

Trieur de billes de roulements

Projet de Construction Mécanique

Microtechnique Semestre II 2018

Groupe 43

May Salama

Mert Coëkmez

Christopher Julien Stocker

Table de matières

• Preamble	2
• Cahier de charges	4
• Etude des different concepts	6
Reception des billes	6
Tri des billes	11
Collection	16
• Design Final	17
Choix des matériaux	21
• Modèles théoriques et calculs	23
• Critique de notre machine	39
• Conclusion	40
• Procédure d'assemblage	41
• Mode d'emploi	57
• Annexes	59

1. Préambule

Le but de ce projet est de réaliser une machine capable de trier des billes de trois tailles différentes à partir d'une simple rotation d'une manivelle. Ce trieur de billes doit être conforme à un cahier des charges bien spécifique, qui est détaillé dans les spécifications (Voir section 2 "Spécifications").

Dès le départ, nous nous sommes intéressés à observer des différentes machines effectuant une tâche similaire desquelles nous pouvions nous inspirer. En particulier, les machines de tri des pièces de monnaie, les distributeurs des gommes à mâcher nous ont inspiré à gérer un grand nombre de billes de tailles différentes afin de les trier dans des récipients séparés.

Ce qui distingue notre machine du reste des machines commerciales est la source d'énergie. En effet, la plupart de ces dernières fonctionnent surtout grâce à l'énergie électrique, alors que notre trieur de billes reçoit une énergie limitée transmise par la mise en rotation de la *manivelle*.

Cette contrainte nous a encouragés à faire une étude plus détaillée sur les différentes approches possibles que nous pouvons mettre en oeuvre afin de profiter au maximum de l'énergie fournie par la manivelle et de l'utiliser efficacement. De même, notre machine doit prendre en compte les éventuelles blocages des billes. Ainsi, nous nous sommes intéressés à considérer des différents conceptions de la machine afin de trouver le modèle le plus optimal permettant d'assurer un fonctionnement non corrompu de la machine.

Dans ce rapport, nous étudierons les différentes étapes de conception de notre machine afin de répondre au mieux aux attentes du projet. Nous commencerons par discuter les différentes approches auxquels nous avons pensé et par présenter les solutions choisies pour notre machine. Nous détaillerons le fonctionnement de celle-ci étape par étape, en partant de l'activation de la manivelle par l'utilisateur jusqu'à la collecte des billes dans des récipients séparés. Nous y joindrons aussi les calculs nous ayant permis d'arriver à notre performance finale et réaliserons un bilan de celle-ci. Enfin, nous fournirons un manuel détaillé de montage ainsi qu'un mode d'emploi de la machine.

2. Cahier des charges

Trieur de billes de roulements

Le projet de construction mécanique consiste en la réalisation de l'étude et de la conception mécanique d'un trieur de billes pour roulements à billes.

L'objectif principal de la machine est de trier des lots de billes de roulements mélangées et de tailles différentes et de les orienter dans des récipients appropriés.

La conception du trieur doit répondre au cahier des charges suivant :

- Mécanisme capable d'accepter un réservoir de 300 billes de 3 tailles différentes, de les trier et les séparer afin de les orienter dans des récipients identifiés pour un usage futur.
- Les trois tailles de billes mélangées sont de 5, 6 et 7mm de diamètre.
- La qualité des billes de chaque lot est de grade 10 selon la norme ISO 3290.
- Le matériau des billes est aléatoire (céramique, plastique ou acier, dureté, ...) selon les lots.
- Les billes d'un même lot sont faites d'un même matériau.
- La répartition des billes par taille contenues dans un lot est inconnue.
- La seule source d'énergie de la machine est une manivelle actionnée d'une main. L'axe de rotation peut avoir n'importe quelle orientation. Le sens de rotation est libre.
- Le coincement des billes lors de leur cheminement dans la machine doit être prévenu.
- La machine ne doit pas affecter la qualité des billes.
- La masse totale de la machine prête à l'emploi et son encombrement ne sont pas limités mais ils devront être raisonnables afin de pouvoir la transporter facilement.
- Les matériaux utilisés pour la construction sont ceux habituellement rencontrés dans les ateliers de mécanique et de construction, à savoir : acier, acier inoxydable, aluminium, laiton, (évent. cuivre) et quelques matières plastiques courantes telles que : Akulon®, Makrolon®, Nylon, PE, PEEK, etc.
- Les pièces obtenues par impression 3D, pliage, soudage, injection et formage à chaud ne sont pas autorisées.
- La mise en œuvre du trieur se fait par une seule personne avec un cycle de triage le plus court possible.
- La sécurité de l'opérateur et de son entourage doit être assurée en tout temps.
- Le diamètre minimal des éléments d'assemblage (vis, axes, etc) est de 4mm et à justifier.

Tout élément du cahier des charges non imposé est libre d'être choisi mais le bon sens est indispensable.

3. Spécifications

Nous pouvons récapituler l'ensemble des spécifications imposées ainsi que nos solutions pour notre machine dans le tableau suivant :

Spécifications	Cahier des charges	Solution
Performance	La machine ne doit pas affecter la qualité des billes	Faible rugosité des surfaces avec les billes
	Machine capable d'accepter un réservoir de 300 billes de 3 tailles différentes	33 railles triangulaires en parallèle
	Trier des billes et les séparer	Trois railles a ecart different
Source d'énergie	Manivelle actionnée d'une main seulement	Manivelle actionnée d'une main seulement
Matériaux utilisés	Matériaux rencontrés communément en atelier de mécanique ou construction	Usage d'aluminium et d'acier inoxydable
Usinage	Pas d'impression 3D, ni de pliage, ni de soudage, ni d'injection ou formage à chaud	Usinage classique uniquement
Mise en oeuvre	Une seule personne avec un cycle de triage le plus court possible	Le billes sont trié pendant
Poids	Facile à transporter	5.503 kg
Diamètre minimal des éléments d'assemblage	4 mm	4 mm

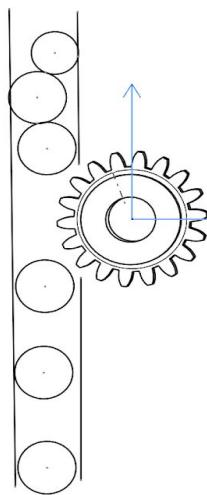
4. Etude des différents éléments de la machine et justification de l'approche choisie

Afin d'assurer la meilleure réalisation possible du projet, nous avons discuté plusieurs mécanismes permettant d'utiliser au mieux l'énergie et le déplacement engendrés lors de l'utilisation de la manivelle. Nous nous sommes intéressés aux différents composants de la machine. En particulier, la réception des billes, le système du tri des billes, la collecte des billes, ainsi que la transmission du mouvement aux différents éléments de la machine. Notre but principal est de garantir une transportation homogène des billes entre les différents éléments de la machine. Nous avons donc cherché des solutions à la fois simples et efficaces afin que notre trieur de billes soit facile à usiner et à assembler.

4.1. Réception des billes dans la machine

Le système de réception des billes doit assurer deux tâches nécessaires pour le bon fonctionnement de la machine. La première consiste à arranger les billes dans une meilleure structuration afin de garantir une transportation incorruptible des billes vers le système de tri. La deuxième tâche est de réaliser cette distribution des billes le plus rapidement possible. Ainsi, nous avons considéré plusieurs options:

Proposition 1: Entonnoir contrôlé par la manivelle



Description: Un entonnoir contrôlé par une manivelle a été la première idée générée lors de la phase de conception. Elle se démarque par sa simplicité, tant dans le fonctionnement que dans la mise en œuvre. Au départ, les billes sont contrôlées par une roue dentée dont la mise en rotation est déclenchée par la manivelle. Ce mouvement de rotation transporte ainsi une bille de l'entonnoir et la ramène au système de tri de la machine. Cette première approche était une tentative pour assurer une transportation contrôlée et ordonnée des billes vers le système de tri, puisque cette solution permet d'obtenir des spécifications précises, en particulier sur le rapport de la vitesse de rotation de la manivelle et la vitesse des billes en sortie.

Avantages	Inconvénients
Approche simple	Difficile à être produit en parallèle
Le passage des billes est bien contrôlé	Prend beaucoup de temps pour passer 300 billes
	Les billes risquent de se fourrer dans l'entonnoir

Proposition 2: Planche de Galton

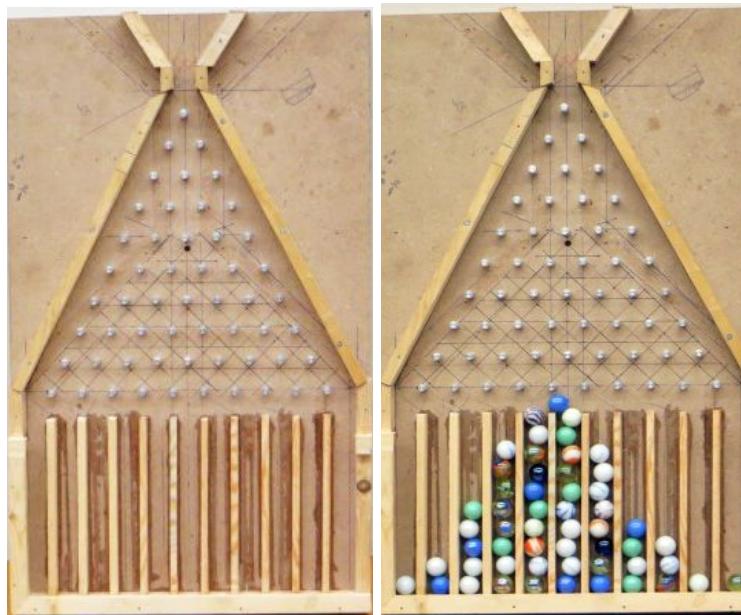


Figure 4.1.2.a. Planche de Galton¹

¹ <https://www.physlab.org/class-demo/galton-board/>

Description: Des clous sont plantés sur la partie supérieure de la planche, de telle sorte qu'une bille lâchée sur la planche passe, soit à droite soit à gauche pour chaque rangée de clous. Dans la partie inférieure les billes sont rassemblées en fonction du nombre de passages à gauche et de passage à droite qu'elles ont fait. On peut remarquer que la répartition des billes dans les cases approche la forme d'une courbe de Gauss.²

Vue que la répartition des billes est peu optimale, nous avons pensé à modifier le nombres de passages de réception des billes, ainsi que la distance entre les différents clous, dans le but d'assurer une distribution plus homogène des billes dans les différents tubes en parallèle. Ce mécanisme assure une distribution des billes, sous l'effet de la gravité, sans recours à une manivelle.

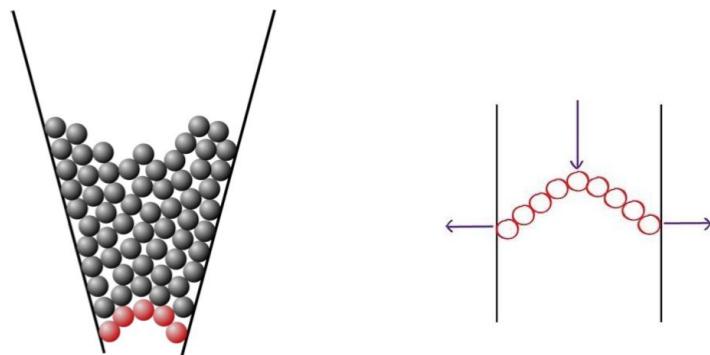


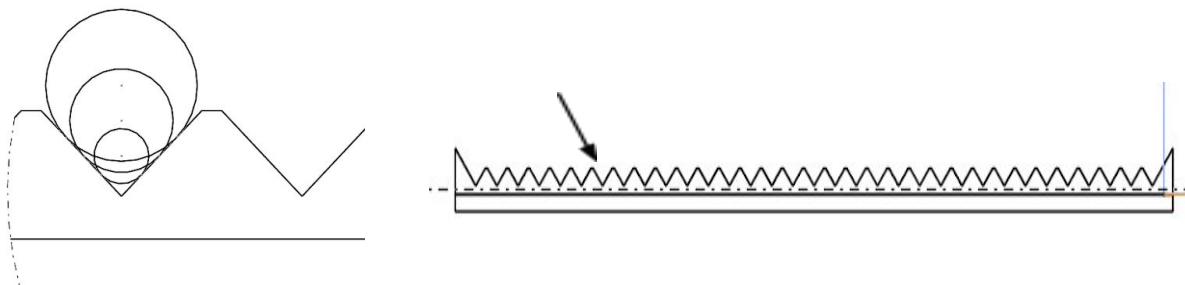
Figure 4.1.2.b Formation de voutes³

² Planche de Galton, Wikipédia

³ Modèle de Janssen, Wikipédia

Avantages	Inconvénients
Garantie une répartition bien calculée	Lente:
Efficacité de distribuer les billes en plusieurs lignes ordonnées au même temps	Il y aura des passages non utilisés aux extrémités, puisque les billes suivent une distribution normale et ce concentrées au milieu
	Les billes risquent de se fourrer avant qu'elles soient lâchées au sommet de la planche, comme montré à la figure 3.1.2.b
	Assemblage nécessite beaucoup de temps

Proposition 3: Rails triangulaires usinés sur un plan incliné



Description: Il s'agit d'un plan incliné à 20° , où nous avons usiné des rails triangulaires en parallèle. Le principe consiste à réduire les sommets triangulaires qui figurent sur le plan. Cela offre une possibilité de répartir les billes manuellement, afin d'assurer une distribution homogène des billes. Les billes sont lâchées au sommet du plan et viennent rouler sur les rails triangulaires jusqu'à ce qu'elles atteignent le cylindre, qui les transporte vers le système de tri. Cette approche est efficace et facile à réaliser.

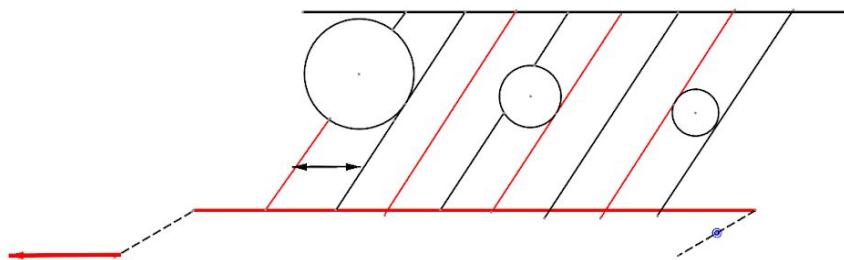
Avantages	Inconvénients
Pas besoin de assembler plusieurs pièces	Usinage plus complexe
Assure une possible répartition homogène des billes avant de les trier	-
Les passages triangulaires assure un alignement des centres de masse sur un même plan	-

Choix:

Sur base de tous les critères mentionnés ci-dessus, nous avons décidé d'utiliser le plan incliné avec des rails triangulaires. Cette approche paraît à la fois simple à réaliser et efficace, puisque nous pouvons produire plusieurs passages en parallèle. De plus, les rails triangulaires nous permettent d'aligner les centres de masse des billes avec les trous du cylindre au premier niveau, ce qui garantie un passage direct des billes dans les trous du cylindre.

4.2. Tri des billes

Proposition 1: Croix de Malte permettant l'ouverture des passages de tailles différentes



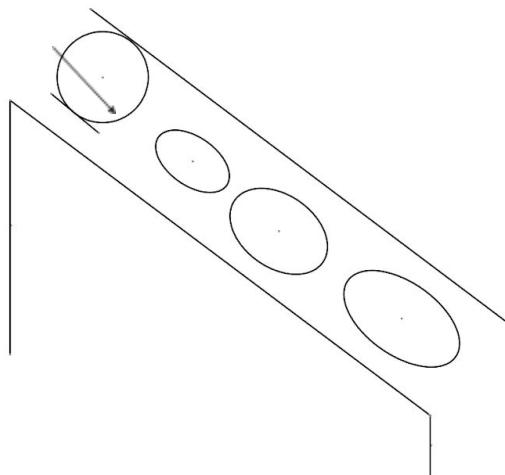
Description: Les billes sont introduites sur le plan, avec la possibilité de les agiter manuellement afin d'assurer une répartition homogène. Lorsque toutes les billes s'arrangent en file sur les différents rails, le système de tri commence. En effet, lorsque nous commençons à tourner la manivelle, les rails rouge s'ouvrent avec une vitesse relative à celle de la manivelle, l'autre rail restant immobile, laisse passer les billes de petite taille, en premier temps. En continuant à tourner la manivelle, la largeur de l'ouverture croît, laissant passer les billes de taille moyenne, et enfin les plus grandes billes.

Avantages	Inconvénients
Originale	Mécanisme pour après collecter les billes est compliqué
Très rapide en comparaison à d'autres options	Ne facilite pas un mécanisme simple pour ensuite collecter les billes
Une seule pièce qui reçoit et trie les billes	Plusieurs pièces à usiner
Assure une répartition homogène des billes avant de les trier	

Après une étude approfondie de ce système, de nombreux calculs, et des consultations avec M B. Lacour et M J.-F. Ferrot, nous avons décidé que ce système ne représentait pas un choix optimal pour notre machine, et nous avons donc mis de côté cette approche. La raison principale étant la complexité du mécanisme. Néanmoins que la tri des billes était relativement simple, ce mécanisme avait un problème de collection de billes vu qu'elles sont collectées au même endroit mais à des intervalles de temps différents. Nous avons pensé à mettre plusieurs engrenages pour régler ce problème mais avec un grand nombre d'engrenages le système paraît peu efficace et réalisable.

Proposition 2: *Plan incliné dans lequel trois trous sont usinés*

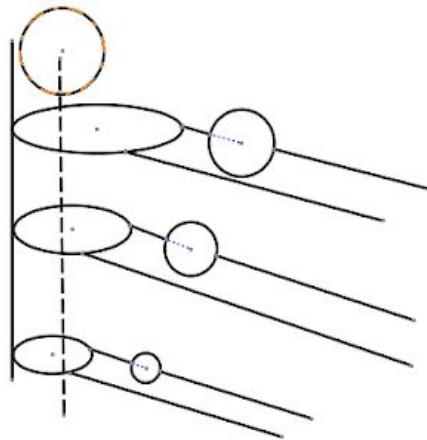
Bille lâchée depuis le sommet du plan



Description: Un plan incliné sur lequel figurent trois trous correspondant aux trois tailles différents des billes. La bille, lâchée depuis le sommet du plan, roule le long de ce dernier, jusqu'à ce qu'elle passe par le trou correspondant à sa taille afin de trier les différentes billes. Cette approche nous a paru à la fois hasardeuse et peu efficace.

Avantages	Inconvénients
Simple et facile à usiner	Les billes risquent de se bloquer le long du plan
	Difficile de s'assurer autrement que par l'expérience que les billes seront triées correctement

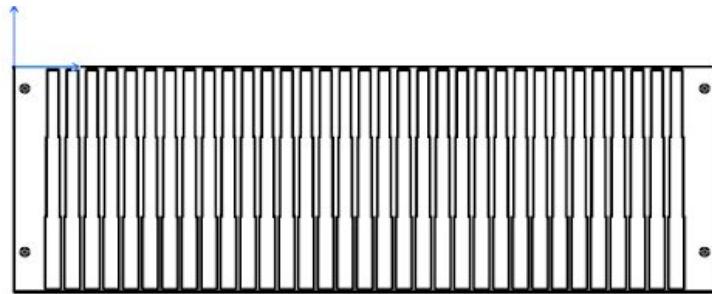
Proposition 3: Superposition de 3 trous de différentes tailles usinés sur des plans inclinés



Description: Les billes sont introduites une par une sur le premier niveau, qui contient un cylindre creux laissant passer les billes de taille moyenne et petite, de telle sorte à ce que les grandes billes ne peuvent pas passer par ce trou et roulent ainsi jusqu'à atteindre le récipient qui est fourni pour leur collecte, grâce au plan incliné. Le même mécanisme se répète avec le deuxième niveau où les billes de taille moyenne sont collectées, puisque le trou ne laisse passer que les petites billes. De plus, la distance entre les différents niveaux est relativement petite, afin d'assurer un passage direct et aligné des billes d'un niveau à l'autre sans qu'elles se convergent.

Avantages	Inconvénients
Assemblage et usinage simples	Lent: on laisse passer les billes une par une
	Une bille risque de se bloquer dans un des trous et ainsi bloquer les passages des autres billes
	Nécessite un alignement précis pour la plupart des pièces

Proposition 4: Trois trous rectangulaires sur des passages parallèles sur un plan courbé



Description: Les billes arrivent au sommet du plan courbé et roulent sans glissement le long de leur chemin afin d'être filtrées sous l'effet de la gravité. En effet, ce chemin contient trois trous rectangulaires placés dans l'ordre croissant de leur largeur. Le premier trou laisse passer les plus petites billes, le deuxième permet de trier les billes de taille moyenne, et finalement le troisième trou assure le tri des plus larges billes . Le plan étant courbé, permet ainsi aux billes de conserver une vitesse suffisamment grande pour qu'elles soient triées rapidement.

Avantages	Inconvénients
Rapide	Coût de matière perdue pour l'usiner est important
Usinage simple	
Facilite la collection du billes	

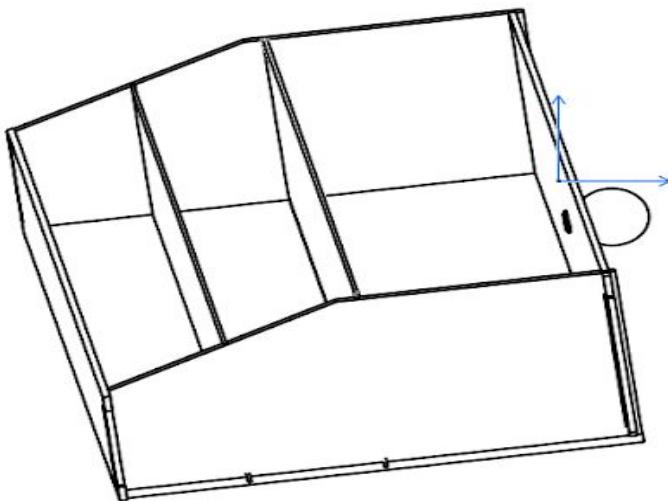
Choix:

Au début, nous avons décidé de mettre en oeuvre des passages usinés sur un plan courbé. En effet, ceux-ci permettent de limiter les frottements lors du passage des billes, ce qui assure un triage rapide en comparaison avec les autres options. Cependant, après une étude approfondie de ce système, de nombreux calculs, et des consultations avec M B. Lacour et M J.-F. Ferrot, nous avons décidé de remplacer le plan courbé par un plan incliné.

Puisque la vitesse des billes roulant sur un plan courbé reste proche de celle des billes roulant sur un plan incliné, le fait d'établir le système avec un plan courbé ne rapporte pas un grand avantage. Ainsi, afin d'assurer un mécanisme simple, le plan incliné nous a paru le choix optimal, puisqu'il nous évitera une perte de matière lors de son usinage en comparaison à un plan courbé.

4.3. Collecte des billes

Afin de collecter les billes après leur filtrage, selon la taille, nous avons choisi d'utiliser trois récipients que nous pouvons détacher de la machine comme des tiroirs. Au-dessous de chaque passage d'une taille donnée figure un récipient où les billes sont rassemblées, lors du commencement du tri. La largeur de ces récipients est bien définie par la longueur des rails sur lesquels les billes roulent.



Avantages	Inconvénients
Simple et efficace	Rassemble plusieurs pièces
Facile à détacher de la machine	
Facile à assembler	

4.4. Transmission du mouvement de la manivelle à la machine

Nous avons préféré d'établir un mécanisme qui tire avantage de l'usage de la manivelle . A partir d'un simple mouvement de la manivelle, à vitesse raisonnable, on fait tourner un cylindre qui stocke les billes depuis leur réception dans la machine, jusqu'aux rails qui assurent leur tri. Ainsi, notre machine dispose d'un ensemble d'arbres et d'engrenages permettant la transmission du mouvement aux différents éléments du système, ainsi que l'adaptation de ce mouvement en fonction de ce dont nécessite chacun d'entre eux. Afin d'assurer une transmission efficace de ce mouvement, nous avons considéré plusieurs alternatives:

Proposition 1: Utilisation de la Croix de Malte

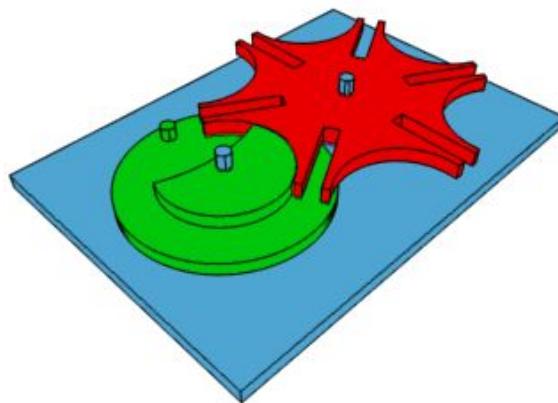


Figure 4.4.a. Croix de Malte

- Description: Un disque tourne avec une vitesse uniforme, et porte un doigt. Quand ce doigt pénètre dans une rainure de la croix de malte il provoque sa rotation d'un n-ième de tours, n étant le nombre de rainures de la croix. Quand le doigt sort de la rainure, le disque moteur continue sa rotation alors que la croix de malte s'immobilise. L'évidement du disque permet de stabiliser la croix quand le doigt n'est pas engagé dans une rainure.⁴

⁴ Croix de Malte, Le Mans Université,
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/o2/meca/croixmalte.html>

- Etude cinématique:

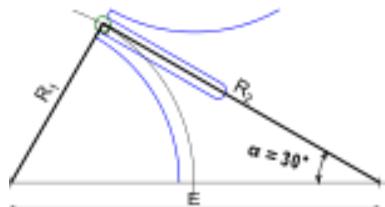
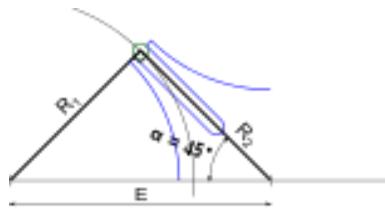


Figure 4.4.b.

Soit:

n: le nombre de rainures que comporte la croix de Malte (roue menée)

α = $2 \cdot \frac{\pi}{n}$ [rad] : l'angle entre deux rainures (1)

E : l'entraxe (*hypoténuse du triangle rectangle de côtés R_1 et R_2*) [m]

R_1 : le rayon de la roue menante [m]

R_2 : le rayon de la roue menée [m]

$$k = \frac{E}{R_1} = \frac{1}{\sin(\alpha)}$$

ω : vitesse angulaire constante de la roue menée: *mouvement de rotation uniforme* [m. s⁻¹]

La vitesse angulaire maximale de la roue menée est donc:

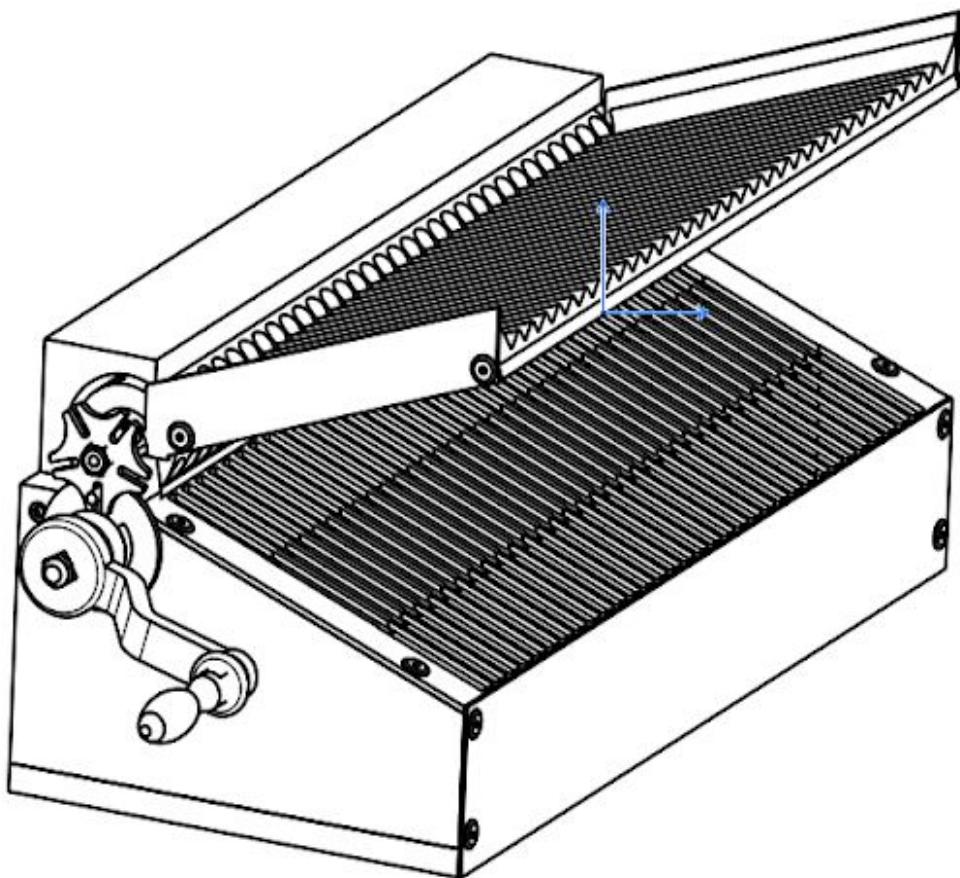
$$\omega_o = \frac{\omega \cdot (k - 1)}{k^2 - 2k + 1} \quad [\text{m. s}^{-1}]$$

Vue que l'angle, qui sépare les deux rainures dans la croix de Malte , est inversement proportionnel au nombre de rainures d'après la relation (1), nous avons cherché à augmenter le nombre de rainures afin d'assurer un petit angle **α** . Ayant un angle **α**

relativement petit permettra d'avoir une grande vitesse angulaire pour transmettre les billes rapidement.

5. Design final

Notre design final est né après une longue phase de conception ! Plusieurs croquis de différents modèles ont été réalisés comme nous nous sommes mis en question vis à vis de la simplicité et l'efficacité de la machine. Quelle approche établir ? Où chercher les différentes pièces et comment assembler toute la machine ? Après de nombreuses modifications, nous avons choisi le modèle qui nous a paru le plus optimal pour réaliser le trieur de billes.



Notre trieur de billes reçoit au premier niveau les billes sur des rails usinés triangulairement. Ce plan de réception des billes n'est pas couvert, ce qui permet ainsi à l'utilisateur de bien distribuer les billes manuellement en les répartissant homogènement sur les 33 rails. Cette surface est placée avec une inclinaison assurant le roulement des billes jusqu'à la fin du bloc. A ce niveau, les billes sont en file, prêtes de rouler le long du plan incliné, afin d'être envoyées vers un cylindre roulant, où nous avons usiné des compartiments avec la capacité de recevoir une seule bille chacun.

Le cylindre contient 5 rangées composées de 33 compartiments chacune. Ces compartiments sont alignés avec les rails du plan incliné, ce qui assurent une réception non corrompue des billes. Cela permet ainsi de trier 165 billes lors d'une seule mise en rotation de la manivelle. En effet, les billes sont reçues dans les compartiments qui leur sont attribués et sont ainsi transportées vers le système de tri de la machine grâce au cylindre roulant alimenté par la manivelle.

Les billes tournent avec le cylindre et atteignent éventuellement un angle critique à partir duquel elles sortent des compartiments pour rejoindre un nouveau système de rails où elles sont triées. La distance entre les rails changent à 3 segments différents. En premier temps, la distance entre les rails est considérée de 5.30 mm, permettant la chute des petites billes dans le récipient destiné à leur collecte, alors que les billes grandes et moyennes continuent à rouler le long de ce premier segment, afin d'atteindre le deuxième segment. En deuxième temps, la distance entre les rails augmente et devient 6.30 mm. Cela permet aux billes de taille moyenne de chuter et être rassemblées dans leur réservoir de collecte. En dernier temps, la distance décroît encore et devient donc 7.30 mm, laissant passer toutes les grandes billes dans le récipient de collecte correspondant.

Ce récipient de collecte est divisé en 3 parties, permettant de rassembler les billes de chaque taille dans un réservoir séparé. Celui-ci étant détachable de la pièce, nous pouvons collecter facilement les billes pour un futur usage.

Point sur le choix du matériau

Dans ce projet, vu que la masse des billes est assez faible, ces dernières ne forment pas une contrainte importante de la machine. Cependant, nous voulions que notre machine soit assez résistante aux éventuelles contraintes auxquelles elles sera soumise . Ainsi, nous nous sommes intéressés à l'étude des différents matériaux qui permettront à notre machine d'avoir une longue durée de vie, un poids raisonnable et dont le coût est faible.

C'est pourquoi les deux matériaux que nous avons utilisés en majorité sont : *l'aluminium (EN AW-Al Mg3)* et *l'acier inoxydable (X 10 Cr-Ni-S 18 10)*. La partie qui suit offre ainsi une vue d'ensemble des matériaux et les raisons pour lesquelles nous les avons adoptés dans notre projet.

Pour faire ces choix nous nous sommes servis des cartes d'Ashby pour comparer la densité et limite élastique des différents matériaux.

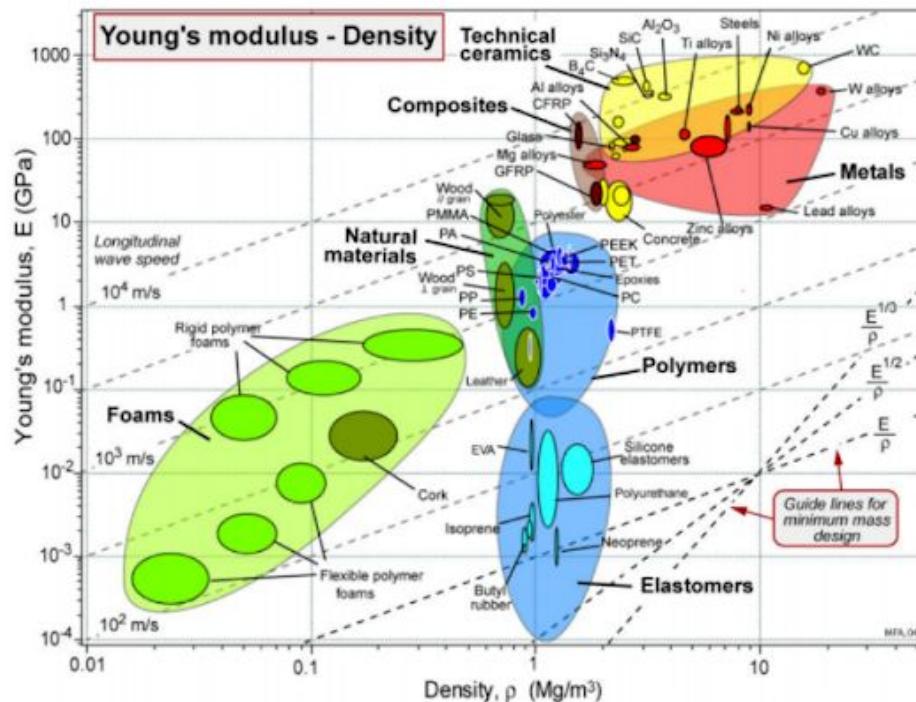


Figure 5. Carte d'Ashby Young-Density⁵

⁵ M Ashby, Cambridge

La carte montre bien que l'aluminium ainsi que l'acier offrent une bonne résistance par rapport au reste des matériaux, par exemple les polymères. Cela permettra à notre machine d'assurer une durée de vie assez grande.

De même, nous nous sommes intéressés à la carte d'Ashby ci-dessous, qui relie le coefficient d'usure avec la dureté des matériaux :

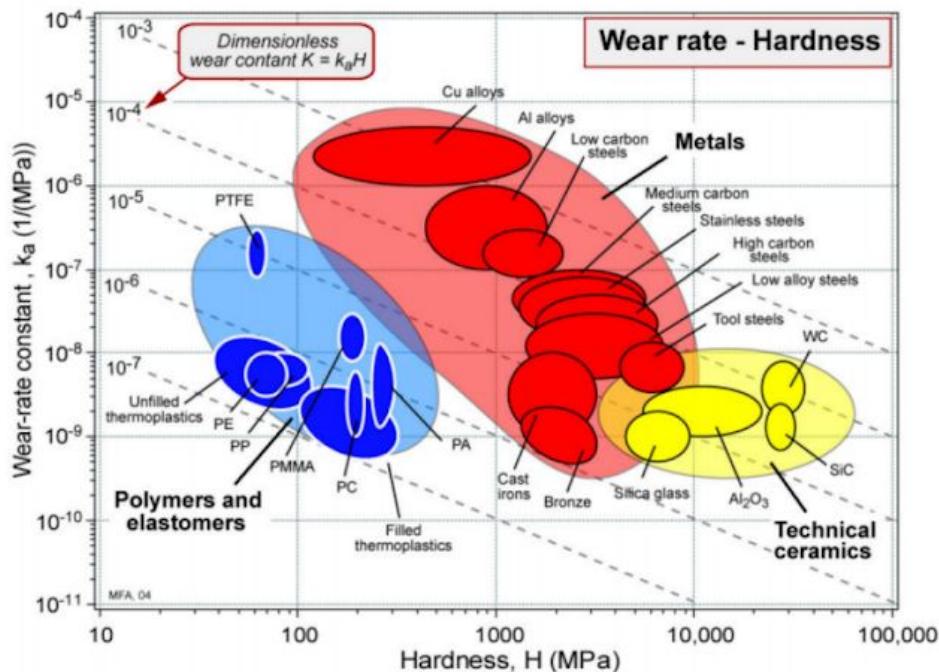


Figure 6. Carte d'Ashby Coefficient d'usure-Dureté⁶

L'alliage en aluminium garantie une excellente résistance à la corrosion. Sa basse masse volumique rend la pièce plus légère. Vu ces avantages, il est très demandé dans le marché ce qui lui rend plus facile à trouver et aussi à un prix raisonnable. Nous l'avons utilisé pour les pièces qui occupent un volume conséquent et qui ne vont pas devoir supporter de grandes contraintes.

L'alliage en acier inoxydable offre aussi une excellente résistance à la corrosion. En plus, l'acier se caractérise par une limite élastique importante c'est pourquoi il est une bonne option pour les pièces qui seront soumises à plus de tension et de contraintes. Même s'il est plus cher par rapport aux autres métaux, sa durée de vie lui rend plus intéressant à utiliser.

⁶ M Ashby, Cambridge

6. Modèle théorique et calculs

Après avoir présenté le fonctionnement de notre machine, nous pouvons détailler la théorie derrière la réalisation, notamment afin de s'assurer de son bon fonctionnement.

6.1. Mouvement d'une bille sur un plan incliné lors de la réception des billes - 2 points de contact

Calculons l'angle d'inclinaison de la surface de tri des billes , à partir duquel les billes roulement sans glissement. Le calcul de cet angle est indispensable afin de déterminer la vitesse des billes. Pour le faire, nous sommes inspirés du calcul fait en cours avec M B. Lacour.

Soit :

v = vitesse linéaire de la bille sur le plan

ω = vitesse de rotation de la bille sur le plan

μ = coefficient de frottement bille/plan

α = angle des rails inclinés

G = Centre de masse de la bille

R = Réaction du plan incliné sur la bille

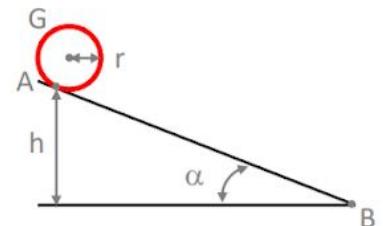
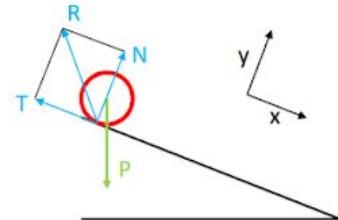
T = composante tangente au plan

N = composante normale au plan

P = mg = poids

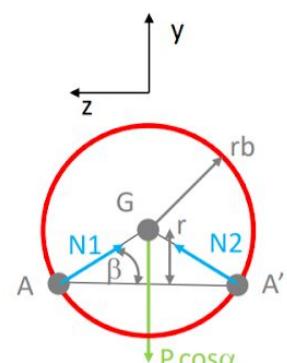
I = $\frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2$ = moment d'inertie d'une bille (sphère)

N = $N_1 + N_2$



D'après le théorème de la résultante dynamique, on a :

$$m \cdot a = R + P$$



$$\text{Selon } x: m \cdot a_G = -T + mg \sin \alpha \quad (1)$$

$$\text{Selon } y: 0 = N \cdot \sin \beta - mg \cdot \cos \alpha \Rightarrow N \cdot \sin \beta = mg \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

$$\text{Selon } z: 0 = N_2 \cdot \cos \beta - N_1 \cdot \cos \beta \Rightarrow N_1 = N_2 \quad (3)$$

D'après le théorème du moment dynamique en G (axe z) ,
 on trouve :

$$I\dot{\omega}_G = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r \cdot b^2 \cdot \dot{\omega}_G = GG \wedge P + GA \wedge R = rT \quad (4)$$

avec $r = rb \cdot \sin\beta$

Conditions pour un roulement sans glissement :

- $v_G = r \cdot \omega_G \Rightarrow a_G = r \cdot \ddot{\omega}_G$ (5)

- $T < \mu N$ (6)

De (4) et (5), on obtient :

$$T = \frac{2}{5} m \cdot \frac{r}{\sin^2\beta} \cdot \dot{\omega}_G = \frac{2}{5} m \cdot \frac{a_G}{\sin^2\beta}$$

Remplaçons ainsi T dans (1) :

$$\frac{2+5 \cdot \sin^2\beta}{5 \cdot \sin^2\beta} \cdot ma_G = mg \cdot \sin\alpha \Rightarrow a_G = \frac{5 \cdot \sin^2\beta}{2+5 \cdot \sin^2\beta} \cdot g \sin\alpha$$

D'après (6), on obtient la condition suivante sur l'angle :

$$T = \frac{2}{2+5 \cdot \sin^2\beta} \cdot m g \sin\alpha < \mu N = \mu mg \cdot \frac{\cos\alpha}{\sin\beta}$$

D'où :

$$\tan\alpha < \mu \frac{2+5 \cdot \sin^2\beta}{2 \cdot \sin\beta}$$

Cherchons β :

$$\text{On a } \cos\beta = \frac{\sqrt{2} \cdot r}{2 \cdot r} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow \beta = 45^\circ$$

Pour un roulement à billes, on a $\mu = 0.3 \Rightarrow \alpha < 43.7^\circ$

o

Le choix d'un roulement sans glissement se justifie par :

- Pour rouler la bille, faut force $F_{roule} \approx \mu_R \cdot N$ avec $\mu_R = \frac{a}{R}$
- Pour pousser la bille, faut force $F_{glisse} = \mu N$

Or, nous avons souvent que : $\frac{a}{R} \ll \mu$ ⁷

La résistance de roulement est généralement beaucoup plus petite que les forces de frottements pour glisser, d'où l'utilisation des roulements à bille est plus favorable.

6.2. Calcul de l'hauteur entre un bille et le fond du rails

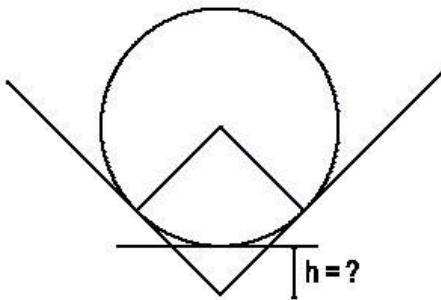


Figure 6.2.a

La bille avec le rayon le plus petit est celle qui va déterminer si une bille va pouvoir entrer dans le compartiment du cylindre ou non, puisqu'elle indique la hauteur critique à laquelle se trouve la bille au plan de réception comme l'indique la figure 6.2.a . Alors, le cas limit est celui avec la bille de diamètre 5mm. Ainsi, nous pouvons distinguer une relation entre la hauteur h et le rayon r de la bille.

Pour que la bille puisse commencer à entrer dans son compartiment dans le cylindre, l'écart entre le point le plus bas de la bille et celui de son compartiment doit être plus petit que h .

Soit :

h_1 : écart entre le point le plus bas de la bille et celui du compartiment du cylindre

Pour : $h_1 \leq h \Rightarrow$ la bille commence à entrer dans son logement dans le cylindre.

Considérons le cas limit, nous choisissons la bille avec le plus petit diamètre, qui vaut 4.75mm, prenant compte des tolérances sur les billes.

⁷ "Statics", 11th edition, Hibbeler, chapter 8

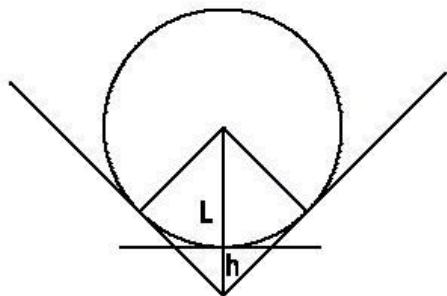


Figure 6.2.b

Soit :

$$d = 4.75 \text{ mm}$$

$$r = d / 2 = 2.375 \text{ mm}$$

$$L = r \times \sqrt{2}$$

$$h = L - r = r(\sqrt{2} - 1) = 0.984 \text{ mm}$$

Cette hauteur nous paraît utile afin de chercher le bon emplacement des rails par rapport au centre du cylindre.

6.3. Etude sur le choix de la croix de malte ou d'un engrenage simple

Commençons par discuter le temps nécessaire pour trier une bille avec un cylindre avec un engrenage simple. D'abord, il faut définir quelques angles qui définissent la géométrie de notre cylindre. Le schéma suivant montre les longueurs qu'on a considérées pour notre calcul.

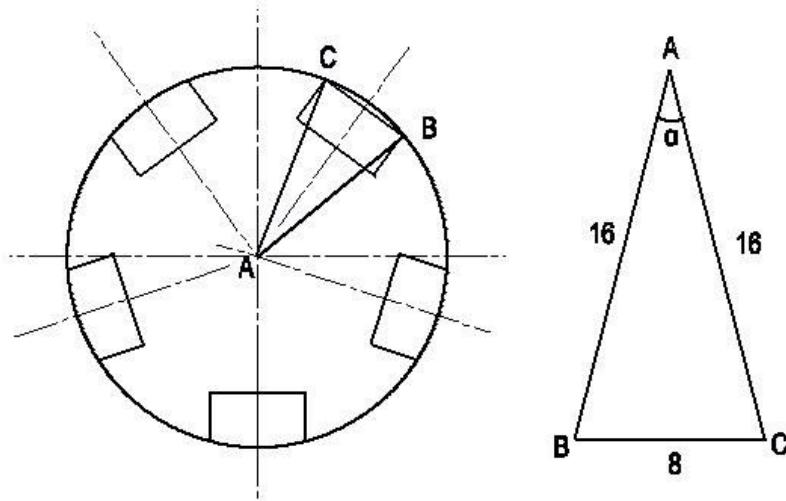


Figure 6.3.a

D'après le théorème de Cosinus, on a :

$$AB^2 + AC^2 - 2BC \cdot AC \cos(\alpha) = BC^2$$

$$\text{D'où : } 16^2 + 16^2 - 2 \times 16 \times 16 \times \cos \alpha = 8^2$$

$$\Rightarrow 2 \times 16 (1 - \cos \alpha) = 64$$

$$\Rightarrow 1 - \cos \alpha = \frac{64}{2 \times 16 \times 16}$$

$$\Rightarrow \cos \alpha = \frac{7}{8}$$

$$\Rightarrow \alpha \approx 28.96^\circ$$

Maintenant nous pouvons définir les conditions limites pour qu'une bille puisse rouler dans son compartiment.

De même, la distance entre le railles et l'axe horizontal passant par le centre du cylindre vaut 0.859mm.

Le schéma suivant montre ainsi le passage de cette dernière vers son logement.

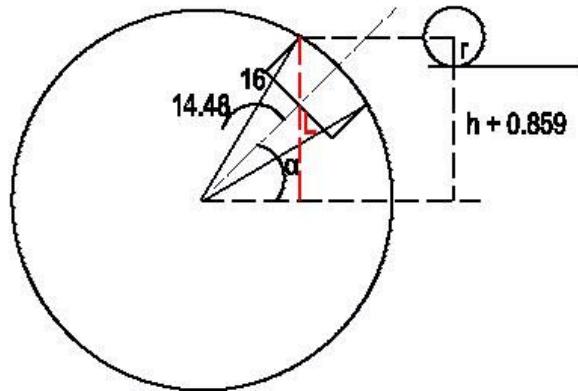


Figure 6.3.b

Ayant calculé h dans la partie précédente, nous pouvons définir:

$h + 0.859\text{mm}$: la hauteur entre la bille et les railles

Sachant:

$$L = r + h + 0.859$$

$$L = 16 \times \sin(\alpha + 14.48^\circ)$$

Alors :

$$\Rightarrow 16 \times \sin(\alpha + 14.48) = r + r(\sqrt{2} - 1) + 0.859$$

$$\Rightarrow \sin(\alpha + 14.48) = \frac{r\sqrt{2} + 0.859}{16}$$

$$\Rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{r\sqrt{2} + 0.859}{16}\right) - 14.48^\circ$$

Nous pouvons maintenant chercher l'écart angulaire entre la position initiale du logement et la nouvelle position définie lorsque le cylindre tourne.

Sachant :

$$L = h + 0.859$$

$$L = 16 \times \sin(\beta - 14.48)$$

alors :

$$\Rightarrow 16 \times \sin(\beta - 14.48) = r(\sqrt{2} - 1) + 0.859$$

$$\Rightarrow \sin(\beta - 14.48) = \frac{r(\sqrt{2}-1) + 0.859}{16}$$

$$\Rightarrow \beta = \arcsin\left(\frac{r(\sqrt{2}-1) + 0.859}{16}\right) + 14.48^\circ$$

Soit :

$\Delta\theta$: l'angle que le cylindre doit tourner pour qu'une bille puisse entrer dans son compartiment

On le définit comme suit :

$$\Delta\theta = \beta - \alpha$$

$$\Rightarrow \Delta\theta = \arcsin\left(\frac{r(\sqrt{2}-1) + 0.859}{16}\right) - \arcsin\left(\frac{r\sqrt{2}+0.859}{16}\right) + 28.96^\circ$$

On va utiliser cet angle pour déterminer la vitesse angulaire maximale du cylindre ω_{cyl} . Ils nous faut donc connaître le temps minimum pour qu'une bille entre dans son compartiment.

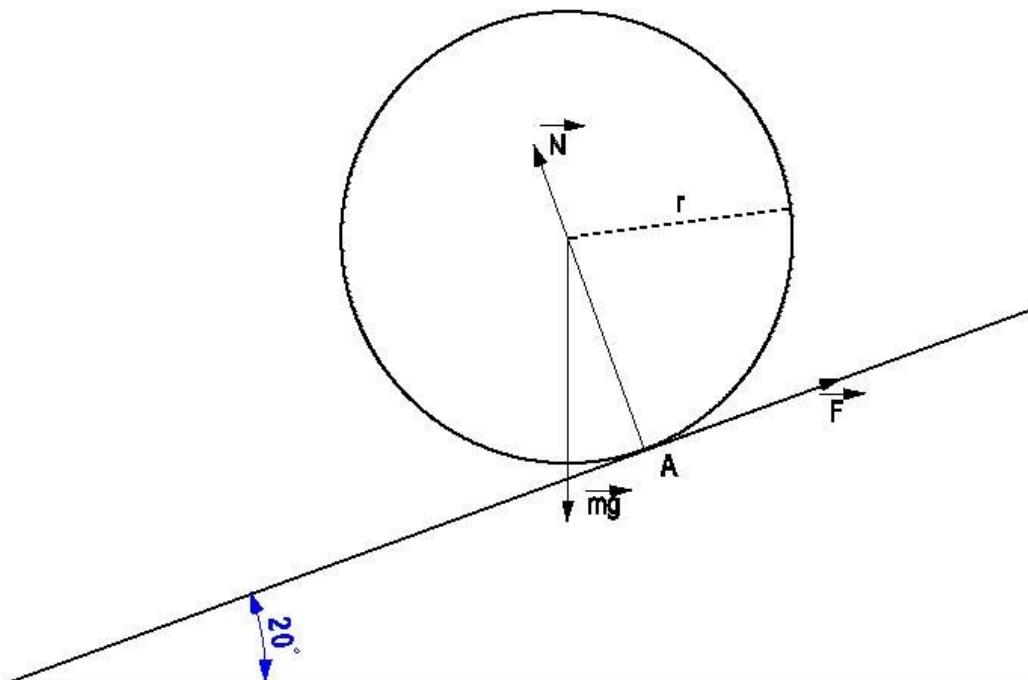


Figure 6.3.b

Vue que la bille roule sans glissement autour du point A, on a :

$$I_{sphere/A} = \frac{2}{5}mr^2 + mr^2 = \frac{7}{5}mr^2$$

et :

$$L = I\omega = \frac{7}{5}mr^2\omega$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{7}{5}mr^2 \frac{d\omega}{dt} = \Gamma_A$$

On sait que :

$$\Gamma_A = mgr \times \sin 20$$

Alors :

$$\Rightarrow \frac{7}{5}mr^2 \frac{d\omega}{dt} = mgr \times \sin 20$$

$$\Rightarrow \frac{d\omega}{dt}r = \frac{5}{7}g \times \sin 20$$

$$\Rightarrow a = \frac{5}{7}g \times \sin 20$$

Nous pouvons donc calculer le temps nécessaire pour qu'un bille passe dans son compartiment. Nous avons fait l'approximation que chaque bille doit tourner une distance de r pour pouvoir atteindre son logement.

En intégrant deux fois la dernière équation cherchée pour l'accélération, par rapport au temps, nous trouvons ainsi l'équation du mouvement de la bille :

$$\Rightarrow \int_0^{\Delta t} a \, dt = \frac{1}{2}a(\Delta t)^2 = r$$

$$\Rightarrow \sqrt{\frac{2r}{a}} = \Delta t$$

$$\Rightarrow \sqrt{\frac{2r}{\frac{5}{7}g \sin 20}} = \Delta t$$

Pour la rotation continue du cylindre, la vitesse angulaire maximale ω_{cyl} du cylindre est égale à $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$.

$$\Rightarrow \omega_{cyl} = \frac{\arcsin\left(\frac{r(\sqrt{2}-1)+0.859}{16}\right) - \arcsin\left(\frac{r\sqrt{2}+0.859}{16}\right) + 28.96^\circ}{\sqrt{\frac{2r}{\frac{5}{7}g \sin 20}}}$$

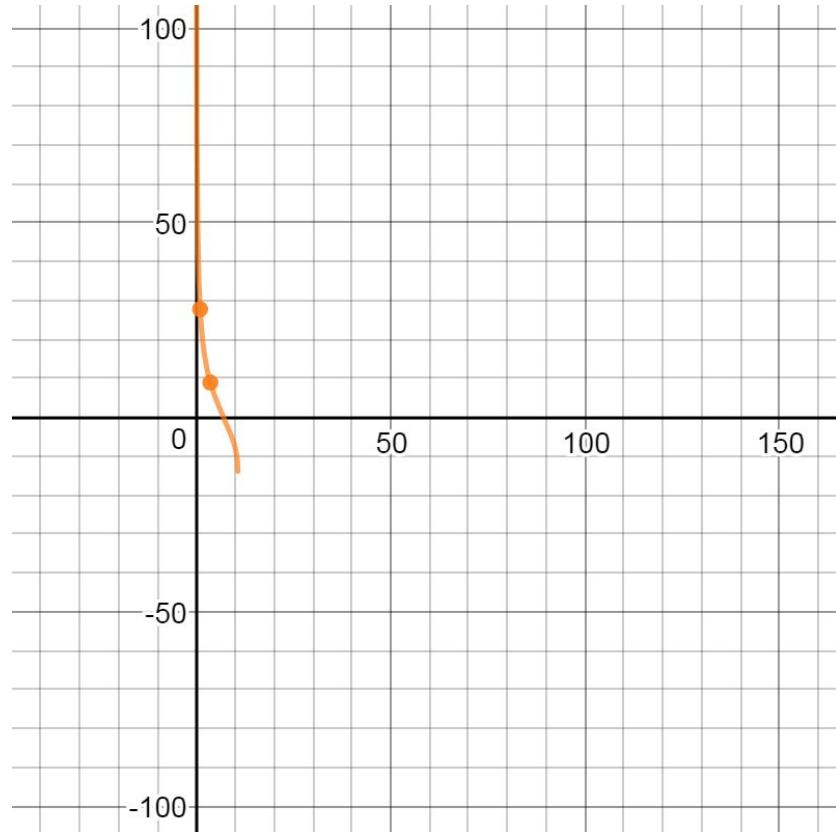


Figure 6.3.b

Nous pouvons clairement voir sur le graphe (*Figure 7.3.b*) que la fonction $\omega_{cyl}(r)$ est décroissante, donc le facteur limitant pour la vitesse angulaire maximale sera le roulement de la bille la plus grande, qui a un rayon de $r = 3.635mm$.

On effectue l'application numérique pour cette valeur :

$$\omega_{cyl}(3.625) = 28.144 \text{ deg/s}$$

Comme le cylindre doit parcourir un écart angulaire de 72° pour distribuer une rangée de billes, nous pouvons utiliser ω_{cyl} pour trouver Δt :

$$\Delta t = \frac{72^\circ}{\omega_{cyl}} = 2.558 \text{ s}$$

Maintenant, nous allons calculer le temps dont nous avons besoin pour distribuer une rangée de billes si nous établirons un mécanisme de la Croix de Malte.

Avec la croix de Malte, le mouvement s'effectue en deux étapes. En premier temps, le mécanisme reste stationnaire jusqu'à ce que l'arbre trouvant sur la roue menat entre dans le trou de la roue menée. Ensuite, le cylindre tourne 72° pour délivrer la bille.

Nous connaissons déjà Δt qui est le temps du roulement d'une bille dans le trou. Pendant ce Δt , le mécanisme reste stationnaire. Cette période stationnaire est imposée par le mouvement de la roue menant de la Croix de Malte.

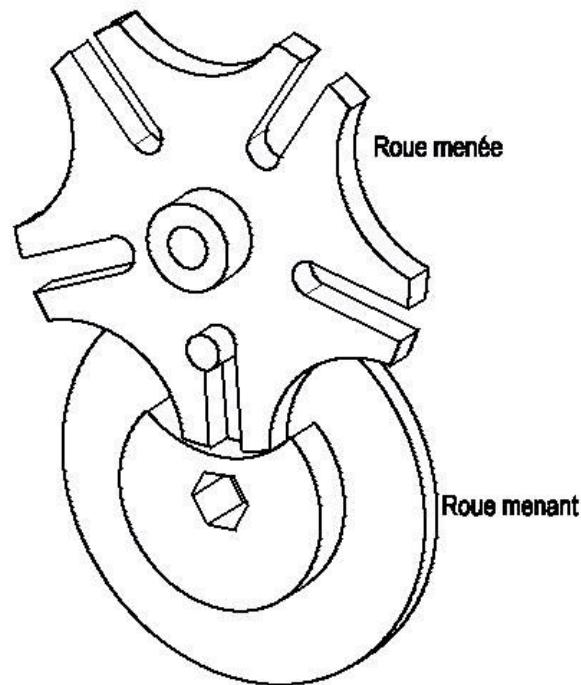


Figure 6.3.c

Cette partie (roue menat) peut tourner 360° chaque Δt secondes, ce qui lui donne une vitesse angulaire de $\Delta\omega_{menant} = \frac{360}{\Delta t}$. Depuis cette vitesse, nous

pouvons calculer la vitesse angulaire de la pièce menée grâce à la formule que nous avons mentionnée dans la partie 4.4. :

$$\omega_{menee} = \frac{\omega_{menant} \times (k - 1)}{k^2 - 2k + 1}$$

avec k la quantité des rainures sur la pièce menée; dans ce cas étant égale à 5.

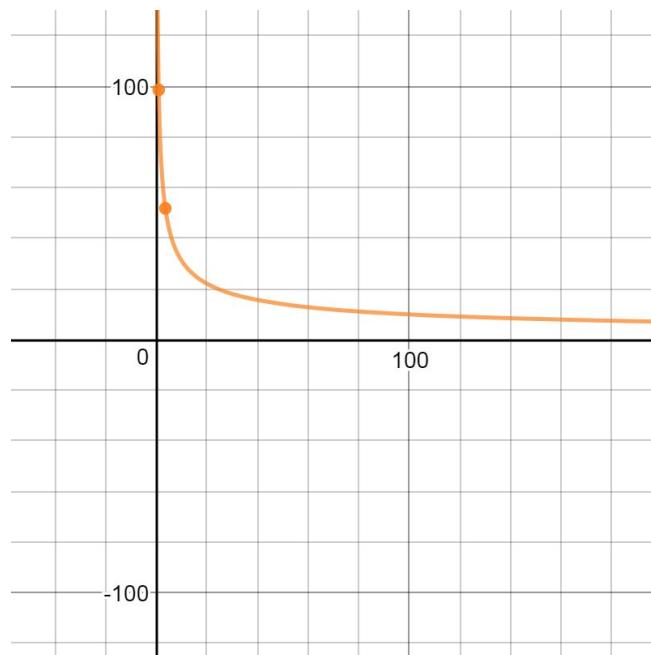


Figure 6.3.d

Nous observons que la fonction $\omega_{menee}(r)$ est décroissante, donc nous choisissons encore une fois la bille la plus grande de rayon $r = 3.625\text{mm}$ comme le facteur limitant:

$$\Delta\omega_{menee}(3.625) = 163.661 \text{ deg/s}$$

Nous pouvons maintenant calculer le temps total pour distribuer une rangée de billes en faisant la somme des durées des deux étapes:

La durée de l'étape 1 : Δt (3.625) = 0.55 s

La durée de l'étape 2 : $\Delta t = \frac{72}{\Delta \omega_{menee}} = \frac{72}{163.661} = 0.44$ s

Durée totale : 0.55 + 0.44 = 0.99 s Croix de Malte.

Par conséquent, l'utilisation d'une croix de Malte est justifiée si la machine est opérée avec la vitesse angulaire idéale car cela prend 0.99 s pour délivrer une rangée de billes utilisant un mécanisme avec une Croix de Malte, tandis qu'un mécanisme avec un engrenage simple peut faire la même opération en 2.558 s.

6.4. Calcul de la durée totale du tri

Notre machine ayant 33 rails, cela prendra 10 tours du cylindre pour délivrer toutes les billes sur le rail de tri. Cependant, comme nous avons employé une Croix de Malte à 5 rainures, les premiers 3 passages seront inutiles puisque nous n'avons pas encore mis les billes dans les trous de cylindre. Alors, nous aurons besoin de faire 13 tours de manivelle pour distribuer toutes les billes.

Après avoir distribué les dernières billes, il faut attendre jusqu'à les billes atteignent le dernier rail qui est le plus large. Puis elles feront une chute libre pour entrer dans le récipient pour être collectées.

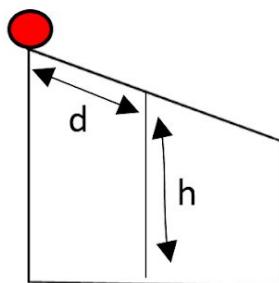


Figure 6.4.b

Temps de distribution :

$$13 \times \Delta t = 13 \times 0.99 = 12.87 \text{ s}$$

Puis nous calculons le temps pour l'étape sur les rails:

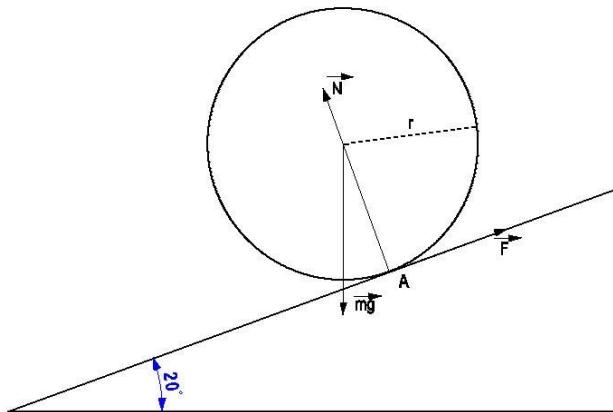


Figure 6.4.b

Les billes font un roulement sans glisser autour du point A:

$$I_{sphere/A} = \frac{2}{5}mr^2 + mr^2 = \frac{7}{5}mr^2$$

et :

$$L = I\omega = \frac{7}{5}mr^2\omega$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{7}{5}mr^2 \frac{d\omega}{dt} = \Gamma_A$$

On sait que :

$$\Gamma_A = mgr \times \sin 20$$

Alors :

$$\Rightarrow \frac{7}{5}mr^2 \frac{d\omega}{dt} = mgr \times \sin 20$$

$$\Rightarrow \frac{d\omega}{dt}r = \frac{5}{7}g \times \sin 20$$

$$\Rightarrow a = \frac{5}{7}g \times \sin 20$$

Application numérique :

$$a = \frac{5}{7} \times 9.81 \times \sin 20 = 2.396 \text{ m/s}^2$$

On intègre l'accélération deux fois pour trouver l'équation de mouvement:

$$\Rightarrow \int_0^{t_1} a \, dt = \frac{1}{2} a(t_1)^2 = d$$

On en déduit le temps t_1 :

$$\Rightarrow \sqrt{\frac{2d}{a}} = t_1$$

$$\Rightarrow \sqrt{\frac{2d}{\frac{5}{7}g \sin 20}} = t_1$$

Application numérique :

$$\sqrt{\frac{2 \times 0.069}{2.396}} = 0.24 \text{ s} = t_1$$

Maintenant nous passons à la deuxième étape où nous observons une chute libre des billes. Nous remettons t à 0.

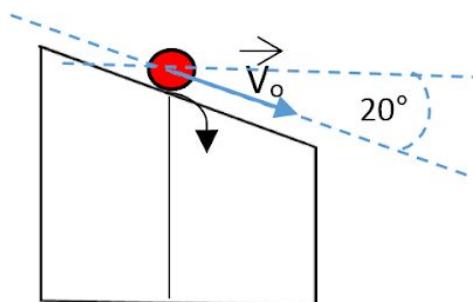


Figure 6.4.c

Equation de mouvement de chute libre :

$$y(t) = \frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t$$

Nous cherchons $t = t_2$ où $y(t_2) = h$:

$$\frac{1}{2}gt_2^2 + v_{0y}t_2 = h$$

Nous savons depuis la première étape que :

$$v_0 = a \times t_1$$

Et :

$$v_{0_y} = v_0 \sin 20 = a \times t_1 \sin 20$$

Nous réécrivons l'équation de mouvement :

$$\begin{aligned} & \Rightarrow \frac{1}{2} g t_2^2 + a \times t_1 \sin 20 t_2 = h \\ & \Rightarrow t_2^2 + \frac{a \times t_1 \sin 20 t_2}{\frac{1}{2} g} - \frac{h}{\frac{1}{2} g} = 0 \end{aligned}$$

Nous allons résoudre ce problème à l'aide d'un déterminant :

$$\Rightarrow \sqrt{\Delta} = \sqrt{\left(\frac{a \times t_1 \sin 20}{\frac{1}{2} g}\right)^2 + 4 \frac{h}{\frac{1}{2} g}}$$

Nous l'utilisons pour trouver les solutions de l'équation :

$$t_{2_1} = \frac{-\frac{a \times t_1 \sin 20}{\frac{1}{2} g} + \sqrt{\left(\frac{a \times t_1 \sin 20}{\frac{1}{2} g}\right)^2 + 4 \frac{h}{\frac{1}{2} g}}}{2}, \quad t_{2_2} = \frac{-\frac{a \times t_1 \sin 20}{\frac{1}{2} g} - \sqrt{\left(\frac{a \times t_1 \sin 20}{\frac{1}{2} g}\right)^2 + 4 \frac{h}{\frac{1}{2} g}}}{2}$$

Application numérique pour la solution plus grande :

$$t_{2_1} = -\frac{2.396 \times 0.24 \times \sin 20}{\frac{1}{2} \times 9.81} + \sqrt{\left(\frac{2.396 \times 0.24 \times \sin 20}{\frac{1}{2} \times 9.81}\right)^2 + 4 \frac{0.0462}{\frac{1}{2} \times 9.81}} = 1.866 \text{ s}$$

Avec la somme de $t_2 + t_1$ nous trouvons la durée totale sur les rails :

$$1.866 + 0.24 = 2.106 \text{ s}$$

Enfin, nous faisons la somme de 13 tours que nous devons faire avec le résultat :

$$\text{durée totale de tri} = 2.106 + 12.87 = 14.976 \text{ s}$$

6.4.Rendement

Notre mécanisme comporte deux roulements à bille, une fois pour la réception des billes, et une deuxième fois lors du tri des billes avec $\eta_{roulement} = 0.99$, or nous avons 4 roulements à bille.

En plus, nous trouvons que pour la Croix de Malte, nous avons comme rendement $\eta_{Croix de Malte} = 0.6$.

On a donc :

$$\eta_{trieur de billes} = (\eta_{roulement})^4 \cdot \eta_{Croix de Malte}$$

Soit :

$$\eta_{trieur de billes} = 0.58$$

7. Critique de la machine

Pour concevoir un bon trieur de billes, nous avons considéré des différentes approches pour chacun des trois sous-systèmes que nous avons définis pour notre machine : réception des billes dans la machine, tri des billes, et enfin collecte des billes. Pendant une longue période, nous nous sommes préoccupés de l'étude des différentes options qui nous permettront de réaliser la machine la plus efficace possible. Après des longs débats, nous avons pu choisir le design final de notre machine que nous avons présenté ci-dessus. Néanmoins, cette partie de conception nous a pris beaucoup de temps, ainsi, nous n'avons pas eu un temps suffisant pour pouvoir développer au mieux nos études sur le bon fonctionnement de la machine. C'est pourquoi, nous nous profitons de cette partie pour mentionner tous les détails que nous n'avons pu réalisés. Dans ce but, nous allons examiner l'efficacité et la sécurité de notre machine.

Efficacité

Pour maximiser l'efficacité de notre machine, nous avons implémenté plusieurs rails en parallèle afin de trier les billes plus rapidement. Nous avons trouvé que 33 rails est le choix optimal pour que notre machine soit à la fois efficace et pas très grande. Néanmoins, nous aurions dû changer le sens de rotation du cylindre. Cela nous aurait réduit le temps de tri des billes en diminuant le nombre de tours de la manivelle.

Sécurité

Nous avions de longs débats concernant l'usage de la Croix de Malte, ou d'un engrenage simple. Vu que chacun des deux mécanismes représente ses avantages et ses inconvénients comme nous l'avons expliqué dans la partie 6.3, nous avons choisi d'implémenter la Croix de Malte dans notre machine. En effet, ce mécanisme laisse plus de liberté à l'utilisateur de tourner la manivelle à la vitesse qu'il préfère. Cela ne va endommager ni la machine, ni le système d'engrenages, puisque la Croix de Malte offre la possibilité d'élargir le domaine des vitesses angulaires de la roue menée tout en limitant le cycle de rotation que le cylindre peut faire. Or, après avoir calculé le rendement de la Croix de Malte et ensuite celui de la machine, nous nous sommes rendu compte que l'implémentation de la Croix de Malte a diminué d'une manière remarquable l'efficacité de la machine.

Cependant, nous aurions dû approfondir nos études sur le choix de matériaux et le dimensionnement des différentes pièces de la machine, en examinant les cas où celles-ci seront soumises à des éventuelles contraintes.

Conclusion

Finalement, nous pouvons répondre aux différents critères spécifiés dans le cahier des charges. La machine utilise la manivelle comme la seule source d'énergie. De plus, le fonctionnement de notre machine est indépendant du type de matériaux des billes.

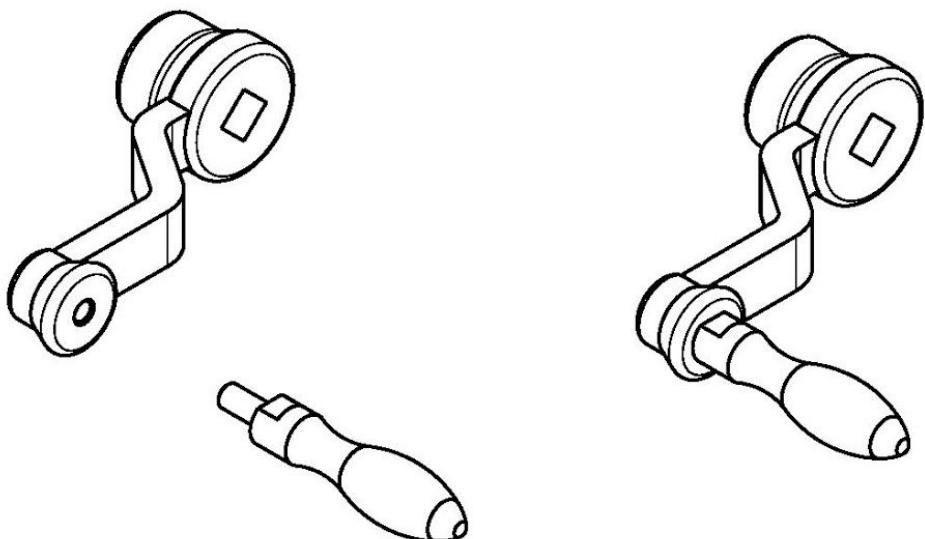
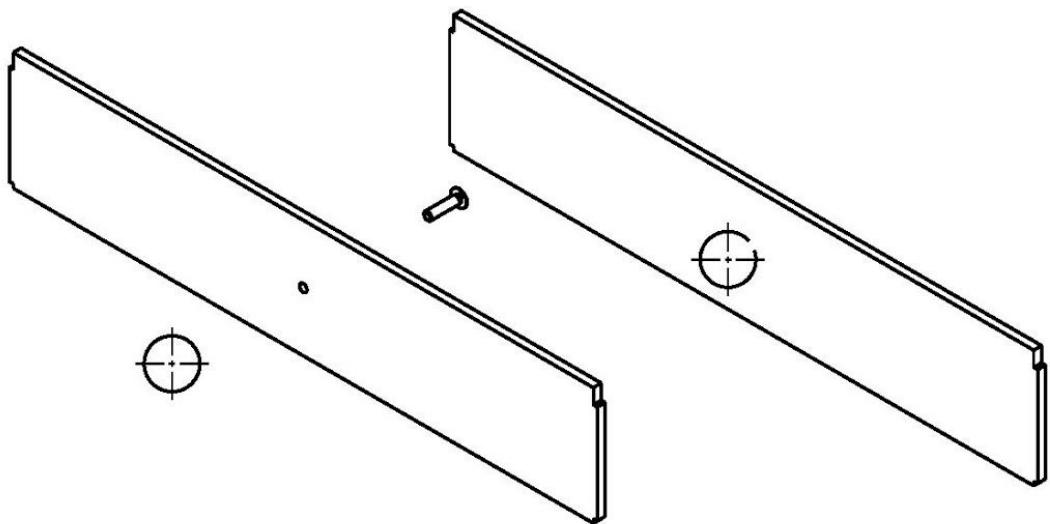
En effet, elle est capable d'accepter 300 billes de trois tailles différentes : 5, 6, et 7 mm. Le système de rails établi permet aux billes un arrangement précis en file, grâce aux rails triangulaires, avant d'être envoyées vers le système de tri. Ainsi, la machine est capable de trier et séparer les billes afin de les récupérer pour un futur usage. Ensuite, les rails à plusieurs segments d'arrêt assure un tri spécifique uniquement à la taille de la bille , puisqu'elle utilise le diamètre des billes comme paramètre de tri.

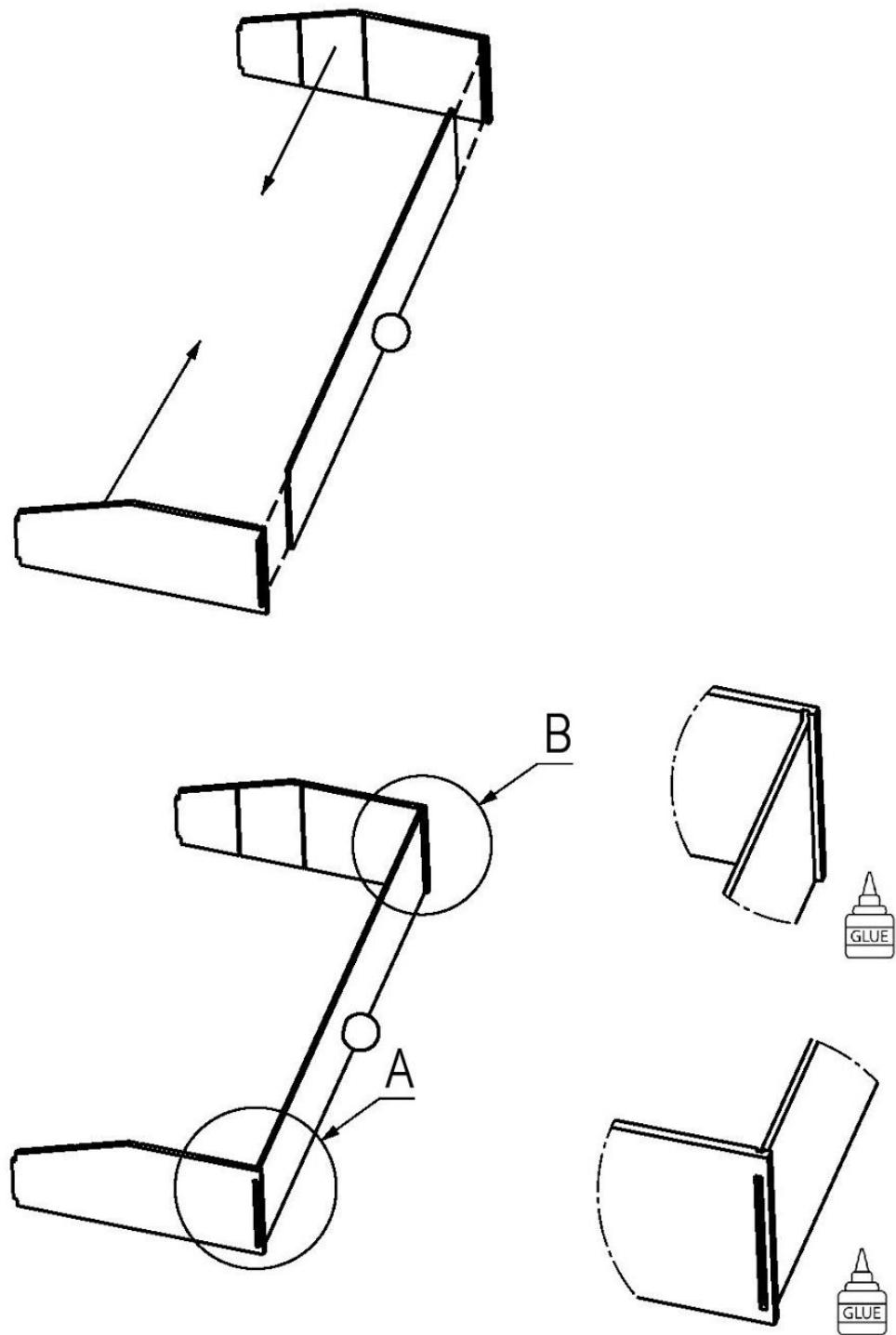
De plus , notre machine est résistante aux contraintes qui peuvent s'imposer en cas de billes lourdes, grâce au choix de matériaux que nous avons fait . Aussi, les surfaces de la machine sont bien tolérées pour ne pas endommager certains types de billes en respectant les rugosités de nos pièces.

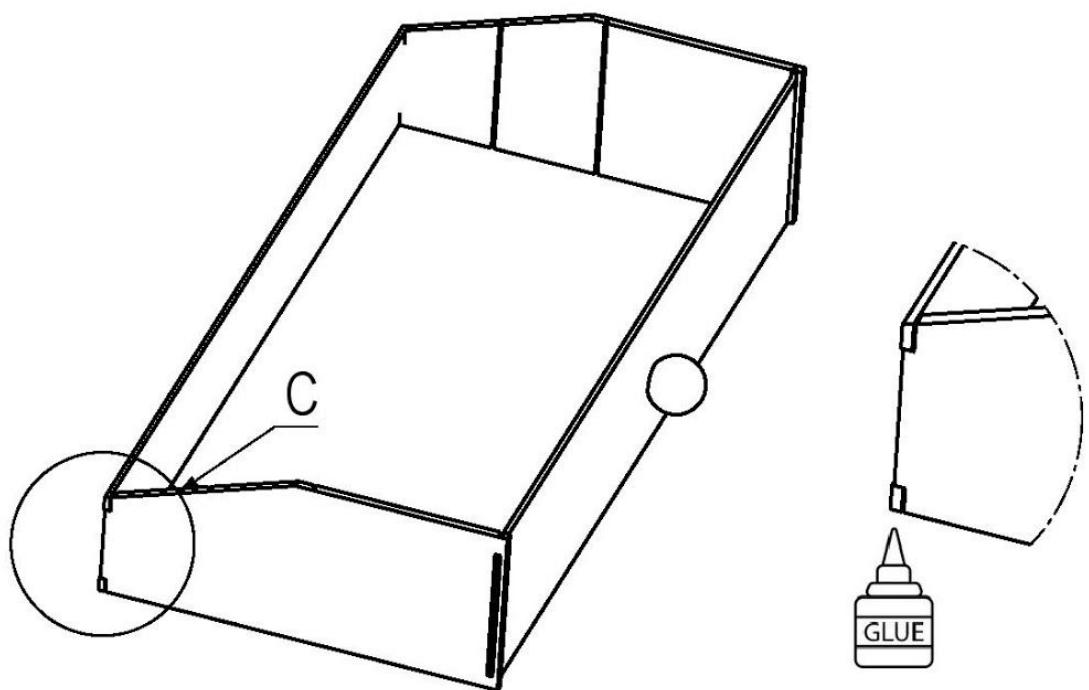
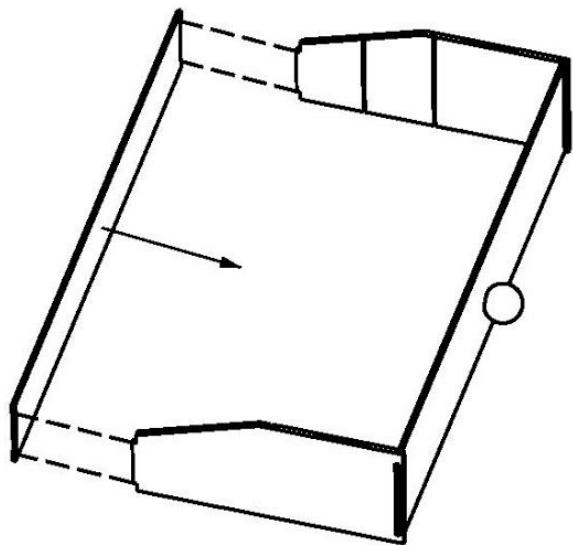
De même, la machine prévoit de ne pas changer la qualité des billes en prenons en compte les diamètres limites de nos billes. De plus tous les matériaux utilisés pour la construction de cette machine sont ceux habituellement rencontrés dans les ateliers de mécanique et de construction, et nos pièces n'est sont pas obtenues par impression 3D, pliage, soudage, injection, ou formage à chaud.

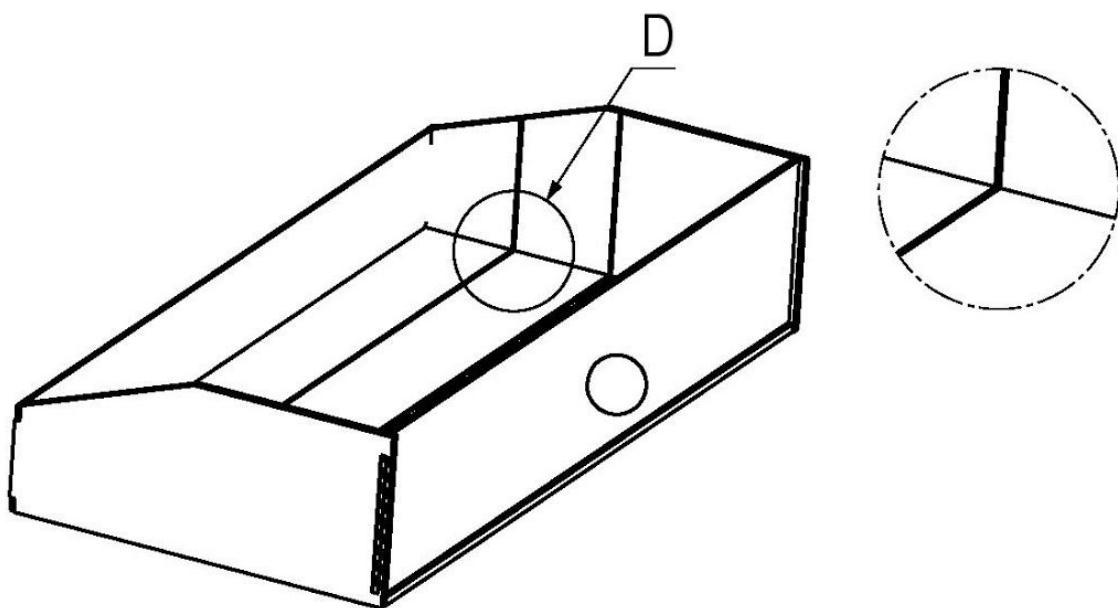
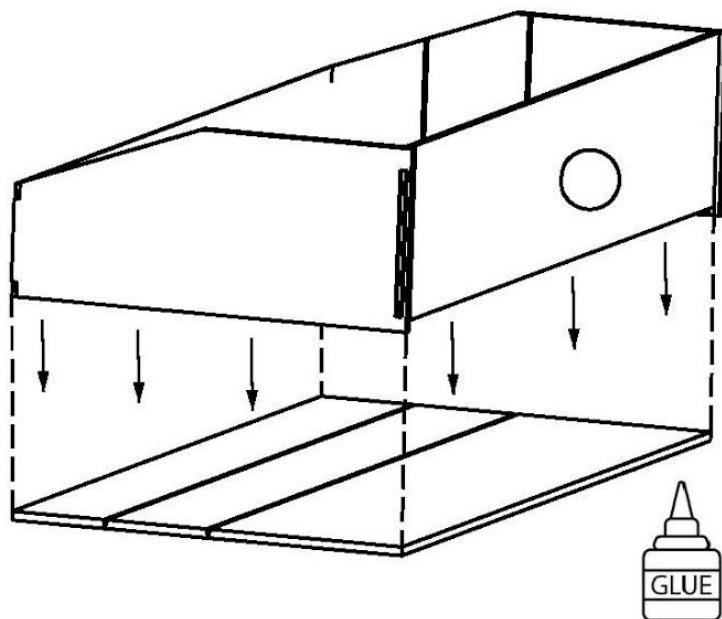
Finalement tous nos éléments d'assemblage respectent le diamètre minimal de 4 mm.

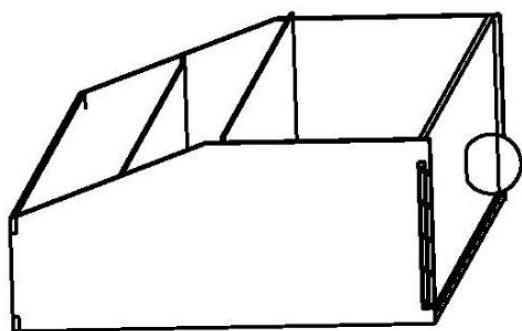
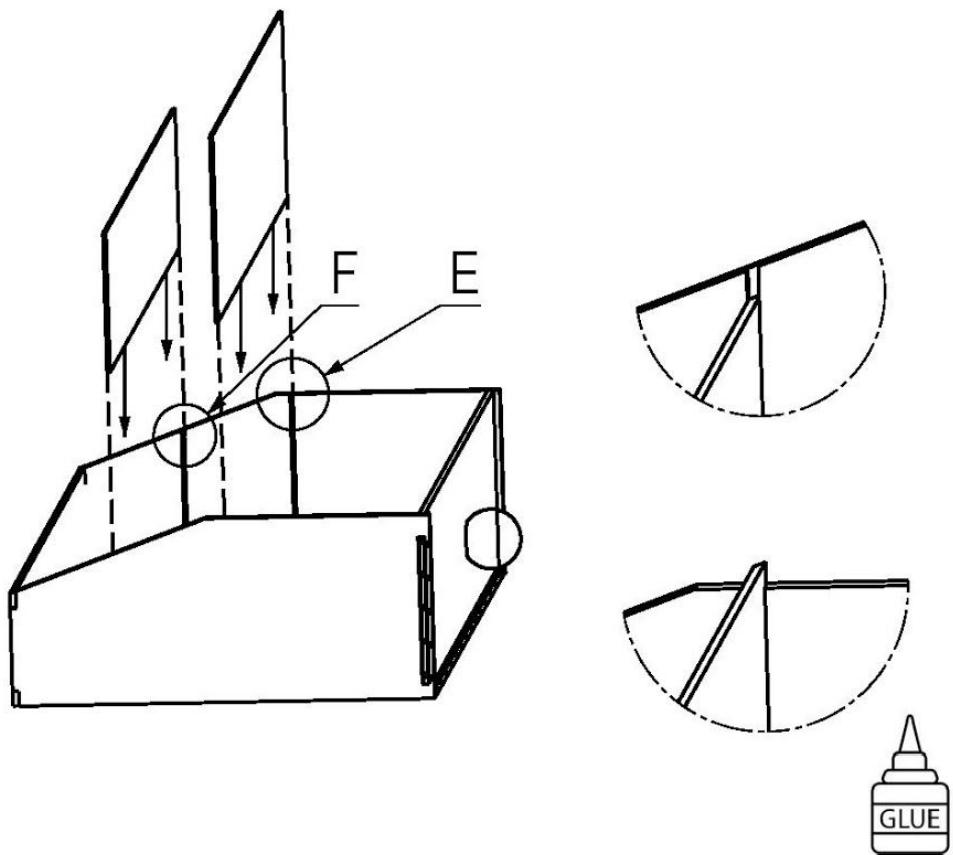
Manuel d'assemblage



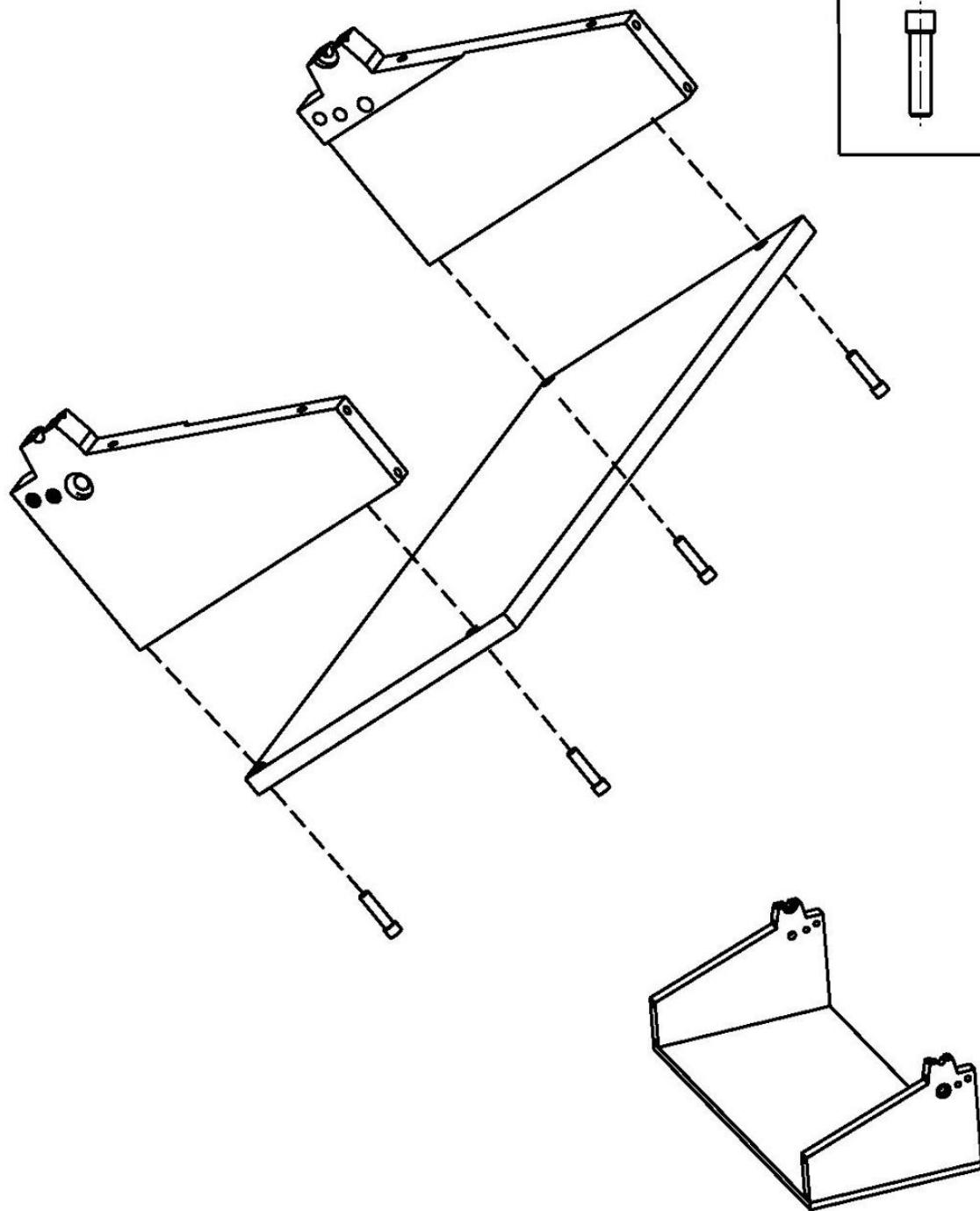
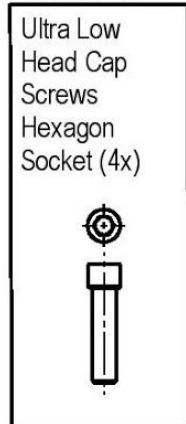


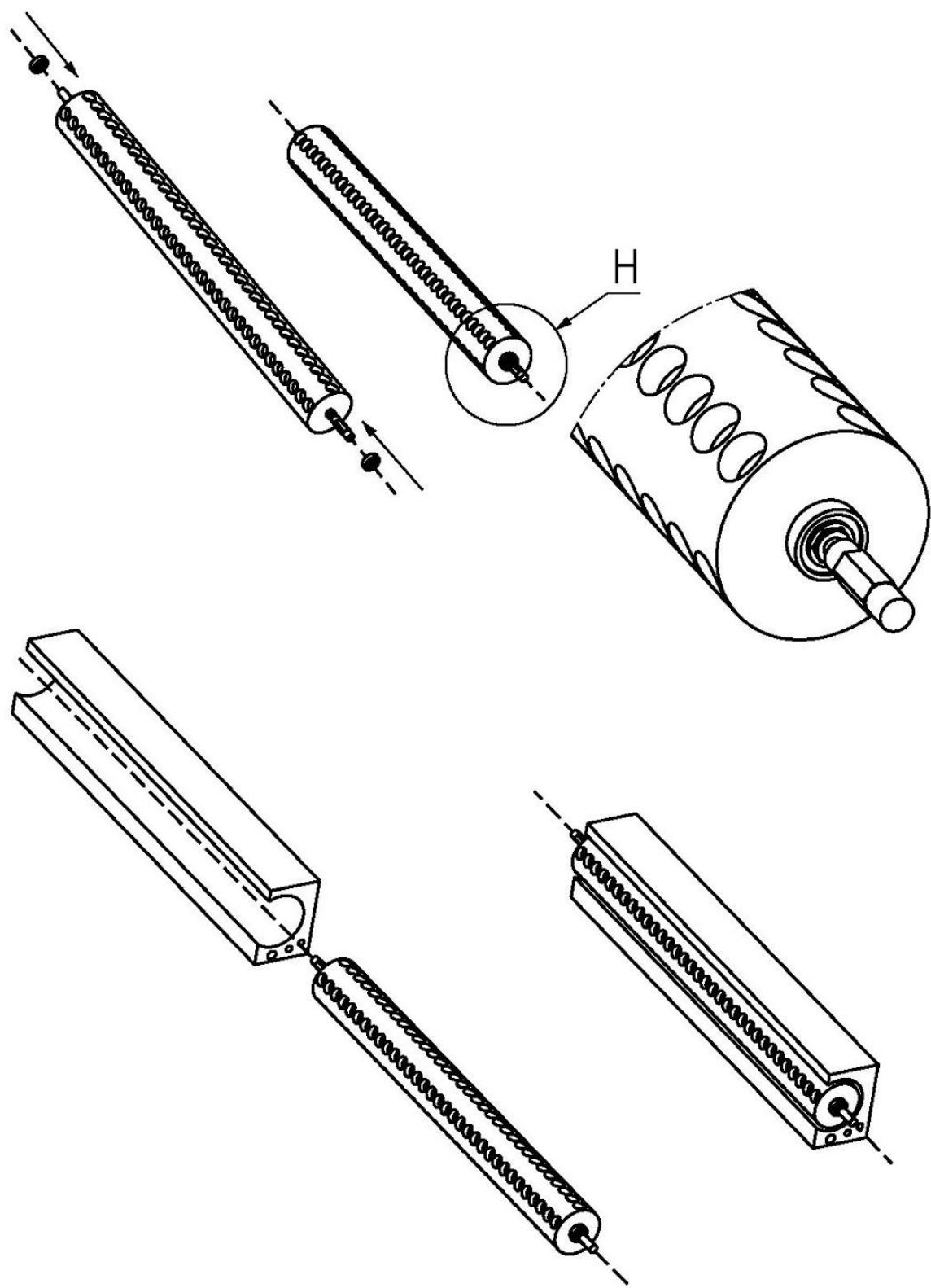


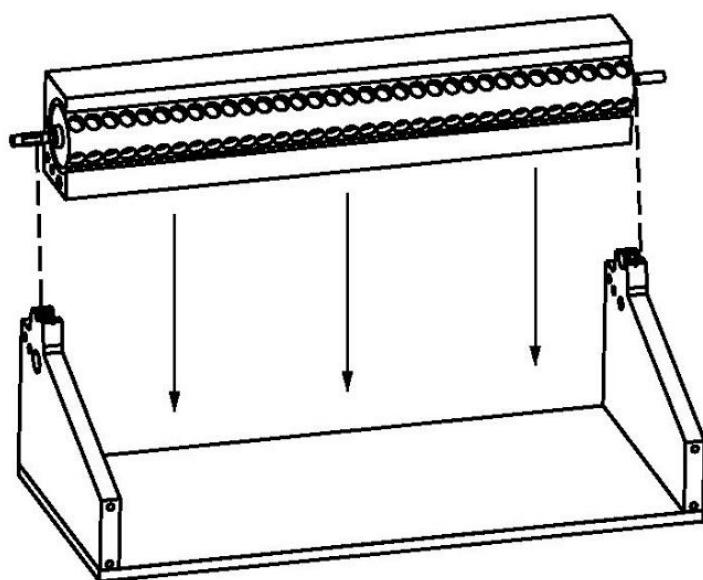




Echelle 1:1

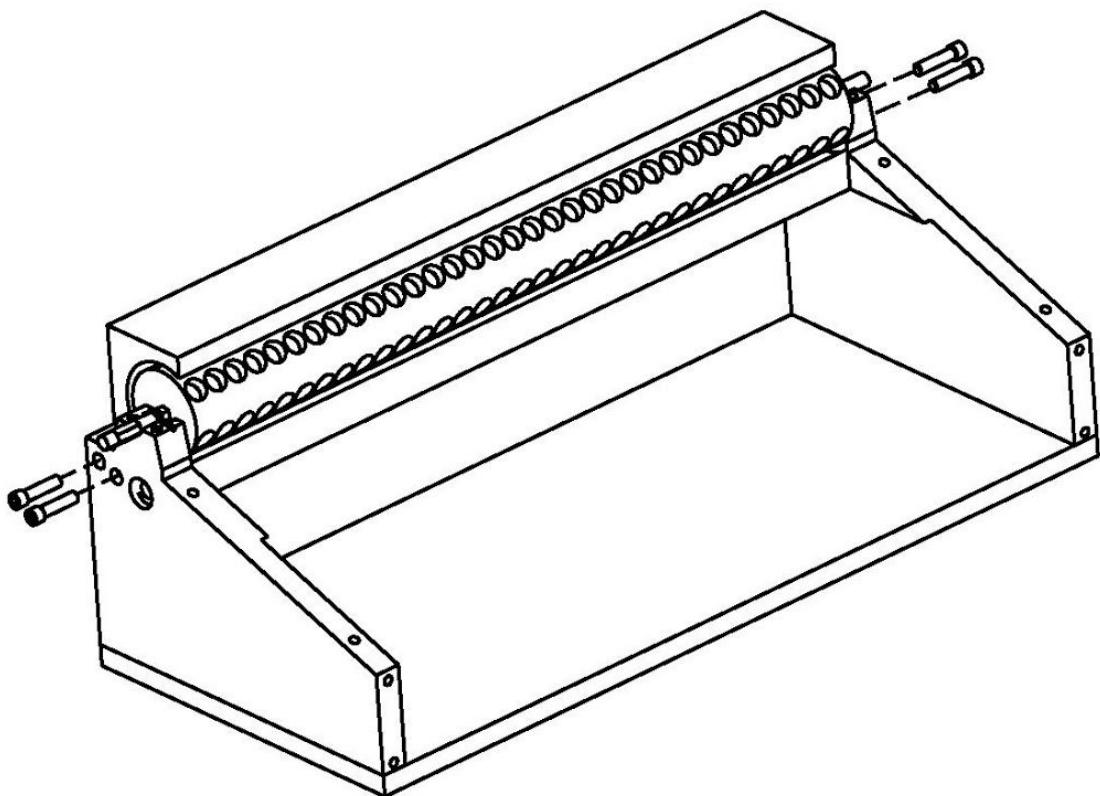


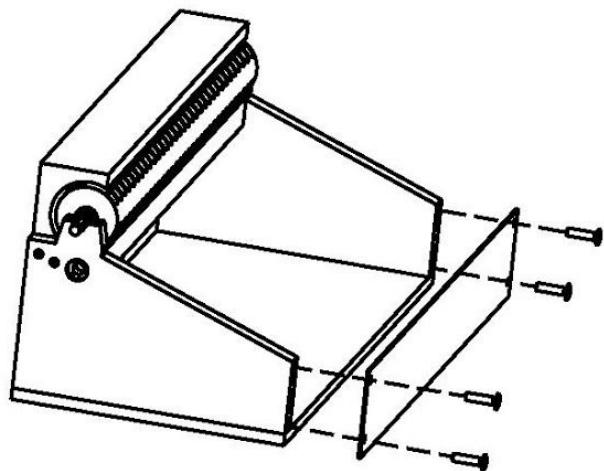




Echelle 1:1

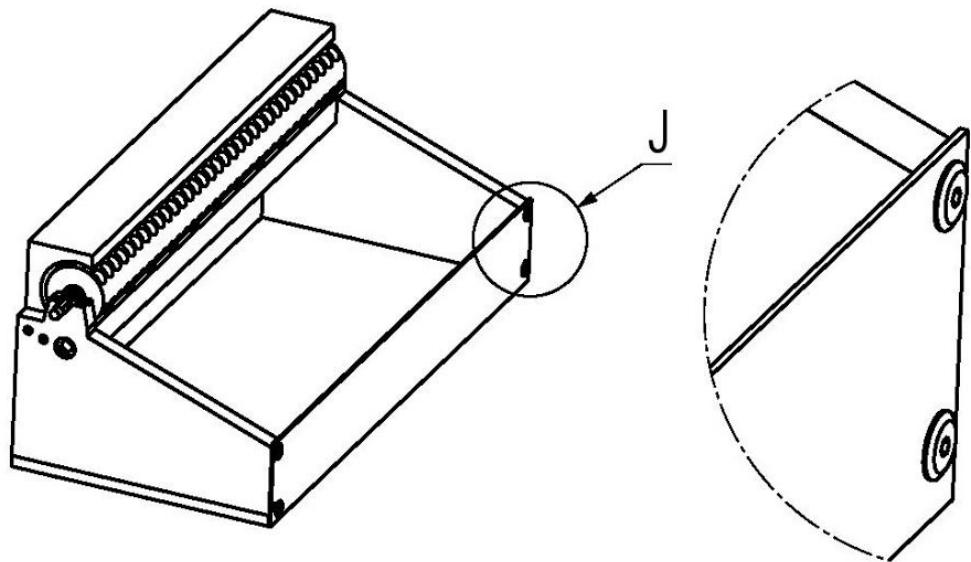
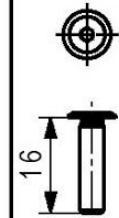
Ultra Low
Head Cap
Screws
Hexagon
Socket (4x)





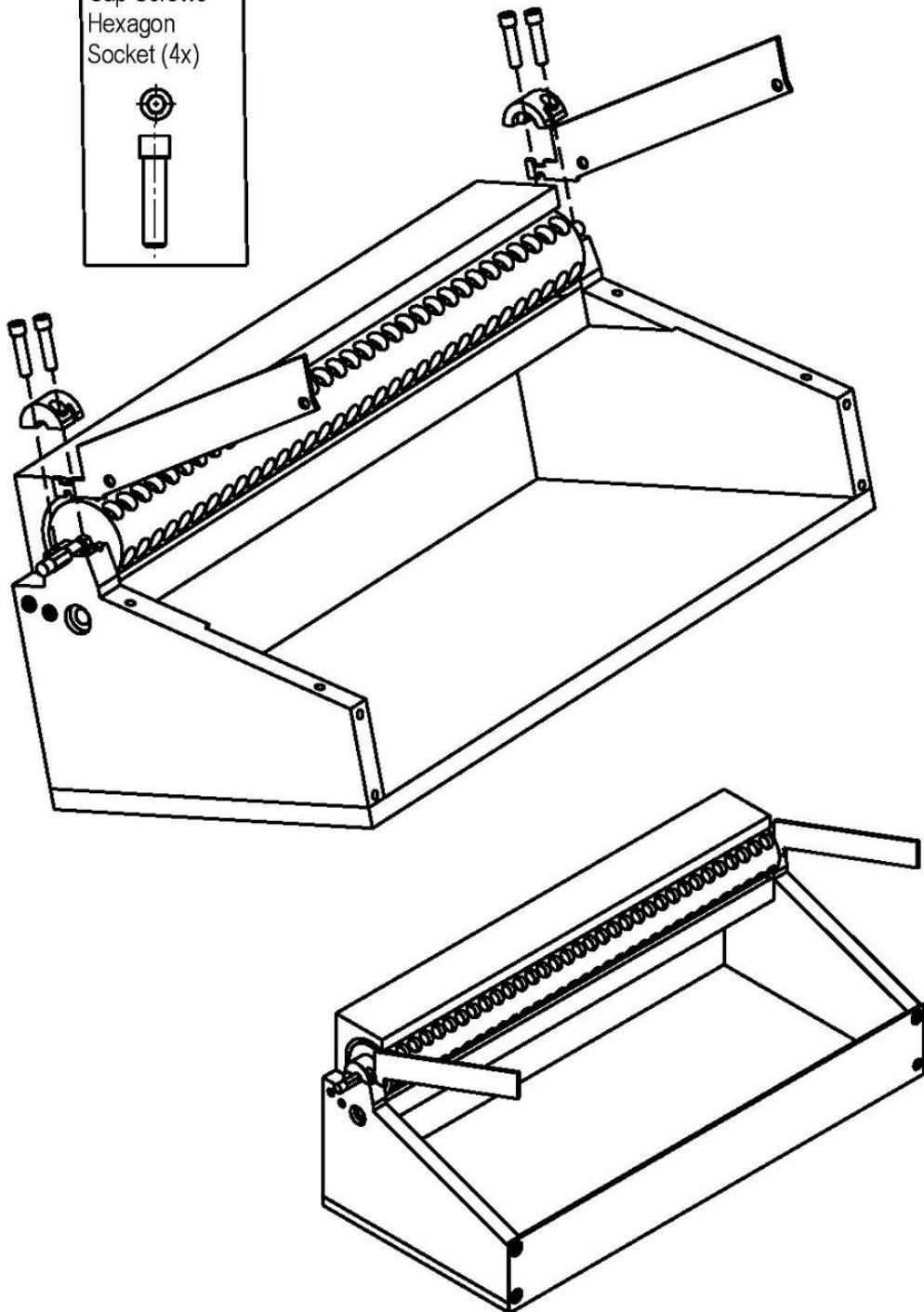
Echelle 1:1

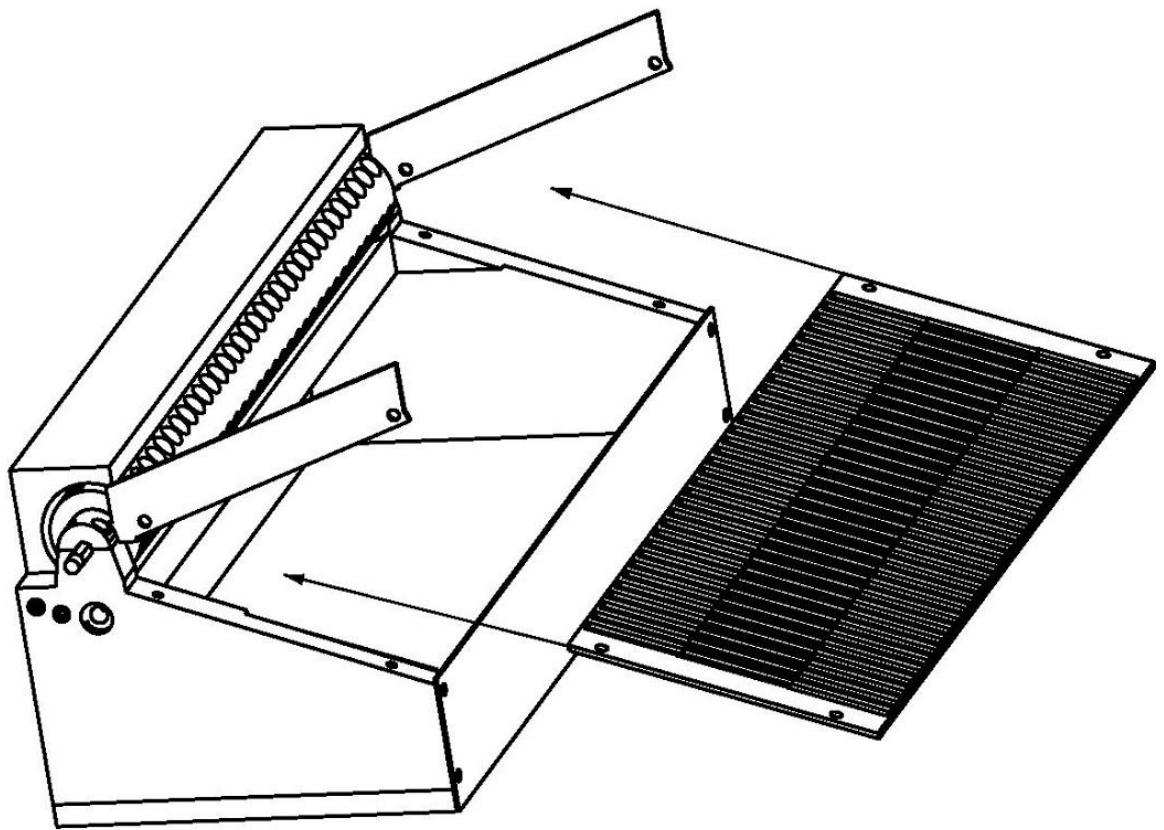
4x Ultra Low
Cap Screws

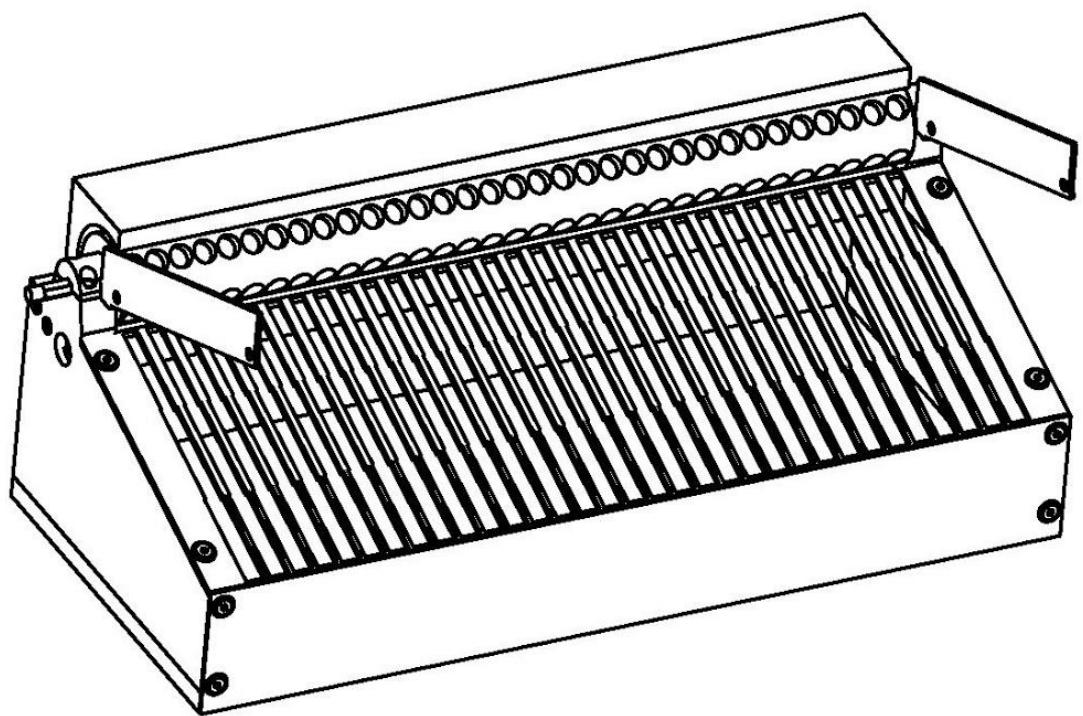
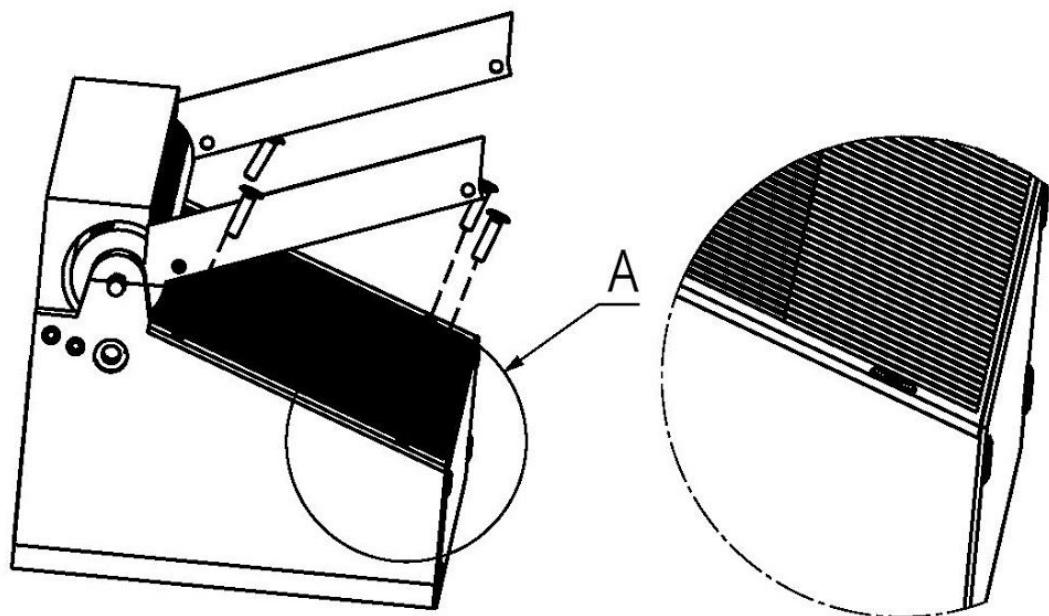


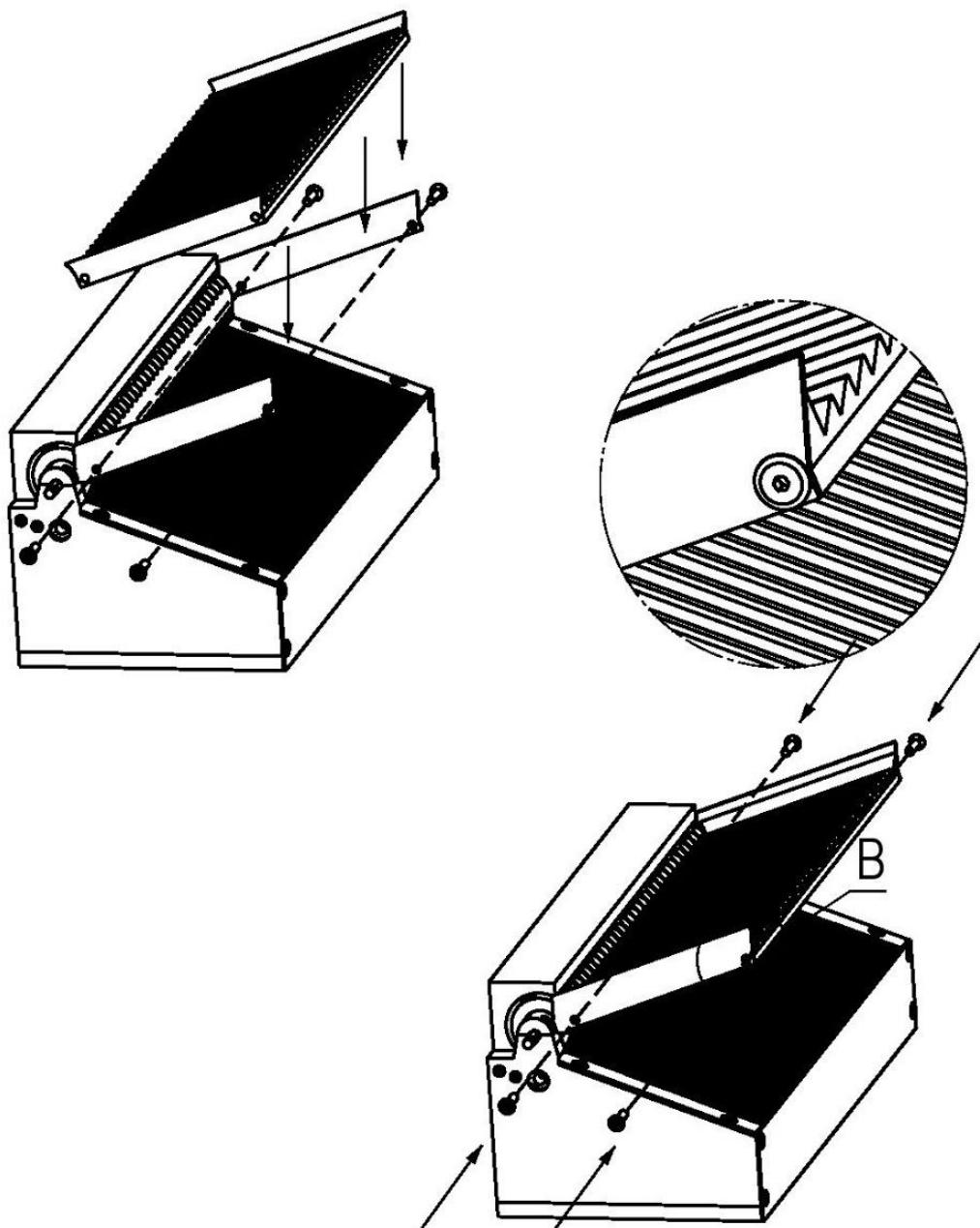
Echelle 1:1

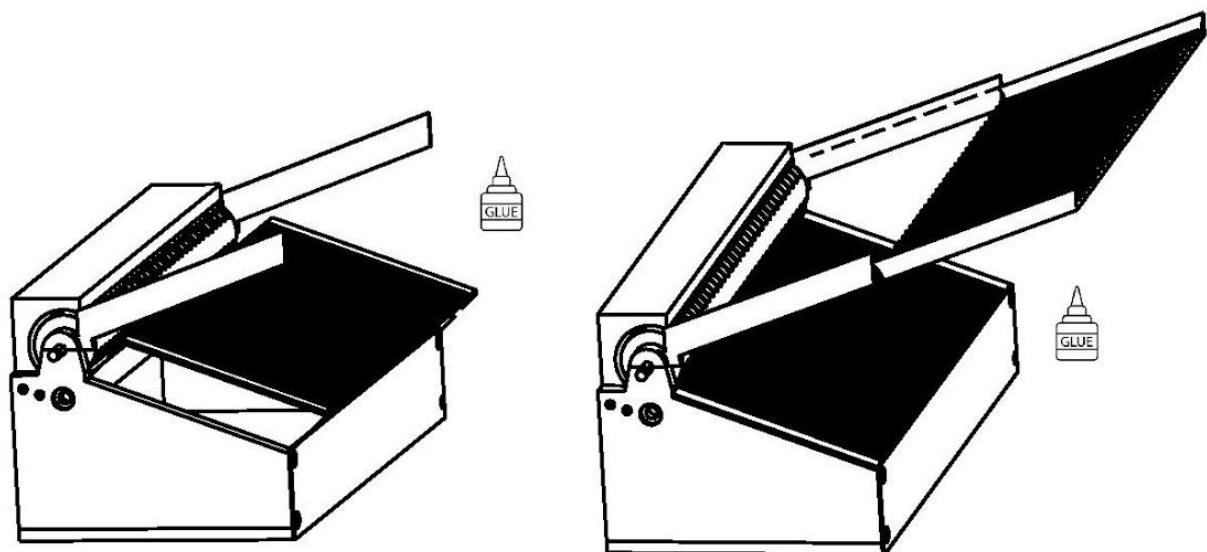
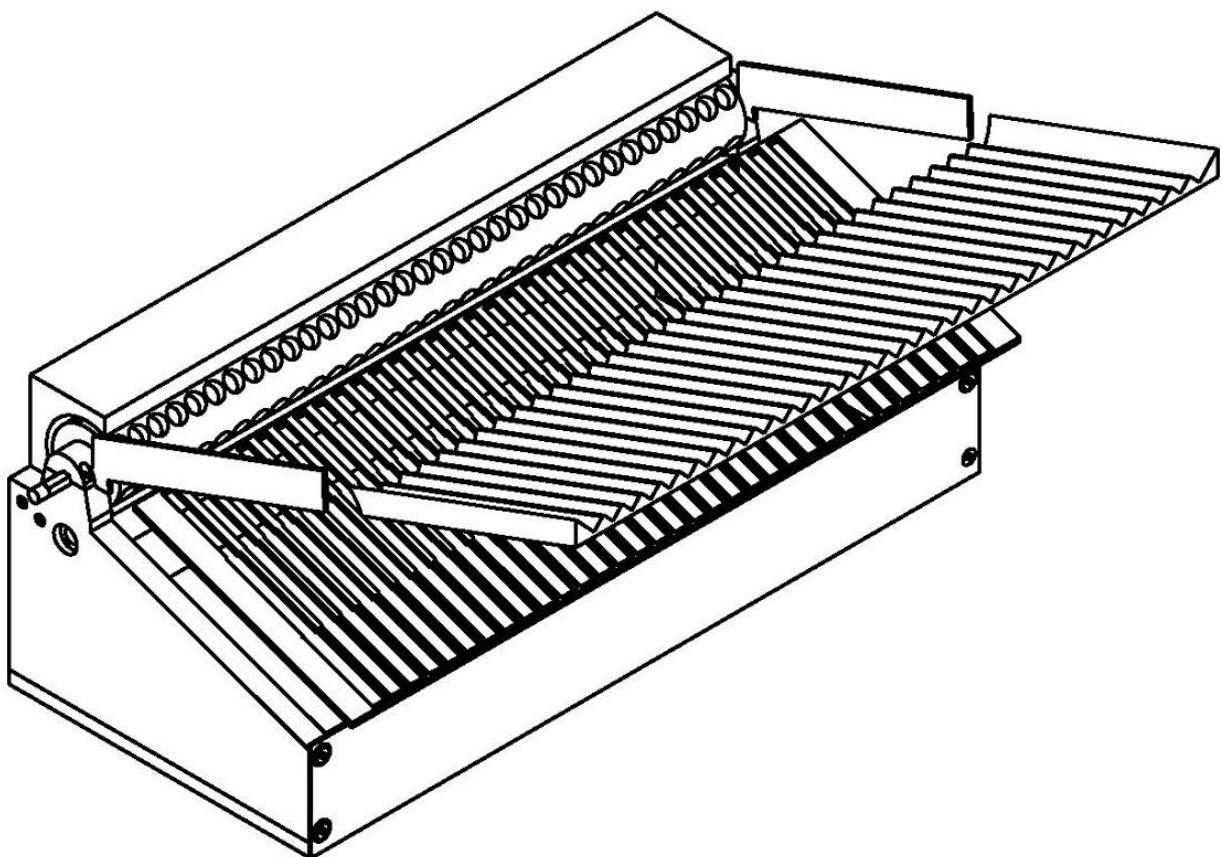
Ultra Low Head
Cap Screws
Hexagon
Socket (4x)

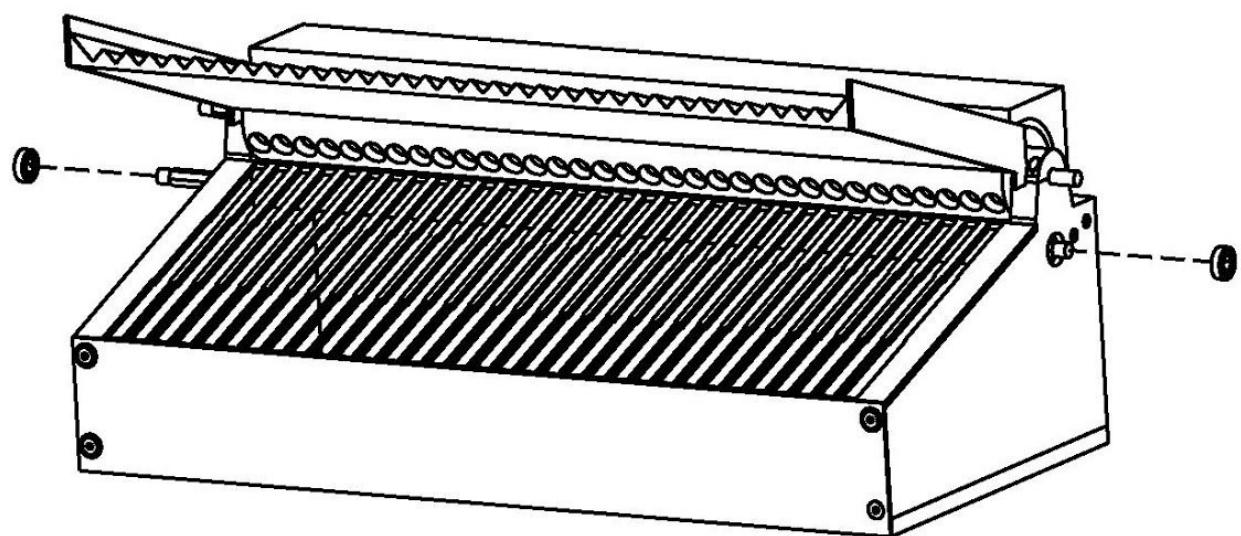
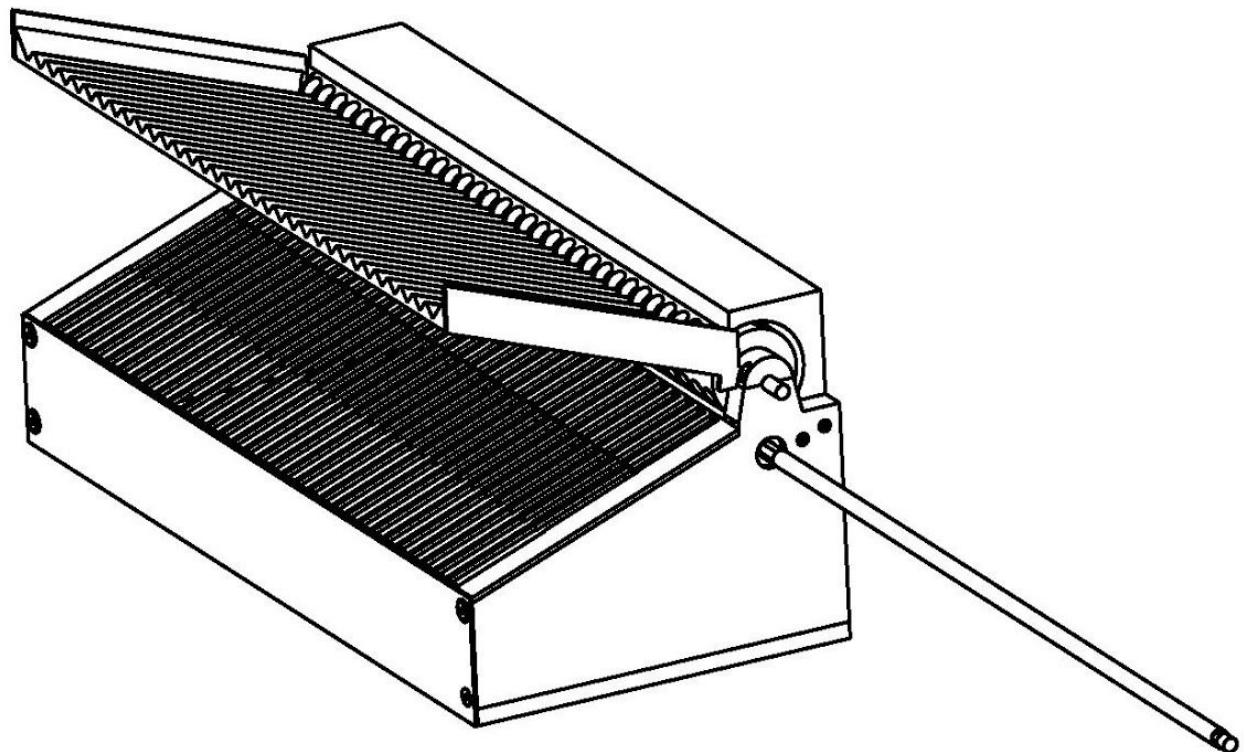


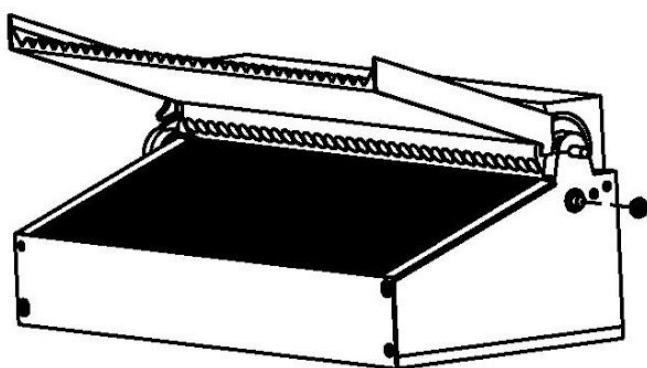
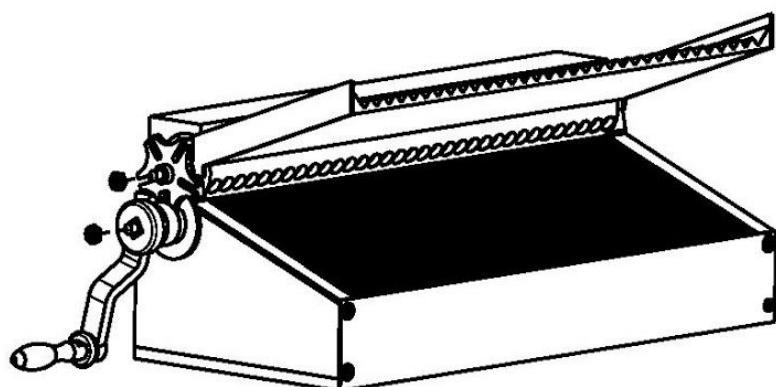
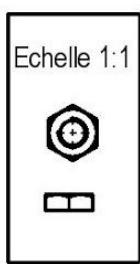
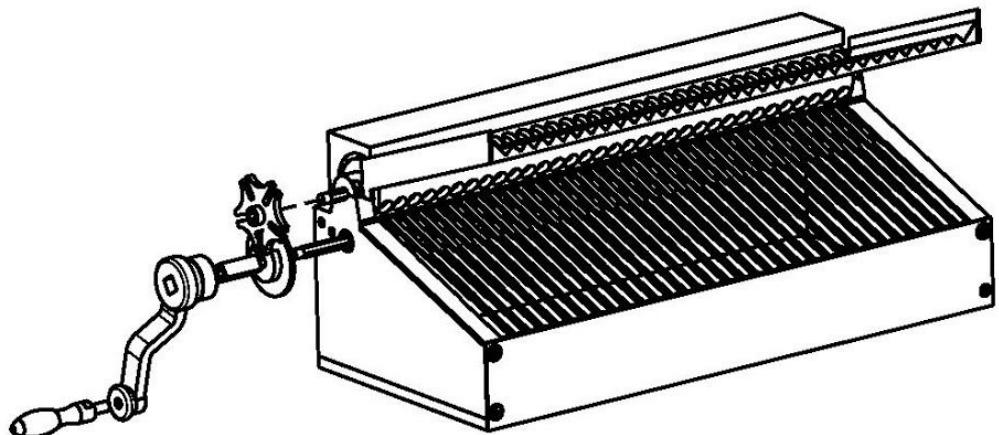








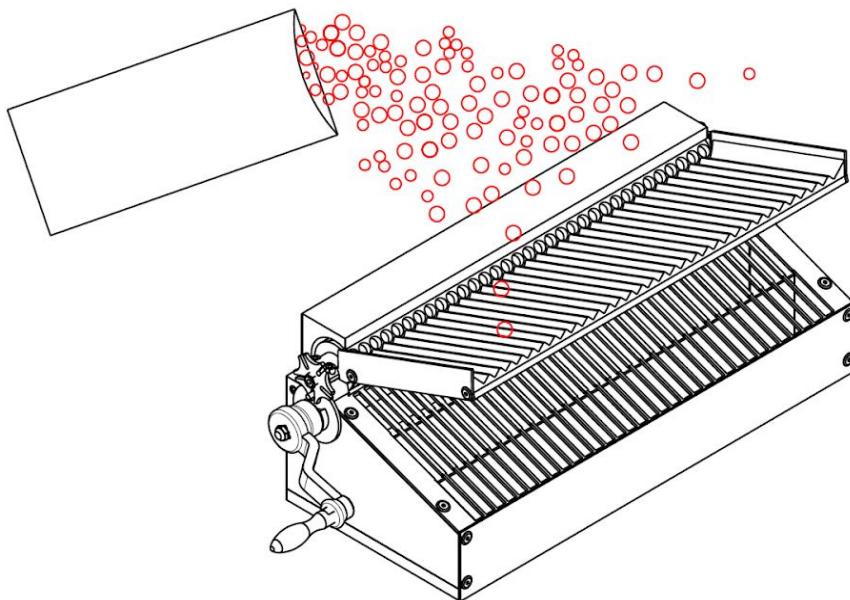




Mode d'emploi

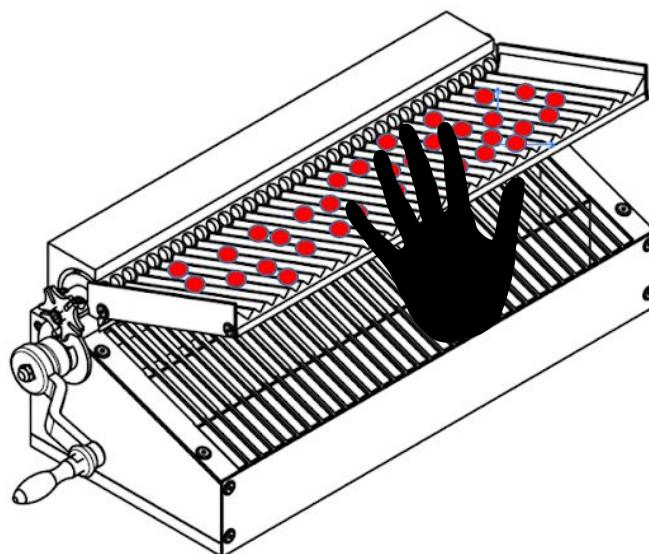
1. Déposer les billes

Déposer les billes dans les railles de réception



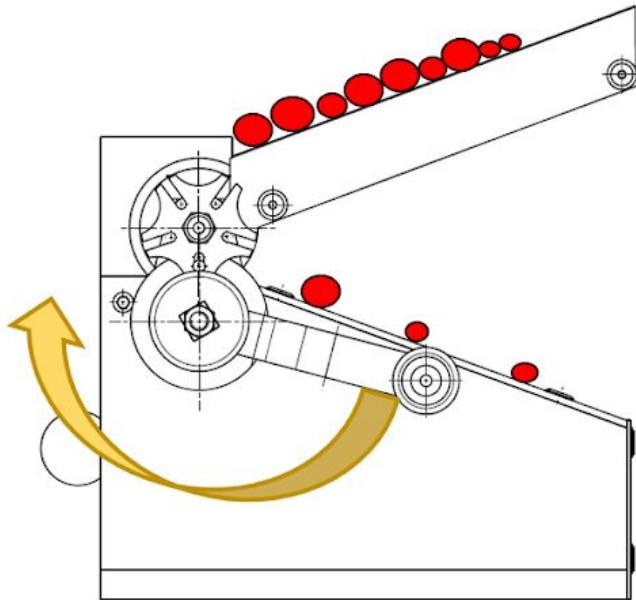
2. Homogeniser leur répartition

Pour un temps de trie optimum homogénéiser la répartition de billes sur chaque railles.



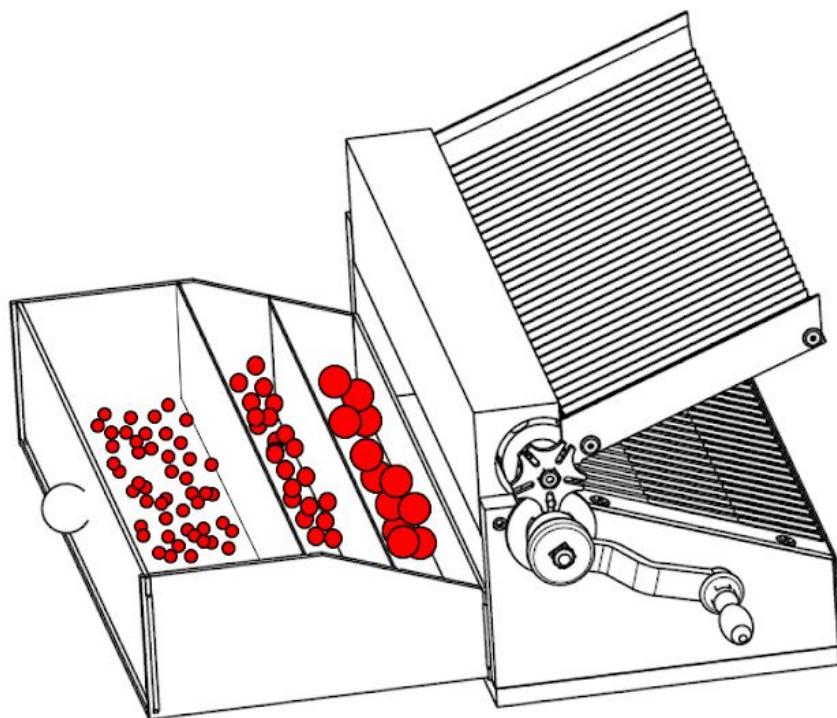
3. Tourner la manivelle

Tourner la manivelle avec un jusqu'à toute les billes sont triés.



4. Collection des billes

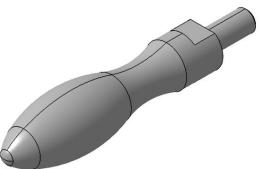
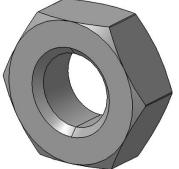
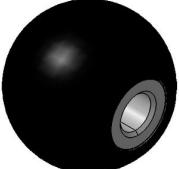
La collection de billes se fait à partir en tirant le tiroir ou se trouve chaque bille de différente taille.

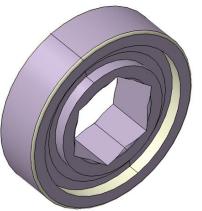
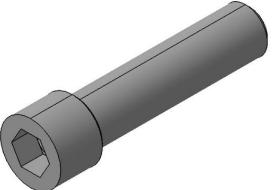


Catalogue de pièces

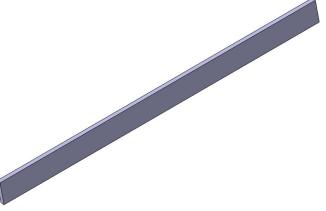
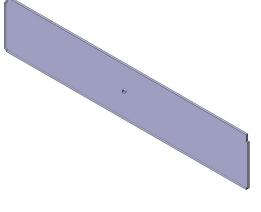
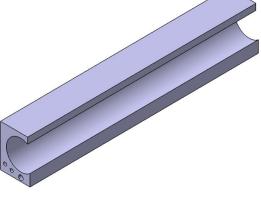
#	Nom de la pièce	Nombre	Densité [kg . m ⁻³]	Volume total [m ³]	Masse totale [kg]	Illustration
---	-----------------	--------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------	--------------

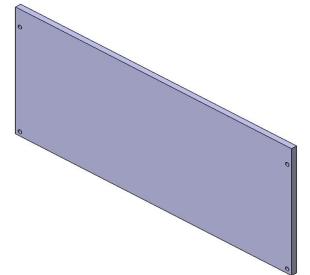
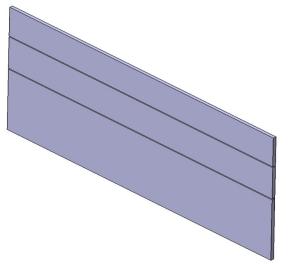
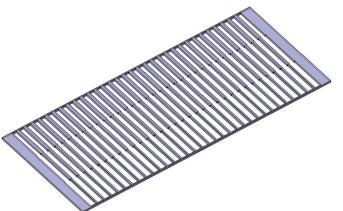
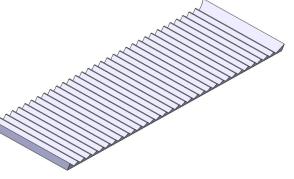
Pièces obtenues par Misumi

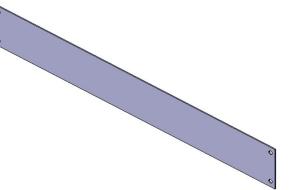
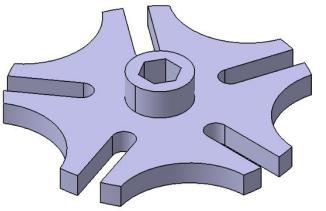
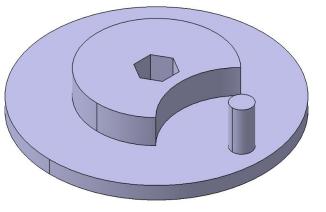
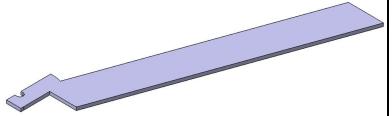
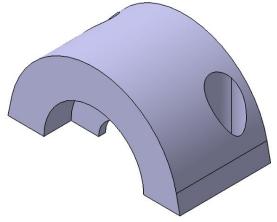
1	Main de la manivelle	1	7155	4.081 e-006	0.004	
2	Manivelle	1	7155	1.474 e-005	0.101	
3	Écrou hexagonal similaire DIN 439 / similaire DIN 934	3	7700	1.117e-007	0.0008	
4	Vis d'assemblage à tête ultra basse/six pans creux	5	7700	2.265 e-007	0.001	
5	<i>Knob</i> Boutons sphériques - Résine similaire DIN 319	1	2640	3.788 e-006	0.010	

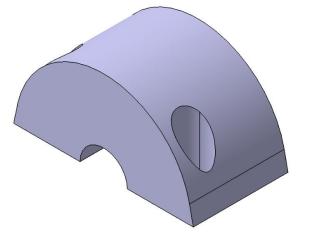
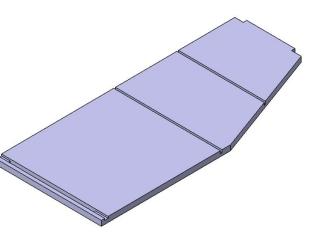
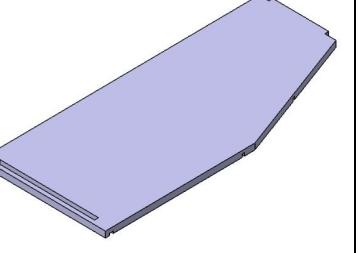
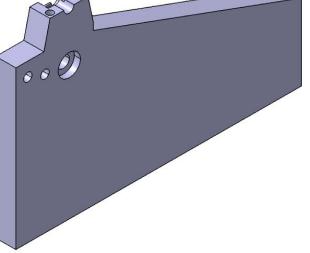
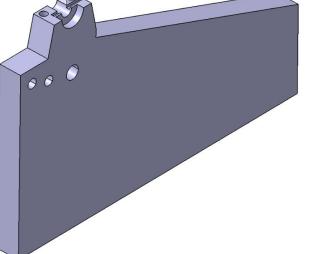
6	Roulement à bille	4	7900	1.837 e-007	0.001	
7	Vis d'assemblage à petite tête	8	7900	2.771 e-007	0.002	

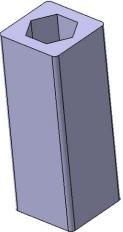
Pièces construites manuellement

9	-Axis	1	7900	9.93e-006	0.078	
10	Back ramp	1	2700	3.608	0.041	
11	Back drawer	1	7900	3.608e-005	0.285	
12	Back wall	1	2700	3.125 e-004	0.844	

13	Bottom	1	2700	3.683 e-004	0.994	
14	Bottom drawer	1	2700	1.243 e-004	0.336	
15	Lower Ramp	1	7900	2.468 e-005	0.195	
16	Cylindre	1	2700	2.034e-004	0.549	
17	Feeding Ramp	1	2700	2.78 e-004	0.751	

18	Front Drawer	1	2700	2.322 e-005	0.063	
19	Front Wall	1	7900	1.558 e-005	0.123	
20	Geneva star	1	7900	1.216e-006	0.01	
21	Geneva Wheel	1	7900	3.367 e-006	0.027	
22	Latch	2	7900	3.623e-006	0.029	
23	Left Cap	1	7900	1.187e-006	0.009	

24	Right Cap	1	7900	1.187e-006	0.009	
25	Left Drawer	1	7900	2.377 e-005	0.0.187	
26	Right Drawer	1	7900	2.371 e-005	0.187	
27	Left Wall	1	2700	9.35 e-005	0.252	
28	Right Wall	1	2700	9.35 e-005	0.252	

29	Small Slide	1	7900	1.427e-005	0.113	
30	Large Slide	1	7900	1.816e-005	0.143	
31	Adapter	1	7900	9.27 e-007	0.007	

Liste des pièces achetées

#	Nom de la pièce	Nombre	Fournisseur	Référence du fournisseur
---	-----------------	--------	-------------	--------------------------

1	Manivelle	1	Misumi	NOCH8
2	Boutons sphériques - Résine similaire DIN 319	1	Misumi	PCA6-20-B
3	Écrou hexagonal similaire DIN 439 / similaire DIN 934	3	Misumi	SKNTR5
6	Vis d'assemblage à tête ultra basse/six pans creux	12	Misumi	CBSTR4-16
7	Roulement à billes	4	Misumi	F-685
9	Vis d'assemblage à petite tête	12	Misumi	SBBSS4-16

Pièces spéciales usine :

Matériaux	Fournisseur	Lien
Aluminium	Allega	http://www.allega.ch/
Colle spéciale métal	Loctite	http://www.loctiteproducts.com/p/6/31/cntct_osns/overview/Loctite-Stik'n-Seal-Outdoor-Adhesive.htm
Acier	Cantin	https://www.cantin.ch/fraisage-cnc-en-mecanique-industrielle/

Masse et volume du produit final

	Masse totale	Volume total
Produit final	5.503 kg	0.002 m³