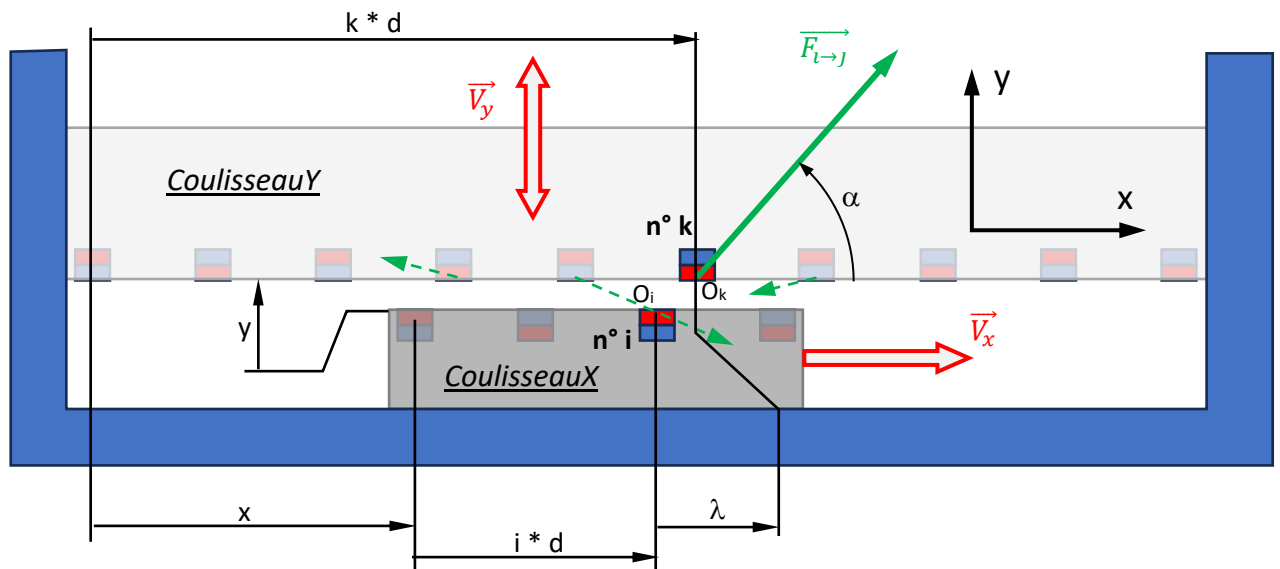


Simulation d'attraction/répulsion d'aimants



Loi de comportement des paires d'aimants



Chaque aimant est suffisamment petit pour être considéré comme ponctuel. Le vecteur joignant les centres des faces a pour composantes :

$$\overrightarrow{O_i O_k} = \lambda \vec{x} + (y + J) \vec{y}$$

- λ est la distance horizontale entre les centres : $\lambda = (k - i)d - x$
- x est le déplacement horizontal du *CoulisseauX*
- y est le déplacement vertical du *CoulisseauY*
- J est le jeu entre les faces des aimants quand les deux *CoulisseauX* et *CoulisseauY* sont en contact ($y = 0$)
- L'effort est incliné d'un angle α tel que $\tan \alpha = \frac{y}{\lambda}$
- La distance des centres a pour expression : $\Delta = \sqrt{\lambda^2 + (y + J)^2}$

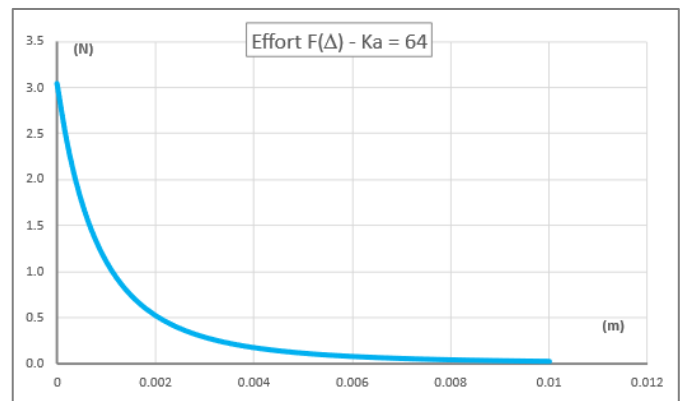
Hypothèse : l'effort de l'aimant n°i du *CoulisseauX* sur l'aimant n°k du *CoulisseauY* varie en fonction inverse de la puissance n de Δ : $\frac{1}{\Delta^n}$.

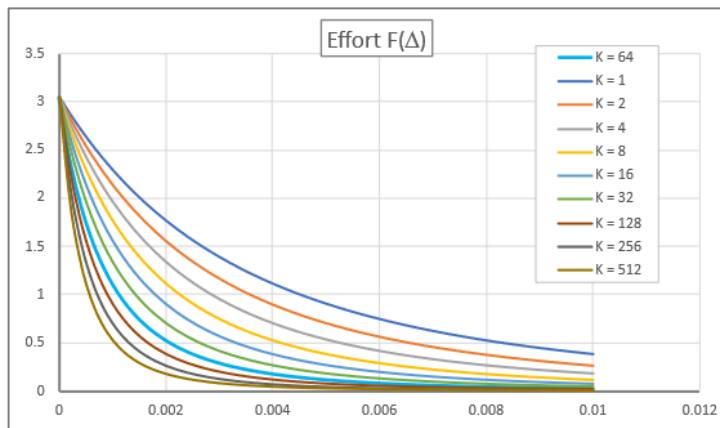
Modèle de l'effort :

$$F = \frac{F_{max}}{K_a(\Delta + f_a)^n}$$

Les coefficients f_a et K_a sont déterminés sur deux critères

- K_a est choisi pour fixer la décroissance de F en fonction de la distance Δ .
- l'effort F est égal à F_{max} (valeur fournie par le fabricant) quand $\Delta = 0$. Soit une relation à appliquer : $K_a f_a^n = 1$.
L'exposant n est entier et vaut 2 ou 3 selon les modèles.





La courbe ci-dessus montre l'évolution de l'effort en fonction de la distance Δ , pour $F_{\max} = 3.05$ N et $K_a = 64$.

Le second graphique ci-contre montre le réseau de courbes pour des valeurs croissantes du paramètre K_a .

Validation du modèle

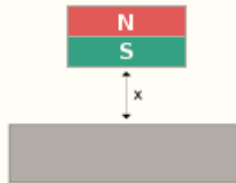
La documentation ci-dessous est issue du catalogue du distributeur <https://www.supermagnete.fr>, pour un aimant de section circulaire de diamètre 3 mm et hauteur 3 mm.

Le fabricant fournit une courbe de l'effort d'attraction en fonction de la distance séparant les faces N/S de deux aimants.

Calcul de la force d'adhérence

Sur cette page, vous pouvez calculer la force d'adhérence pour les articles de notre magasin

Type de calcul de la force d'adhérence:



☐ Aimant sur plaque de fer



☒ Aimant sur aimant

Aimant

Article

S-03-03-N: Disque magnétique Ø 3 mm, hauteur 3 mm, tient env. 330 g, ...

Forme de l'aimant *

Disque / cylindre

Ce calcul est uniquement disponible pour des formes symétriques à la rotation, donc pas pour des cubes ou des parallélépipèdes.

Magnétisation *

N45

Détermine la puissance de magnétisation.

La force d'adhérence ne peut être calculée que pour des objets magnétisés de manière axiale.

Veuillez également consulter nos Q&R sous [Questions et réponses sur la qualité des aimants](#) ainsi que notre [Tableau des données physiques](#).

Diamètre Ø (mm) *

3

Hauteur (mm) *

3

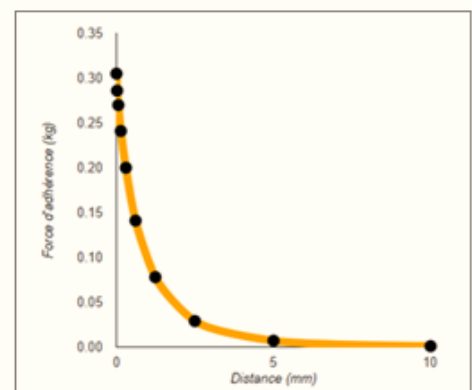
Distance *

☐ fixe * ☒ variable *

"fixe": Le calcul est effectué pour une distance fixe;

"variable": Le calcul est effectué pour 10 distances différentes.

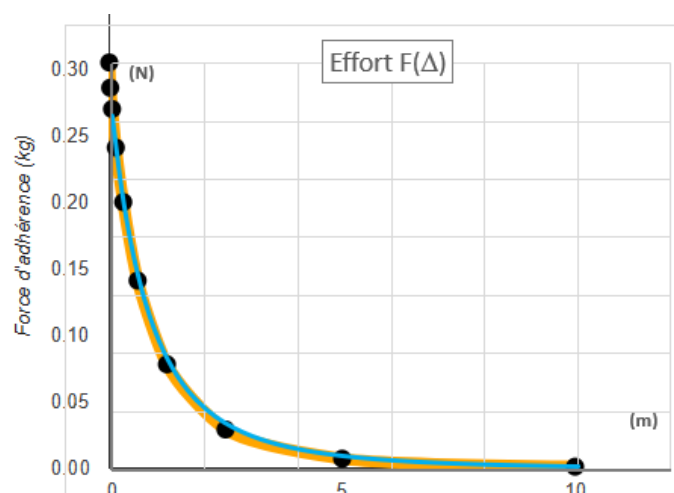
En cas de contact direct, sélectionnez la distance fixe 0.



Un fichier Excel (*ModeleF(delta).xlsx*) permet de calculer les valeurs d'effort du modèle défini au paragraphe précédent.

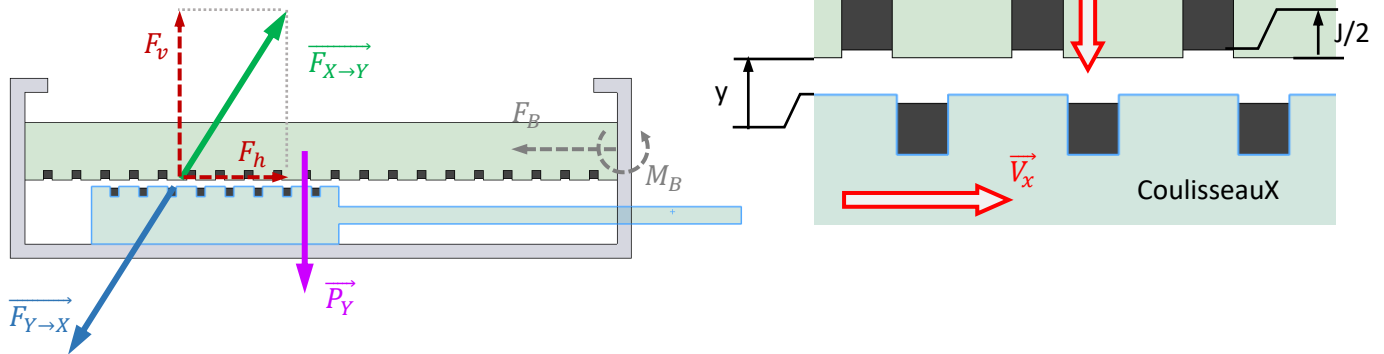
L'objectif est de rechercher le coefficient K_0 permettant de suivre "au mieux" la courbe issue du catalogue.

Résultat illustré ci-contre par superposition des courbes. Pour ce modèle d'aimant dont l'effort d'arrachement est de 3.1 N : $K_0 = 64$.



Etude dynamique

Le modèle mécanique "statique"



Chaque aimant du *CoulisseauY* subit l'action de chaque aimant du *CoulisseauX*. Ses deux voisins les plus proches ont une forte influence, les deux suivants de part et d'autre moins importante, et sans doute faible au-delà.

L'ensemble des actions donne une résultante $\vec{F}_{X \rightarrow Y}$, de composante verticale F_v et horizontale F_h .

Ces deux composantes ont des ordres de grandeur comparables...

Pour qu'il y ait décolllement et déplacement vers le haut du *CoulisseauY* il faut que la valeur de la composante F_v soit supérieure au poids du *CoulisseauY*.

La composante F_h est l'action que devra exercer l'opérateur pour déplacer le *CoulisseauX*, mais également l'action opposée F_B dans la liaison du bâti avec le *CoulisseauY*. A noter qu'un moment M_B apparaît également dans cette liaison.

Aspect dynamique oscillant si $V_x \approx 0$

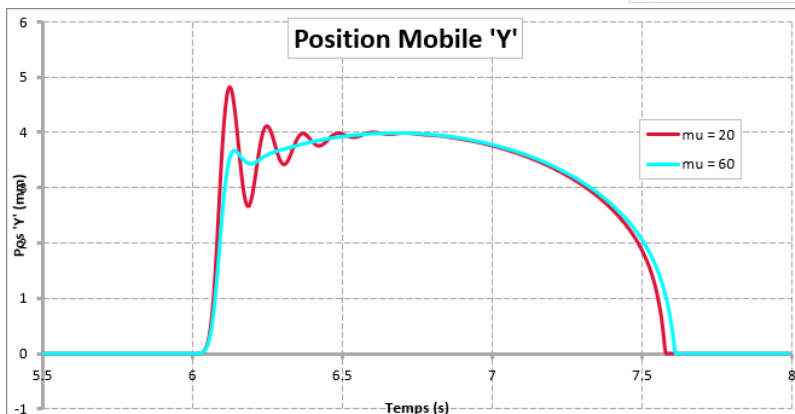
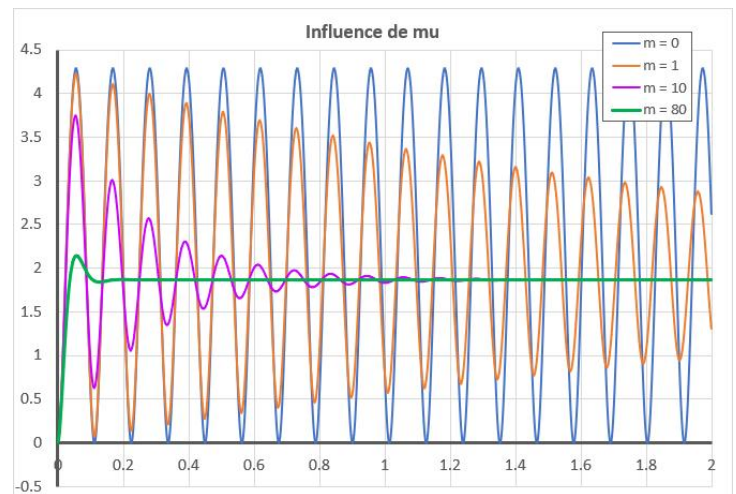
On considère un déplacement très lent du *CoulisseauX*, et l'action est supposée suffisante pour provoquer le décolllement. Le *CoulisseauY* se déplace verticalement, et en l'absence de frottement, oscille autour d'une position moyenne.

Avec frottement visqueux de coefficient μ , l'oscillation se réduit progressivement et le *CoulisseauY* finit par stopper son mouvement.

Figure ci-contre pour :

- $\mu = 0$ (en bleu),
- $\mu = 1$ (en orange),
- $\mu = 10$ (en rose)
- $\mu = 80$ (en vert).

Hormis pour $\mu = 0$, la valeur finale est identique dans tous les cas.



Sur le système réel, l'amortissement sera dû pour l'essentiel au guidage du *CoulisseauY*, combinaison de frottement sec et visqueux (de coefficient μ).

Il paraît indispensable de dissiper un peu d'énergie pour limiter les oscillations...

La figure ci-contre compare deux situations pour une même masse de 1220 g, avec $\mu = 20$ en rouge, fortement oscillante, et $\mu = 60$ en turquoise, beaucoup plus amortie.

Pour une masse du *CoulisseauY* d'environ 1.2 kg, cette valeur $\mu = 60$ semble un compromis convenable entre oscillations réduites et ralentissement limité. Mais très insuffisant si la masse n'est plus que de 0.2 kg.

A noter qu'amortir avec du frottement sec introduit de l'incertitude sur la position finale du *CoulisseauY*...

Et si Vx est variable

Dans les conditions de cette simulation "test statique", il faut environ 0.2 à 0.5 s pour que le *CoulisseauY* réalise son déplacement. Pour que le couple d'aimants ait le temps de jouer pleinement son rôle, il est souhaitable que le *CoulisseauX* se déplace de moins de $\text{dist}/2 = 5 \text{ mm}$ dans cet intervalle de temps, soit 50 mm/s au plus.

(dist est l'intervalle séparant deux aimants consécutifs.)

Si la vitesse est Vx est supérieure, on observe une réduction de la hauteur d'ondulation du *CoulisseauY*.

Mode d'emploi

Structure de la macro

5 modules :

- **Simulation1** : module principal qui décode les paramètres numériques et effectue la simulation dynamique. La fonction à exécuter se nomme "*Sub RampesAimants()*" ;
- **Excel1** : fonctions relatives à Excel, connexion, sauvegarde des données et tracé de graphes ;
- **AnimationSW1** : fonctions relatives à l'animation dans Solidworks.
- **Userform1** : la fenêtre principale (cf. illustration ci-dessous) avec deux fiches à onglets, la première pour la définition des paramètres du modèle et la simulation, la seconde pour l'affichage des graphes de résultats et l'animation SW ;
- **MessageDlg** : une fenêtre de dialogue pour gérer les messages.

Fichier Excel de sauvegarde

Les résultats de la simulation sont enregistrés dans un fichier Excel, de façon à leur appliquer un traitement ultérieur (courbes en particulier).

Au lancement de la macro, un nom de fichier Excel et son chemin d'accès sont demandés, ce qui permet de reprendre un fichier de résultats existant.

Nota : en cas d'annulation dans la boîte de dialogue, c'est un nouveau document Excel qui sera ouvert.

Pour l'enregistrement, les valeurs numériques des variables sont placées en colonnes :

- Colonne A : le temps, en s ;
- Colonne B : la composante suivant x de l'effort, en N ;
- Colonne C : la composante suivant y de l'effort, en N ;
- Colonne D : déplacement du *CoulisseauX*, en mm ;
- Colonne E : vitesse du *CoulisseauX*, en m/s ;
- Colonne F : déplacement du *CoulisseauY*, en mm ;
- Colonne G : vitesse du *CoulisseauY*, en m/s ;
- Colonne H : accélération du *CoulisseauY*, en m/s^2 .

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Temps (s)	Effort / x (N)	Effort / y (N)	Pos 'X' (mm)	Vit 'X' (m/s)	Pos 'Y' (mm)	Vit 'Y' (m/s)	Accel 'Y' (m/s ²)
2	0	-0.766254618	28.25129035	0	0.06	0.008539266	0.010674082	13.34260291
3	0.0008	-2.276679331	28.16880707	0.048	0.06	0.025518369	0.02122388	13.18724651
4	0.0016	-3.72413501	27.97337558	0.096	0.06	0.050779187	0.031576022	12.94017799
5	0.0024	-5.067816538	27.6796416	0.144	0.06	0.08411298	0.041667241	12.61402412
6	0.0032	-6.279114902	27.30667422	0.192	0.06	0.125270748	0.05144721	12.22496043
7	0.004	-7.342495534	26.87442216	0.24	0.06	0.173973973	0.060879032	11.78977838
8	0.0048	-8.254012056	26.4009483	0.288	0.06	0.22992431	0.069937921	11.32361082
9	0.0056	-9.018531684	25.90088273	0.336	0.06	0.292811398	0.078608859	10.83867284

Les colonnes L et M contiennent les paramètres du modèle et de la simulation.

Paramètres du modèle et simulation

Les paramètres du modèle sont définis en 4 groupes :

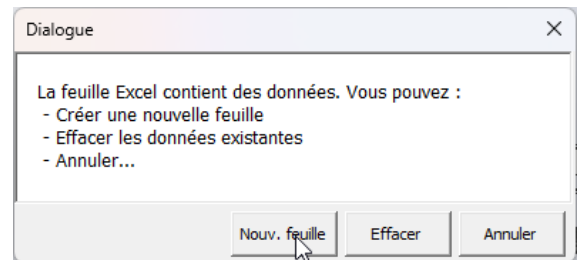
	L	M
Rampes d'aimants		
Mobile 'X' :		
Nbre d'aimants		8
Vitesse mobile 'X'		120
Mobile 'Y' :		
Nbre d'aimants		20
Masse mobile 'Y' (kg)		1218
Y mini (mm)		1
Y maxi (mm)		12
Effort extérieur (N)		-12
Coef. amortissement (N/(m/s))		10
Aimants :		
Espacement (mm)		10
Effort maxi (N)		4.2
Coef. 'raideur'		4
Exposant modèle		3
Durée de simulation		2
Nbre de positions		2500

- *CoulisseauX* : nombres d'aimants et course suivant x, à vitesse supposée constante ;
- *CoulisseauY* : nombres d'aimants, masse, jeu, déplacement maxi (butée), effort extérieur (poids), facteur d'amortissement visqueux ;
- Les aimants : intervalle entre aimants, effort maxi (arrachement du contact), coefficient de "raideur" du modèle, exposant dans le modèle affecté à la distance séparant deux aimants ;
- Paramètres de simulation : durée et nombre de positions, accès à l'animation dans Solidworks.

Les résultats de la simulation sont enregistrés dans la feuille active du classeur Excel.

A chaque nouvelle simulation, la question est posée de créer une nouvelle feuille, ou d'utiliser la feuille en cours après avoir effacé son contenu.

Deux témoins du déroulement de la simulation : le numéro du pas de calcul, et l'animation dans Solidworks.



Le bouton [*Paramètres*] permet de récupérer le jeu de données du modèle présent dans la feuille d'Excel.

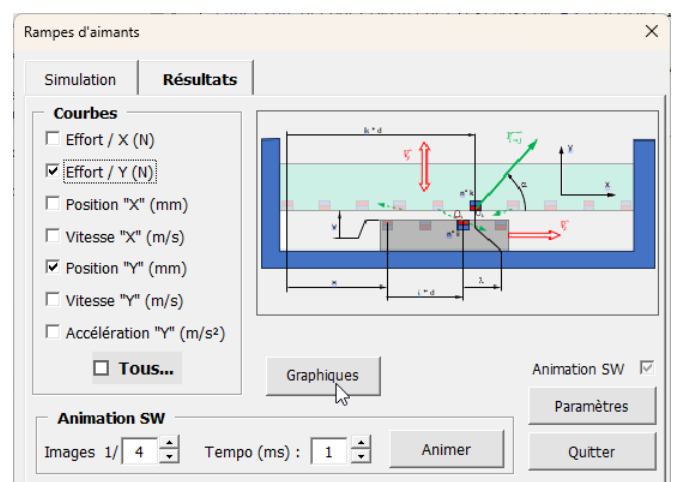
Onglet Résultats

Deux types de résultats possibles après simulations :

- Affichage des courbes des principales variables en fonction du temps ;
- Animation rejouée dans la fenêtre de Solidworks.

Si plusieurs simulations ont été effectuées, c'est celle qui est associée à la feuille active d'Excel qui est utilisée.

Par défaut à l'issue de chaque simulation, les trois courbes les plus significatives (?) sont créées dans un même graphe : effort en projection sur x, effort en projection sur y, déplacement du *CoulisseauY*.



Animation Solidworks

L'animation du modèle Solidworks n'est possible que si le bâti et les deux éléments coulisseaux sont des sous-assemblages de l'assemblage principal, nommés respectivement :

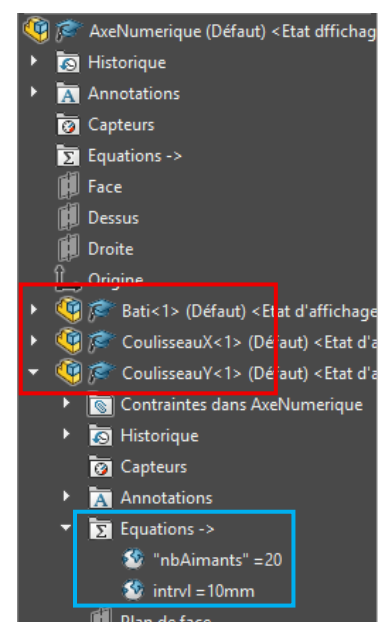
- *Bati<1>*
- *CoulisseauX<1>*
- *CoulisseauY<1>*

A chaque animation sur le modèle initial (*AxeNumerique.SLDASM*), la géométrie des pièces s'adapte au nombre et à l'intervalle des aimants.

Pour cela, dans chacun des deux composants *CoulisseauX* et *CoulisseauY*, la branche *Equations* contient deux variables globales *nbAimants* et *intrvl* qui paramètrent la géométrie SW des pièces d'implantation des aimants. Les fonctions de ces pièces doivent bien sûr faire référence aux variables de leur assemblage parent.

Remarques :

- à la sortie de la macro, un choix est proposé, de sauvegarder le classeur Excel, ou de quitter sans sauvegarde.
- Le UserForm VBA et la fenêtre de Solidworks peuvent sembler bloqués à l'issue de la simulation. Il suffit généralement de cliquer dans la feuille Excel pour que tout rentre dans l'ordre.



Quelques liens

- Document Grabcad servant de base au modèle SW :
<https://grabcad.com/library/axe-x-for-cnc-co2-laser-on-china-parts-1>
Comme souvent avec Grabcad, le modèle géométrique d'origine est très volumineux, pas de la meilleure qualité, et il dû être complété/modifié pour l'adapter à la simulation.
- Site d'un distributeur d'aimants fournissant des données détaillées :
<https://www.supermagnete.fr/adhesive-force-calculation?paramset=m/S-03-03-N>
- PDF (indigeste) sur la théorie du magnétisme
<https://rtc.ma/pdfs/MP/spe-crs/phy/Dipoles%20Electrostatique%20Et%20Magnetostatique.pdf>