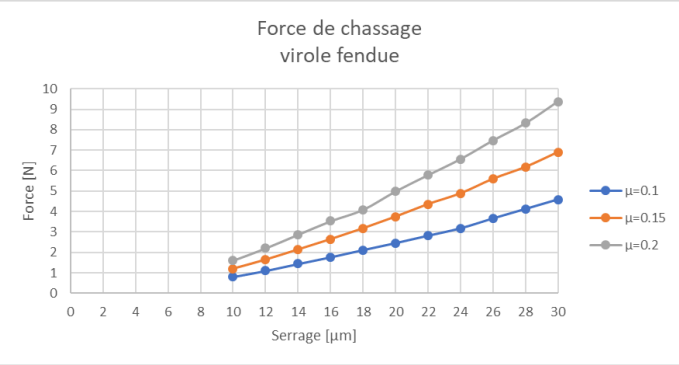
Plan de l'axe de balancier

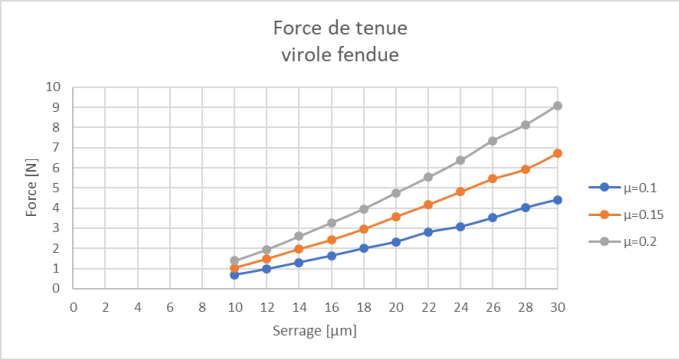


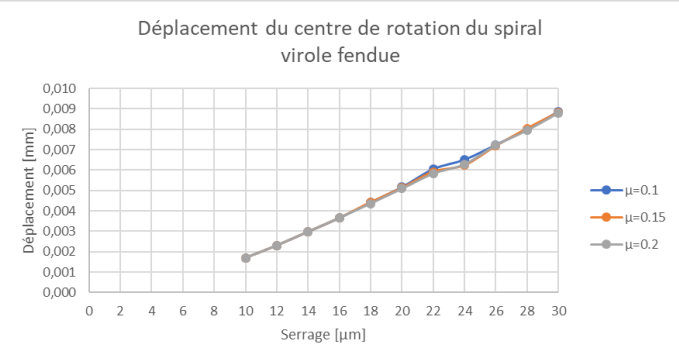
Plan de la virole

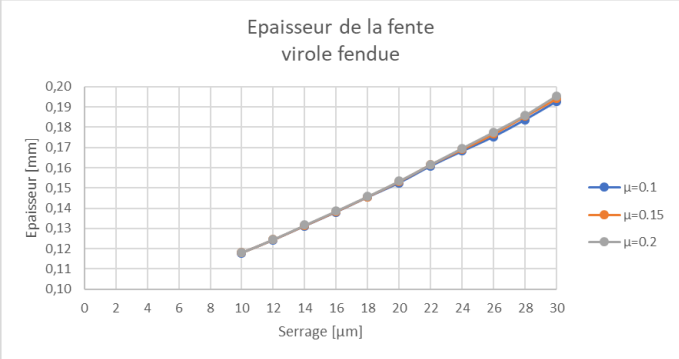
Résultats des simulations sous forme de graphiques



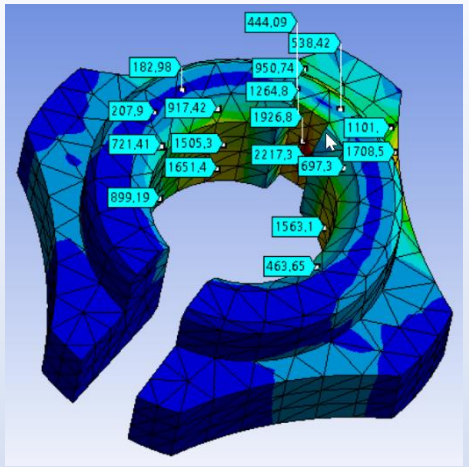








La prolongation de la fente, d'une profondeur de 0.28 mm (cote B) par rapport au centre de rotation de la virole, permet de limiter le son déplacement à 1.7µm pour une tolérance de chassage de 10µm et à 6.05µm pour une tolérance de chassage de 22µm.



REMARQUE

Une analyse détaillée de la répartition de la contrainte mesurée à l'aide de la sonde, pour un chassage de 22µm, permet de constater que les valeurs élevées sont très ponctuelles et qu'elles ne se diffusent pas complètement au travers de l'épaisseur du tube, même au niveau de la base de la fente.

Calcul du couple minimum de maintien de la virole sur l'axe de balancier

Calcul énergétique

Cellule	blanche	à définir par l'ascenseur (ou le bouton)	
Cellule	verte	à définir au clavier (ou par l'ascenseur)	

Données de l'onglet "Rouage"				Résultats			
Vitesse du barillet	n_b	4,00	tr/j	Rapport baril.-échap.	i_{tot}	4320	
Fréqu. balancier	f	4	Hz				
Z roue échapp.	Z_e	20	dents				

Ressort de barillet (avec correctifs x et ΔL)							
Données à optimaliser				Résultats			
Rayon int. barillet	R	5,30	mm	Bonde : r_b		1,30	mm
Epaisseur ressort	e	0,120	mm	$K_{réel}$		10,8	
Rapport r/e désiré	K	11,0		Pas réel	e+R*x	0,131	mm
Facteur correctif	x	0,002			L_{Nmax}	317,5	mm
Augm. longueur	ΔL	22	%		L_r	387,4	mm
					N_r	8,3	tours
Calcul selon Defossez : choisir x=0 et ΔL=0%					D_r	49,6	heures
Données supplémentaires				Résultats			
Limite élast. virtuelle	σ	3 150	N/mm²	Armage max.	α_{max}	101,7	rad
Module élast.	E	200 000	N/mm²	Armage à 24h	α_{24}	76,6	rad
Hauteur ressort	h	1,20	mm	Moment max.	M_{max}	9,07	mNm
				Moment à 24 h	M_{24}	6,83	mNm
					M_{24}/M_{max}	75	%
				Energie utilisable	E_u	351,0	mJ
η rouage	η	74	%	Puiss. échapp. 24h	P_r	1,47	µ W
η échappement	η_e	38	%	Inertie balancier	I_c	11,22	mg·cm²
Ampl. balancier	ϕ_{24}	220	degré	Inertie la plus proche	I_p	11,2	mg·cm²
Facteur qualité	Q	235					

Balancier NIHS							
Choix inertie	I	11,2	mg·cm²	Diamètre balancier	d_b	9,5	mm
Choix dimensions	ϕ x h	9,25x0,54		Hauteur serge	h_b	0,5	mm
		9,50x0,50		Epaisseur bras	e_b	0,20	mm
		9,75x0,44		Diamètre axe	t_b	0,80	mm
Type de balancier		Nickel		Largeur serge	s_b	0,43	mm

Spiral							
Cte élast. du spiral	k_s	0,707	µNm/rad	N° CGS calculé	CGS_c	1,81	
Rayon virole désiré	R_{sd}	0,65	mm	N° CGS NIHS	CGS_n	1,80	
Dspiral / Dbalancier	F_s	0,55		Hauteur de lame	h_s	0,17	mm
				Rayon de virole	R_s	0,65	mm
				Pas du spiral	P_s	0,16 à 0,185	mm

Le calcul énergétique du calibre défini un balancier d'une inertie de 11.2 mg·cm² qui oscille à une fréquence de 4 Hz. La constante élastique du spiral est de 0.707 µNm/rad.

Si l'on considère que l'amplitude maximum du balancier est d'environ 330° le couple max. du spiral est donc de 0.707 / (360/2π) · 330 = 4.072 µNm.

On constate que la valeur minimum du couple de tenue de la virole qui est de 176.82 µNm, ce qui correspond à une tolérance de chassage de 10 µm et un coefficient de frottement de 0.1, est largement supérieure à la valeur du couple max. du spiral (4.072 µNm).

On peut donc en conclure que le couple de tenue de la virole fendue sur l'axe de balancier est suffisant pour tous les cas simulés représentés dans les tableaux ci-dessus.

CONCLUSION

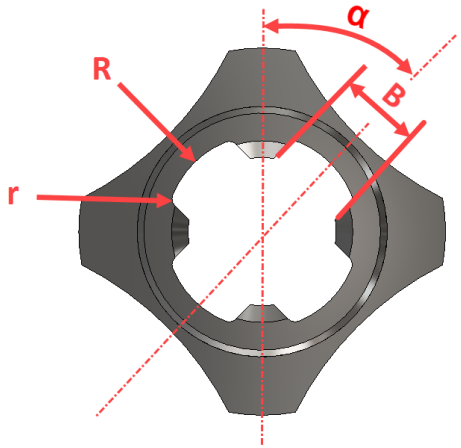
Grâce à sa fente de 0.1 mm et à une disposition judicieuse des 4 encoches périphériques de rayon R=1mm, la géométrie de la virole fendue, fabriquée en acier inox 1.4427 So, combinée avec une adaptation des tolérances (min. 10 µm max. 22 µm), permet de diminuer les contraintes et de mieux maîtriser la force de chassage et de tenue sur l'axe de balancier tout en garantissant un couple de tenue suffisant et en limitant le déplacement du centre de rotation du spiral à une valeur max. de 6,05 µm.

Néanmoins la virole fendue risque de poser des problèmes de fabrication qui ne doivent pas être sous-estimés. Il semble en effet difficile de maîtriser la variation de l'épaisseur de la fente qui va se produire au moment du tronçonnage final de la virole.

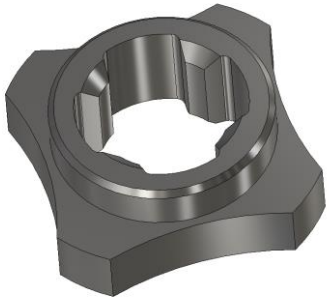
Conception et simulation du fonctionnement d'une virole élastique

Principe de construction de la virole élastique

Pour optimiser l'élasticité de la virole la virole il faut respecter les cotes et tolérances suivantes :



Cote	Valeur [mm]	Tolérance [µm]
R	0,29	±20
r	0,03	±10
α	45°	±0,1°
B	0,26	±20



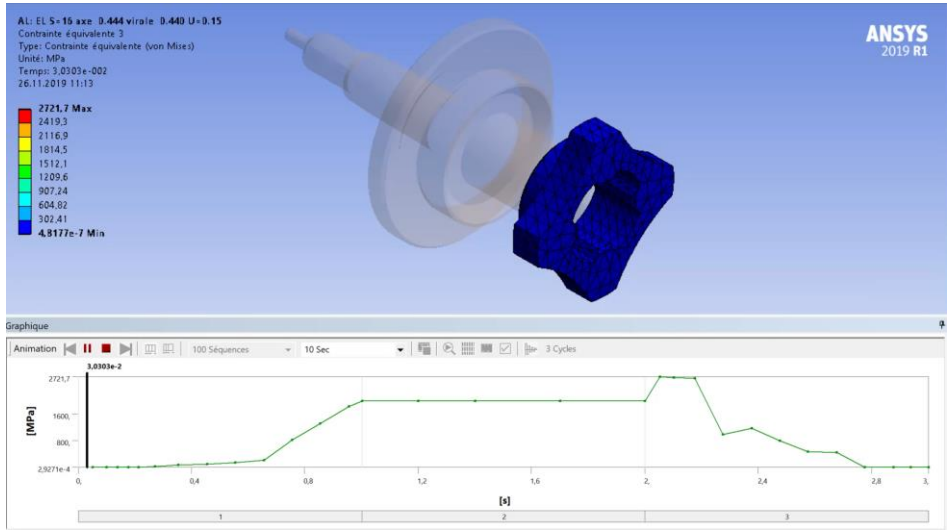
OBJECTIF

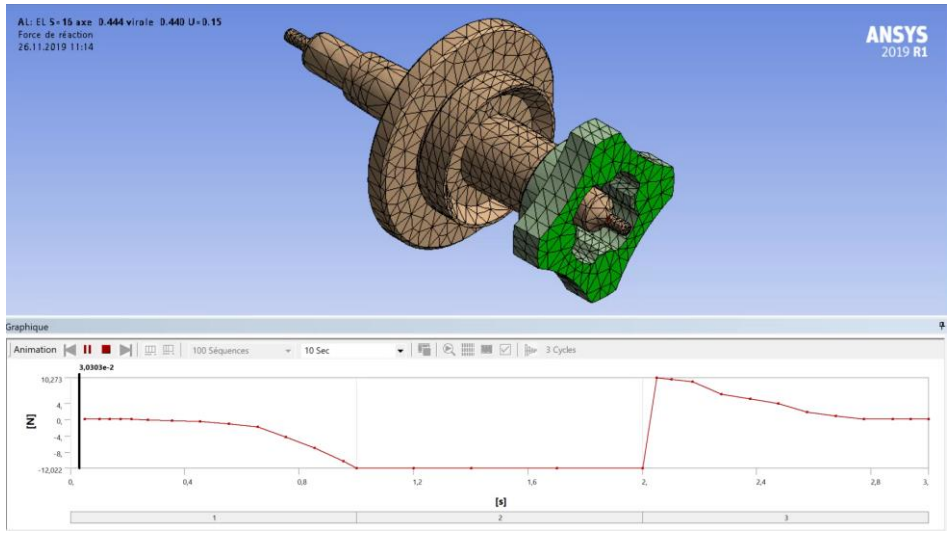
Sur la base du modèle 3D ''Virole axe de balancier'', définir la force de chassage et la force de tenue de la virole élastique sur l'axe de balancier, sachant que la force de chassage indiquée sur le plan d'assemblage du balancier est ≥15 N.

DEROULEMENT / BREVE DESCRIPTION

Pour des coefficients de frottement de 0.1, 0.15 et 0.2, et des tolérances de chassage de 6µm, 8µm, 10µm, 12µm, 14µm, 16µm, 18µm, 20µm, 22µm, 24µm, 26µm, 28µm et 30µm définir la contrainte mesurée sur la virole élastique. Déterminer également les forces de chassage et de tenue de la virole élastique sur l'axe de balancier.

Exemples de simulation des divers paramètres

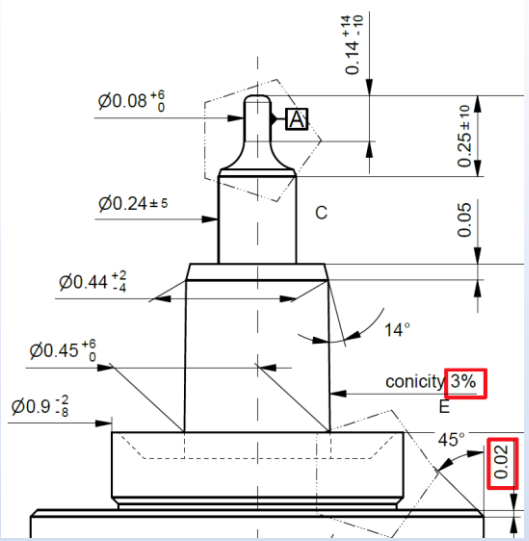




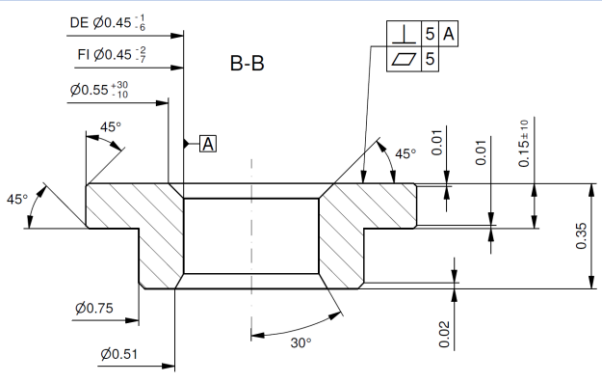
Divers types de viroles élastiques

Résultats des simulations sous forme d'un tableau de mesures

Assemblage de la virole élastique sur l'axe de balancier						
Tolérance de chassage [µm]	Diamètre axe [mm]	Diamètre virole [mm]	Coefficient de frottement	Force de chassage [N]	Force de tenue [N]	Contrainte continue virole [MPa]
6	0.439	0.445	0.1	0,20679	0,1359	42,285
			0.15	0,31038	0,20326	43,591
			0.2	0,41427	0,27015	45,3
8	0.440	0.444	0.1	0,52138	0,38022	83,757
			0.15	0,78089	0,57026	86,996
			0.2	1,0448	0,75897	91,072
10	0.441	0.443	0.1	1,039	0,85279	147,79
			0.15	1,5571	1,2436	152,24
			0.2	2,0783	1,6586	158,39
12	0.442	0.442	0.1	2,9318	2,4771	909,29
			0.15	4,4464	3,8444	901,41
			0.2	6,0541	5,2812	898,63
14	0.443	0.441	0.1	4,8681	3,9973	1397,6
			0.15	7,48	6,3599	1379,9
			0.2	10,231	8,862	1380,2
16	0.444	0.440	0.1	7,8642	6,3935	2026,1
			0.15	12,022	10,273	1995,5
			0.2	16,394	14,545	2019,5
18	0.445	0.439	0.1	13,299	11,327	2686,6
			0.15	19,859	17,623	2659,4
			0.2	26,378	25,159	2796,9
20	0.446	0.438	0.1	18,721	16,202	3058,5
			0.15	27,517	24,68	3249,2
			0.2	37,055	35,371	3572,7
22	0.447	0.437	0.1	25,766	21,723	3841,7
			0.15	37,055	32,888	4054,2
			0.2	52,623	45,991	5069,3
24	0.448	0.436	0.1	34,72	27,995	5373,4
			0.15	51,438	41,102	6180,1
			0.2	69,668	59,297	6629
26	0.449	0.435	0.1	43,365	34,031	7097,7
			0.15	66,404	55,496	8231,7
			0.2	91,089	78,068	8901,7
28	0.450	0.434	0.1	53,259	40,924	8625,8
			0.15	86,111	68,983	10473
			0.2	110,95	94,584	10994
30	0.451	0.433	0.1	62,511	47,748	9796,8
			0.15	100,98	82,852	11997
			0.2	131,14	112,02	12855

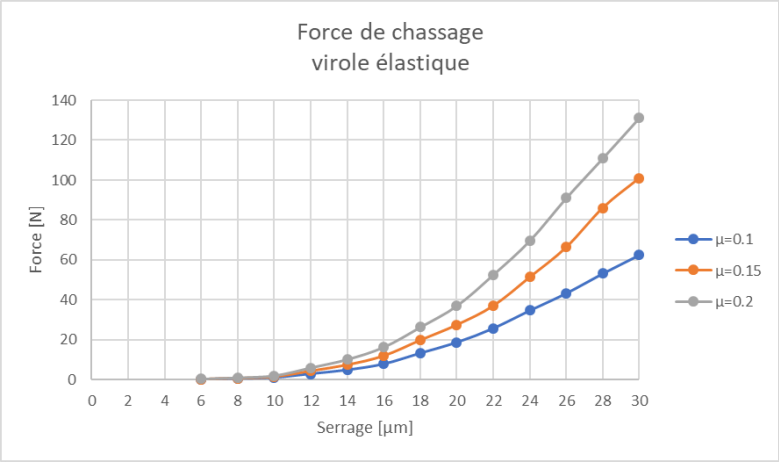


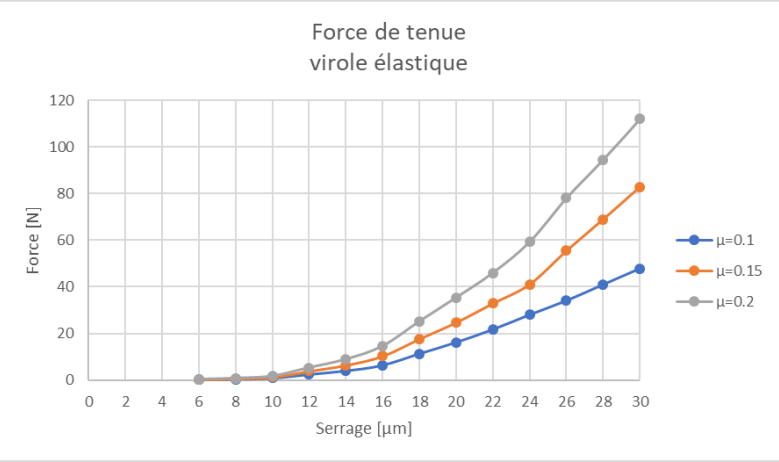
Plan de l'axe de balancier

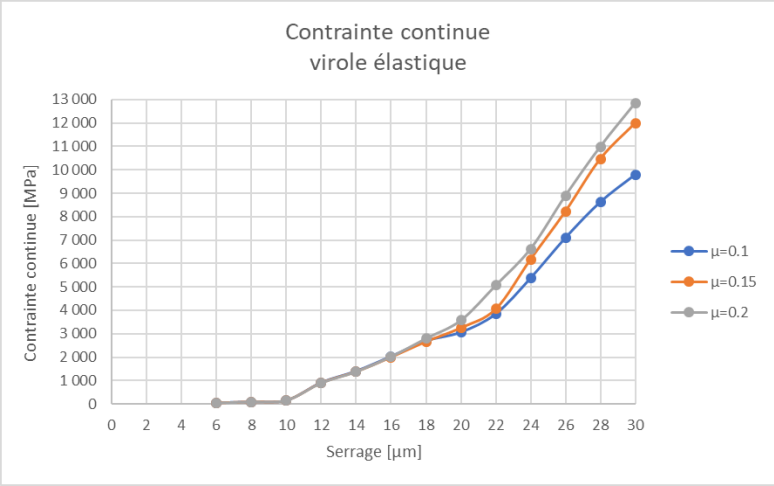


Plan de la virole

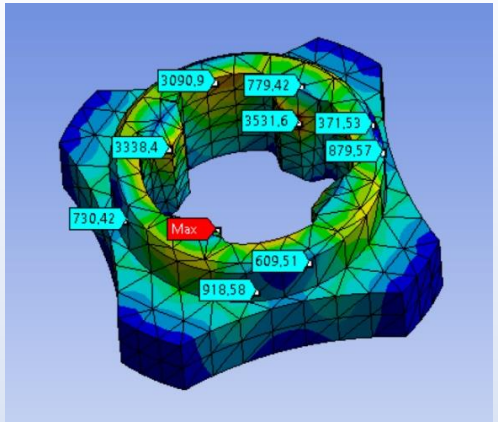
Résultats des simulations sous forme de graphiques







Les contraintes maximales admissibles de ces deux matériaux définissent une tolérance de chassage max. de 12µm pour laquelle la force de chassage varie de 2,9318 N à 6,0541 N et la force de tenue de 2,4771 N à 5,2812 N. L'analyse détaillée de la contrainte dans la virole permet d'augmenter la tolérance de chassage jusqu'à 22µm la force de chassage varie alors de 25,766 N à 52,623 N et la force de tenue de 21,723 N à 45,991 N.



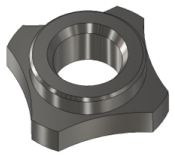
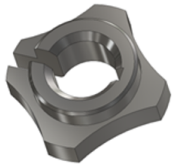
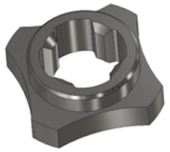
REMARQUE

Une analyse détaillée de la répartition de la contrainte mesurée à l'aide de la sonde, pour un chassage de 22µm, permet de constater que les valeurs élevées sont très ponctuelles et qu'elles ne se diffusent pas complètement au travers de l'épaisseur du tube au niveau des 4 encoches.

CONCLUSION

Grâce à ces 4 encoches, la géométrie de la virole élastique, fabriquée en acier inox 1.4427 So, combinée avec une adaptation des tolérances (min. 10 µm max. 22 µm), permet de diminuer les contraintes et de mieux maîtriser la force de chassage et de tenue sur l'axe de balancier.

Synthèse

Viroles en acier inoxydable compatibles avec un procédé de soudage laser défini					
Virole standard		**Virole fendue**		**Virole élastique**	
					
Avantages	**Inconvénients**	**Avantages**	**Inconvénients**	**Avantages**	**Inconvénients**
- Existante	- Difficile de maîtriser la force de chassage et de tenue	- Bonne maîtrise de la force de chassage et de tenue - Faible variation du couple de maintien	- Légère variation du centre de rotation du spiral - Difficulté de maîtriser l'ouverture ou la fermeture de la fente en fabrication	- Facilité de mise en œuvre	- Bien que la force de chassage et de tenue soient mieux maîtrisées elles dépassent toujours les 15N usuellement indiqués sur le plan d'assemblage

AMELIORATIONS

L'utilisation de viroles fendues ou élastiques permet de faire passer le pourcentage de rebut de 30% à 10% ce qui a pour effet une diminution significative du coût de fabrication.

PROCHAINS DEFIS

Toujours en quête de perfection, Créajo Sàrl a continué ces recherches dans ce domaine.
Des solutions simples et innovantes, faisant l'objet de demandes de dépôt de brevets, sont dorénavant disponibles pour tous ceux qui souhaitent utiliser des viroles standards tout en maîtrisant parfaitement la force de chassage de la virole sur l'axe de balancier.

Merci
de
votre
attention

Copyright by Créajo Sàrl 15.09.2022