

Livrable

Projet fil rouge - Ouverture

Rapport technique

Alexandre RAFFIN | Raphaël MAUL | Mamalinesso BAKAI | Carl MENSAH
10/12/2025

1. Cahier des Charges – Contraintes

Contexte :

Dans le cadre du projet d'ouverture en 1^{ère} année d'école d'ingénieur à Polytech Dijon nous devons concevoir un strandbeest, inspiré par le mécanisme de Jansen. Cela nous permettra d'en apprendre plus sur la conception mécanique et la fabrication additive.

Fonction principale attendue :

Le strandbeest doit être capable d'avancer de manière autonome et stable grâce à un système d'entraînement mécanique.

Contraintes :

Aucune électronique ne doit être utilisée.

Les pièces principales du strandbeest doivent être créées en CAO uniquement et les pièces complémentaires sont autorisées si elles sont justifiées.

Optimiser les coûts de fabrication pour minimiser le budget. Inférieur à 100 €.

Le strandbeest doit être réalisé avec une échelle minimaliste soit environ 30 cm d'envergure.

Le strandbeest doit être capable d'avancer sur un sol plat sans qu'aucune des pièces ne se casse.

Critères d'évaluation :

Le strandbeest doit parcourir au minimum 30 cm sur sol plat.

Le strandbeest doit parcourir les 30 cm en environ 10 secondes

Le strandbeest doit être stable.

Le mécanisme devra réaliser un cycle de marche complet sans blocage.

Livrables attendus :

- Fichiers CAO fournis au format STL pour impression 3D.
- Fichiers Imprimables
- Simulation, résultats + captures vidéo

- Matériel + prix
- Strandbeest assemblé et fonctionnel
- Vidéo de démo
- Diapo

2. Étude du mécanisme de Jansen

Le mécanisme de Jansen, inventé par l'artiste et ingénieur néerlandais Theo Jansen, est à la base du mouvement du célèbre strandbeest . L'objectif de Jansen était de créer une structure mécanique capable de marcher de manière fluide et stable grâce à un simple mouvement rotatif et sans aucune électronique à l'intérieur. Pour cela, il a développé un système de pattes articulées dont les dimensions sont calculées avec une grande précision.

Principe général :

Le mécanisme repose sur la conversion d'un mouvement circulaire en un mouvement alternatif des pattes. Chacune des différentes pattes est constituée de plusieurs tiges rigides reliées par des entretoises. De ce fait, lorsque l'axe tourne, les articulations suivent une trajectoire spécifique qui reproduit la marche.

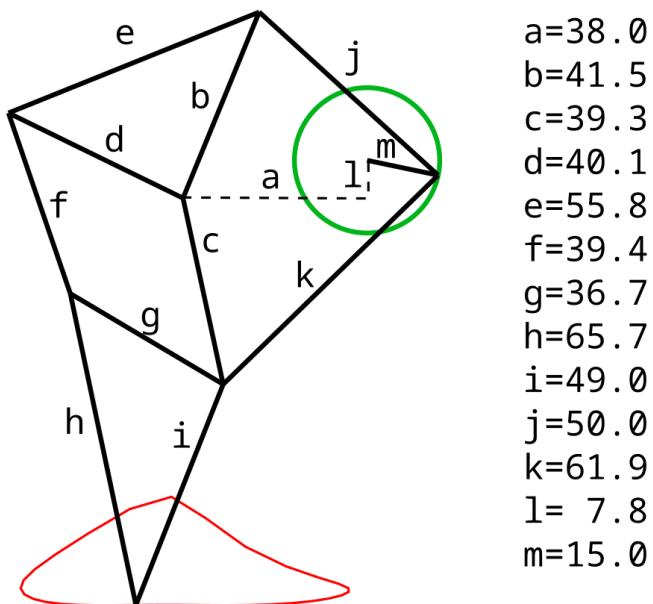
L'idée essentielle est que la trajectoire de la patte doit suivre un mouvement plat et régulier : la patte doit rester presque horizontal pendant la phase d'appui au sol, puis se relever pour passer à la phase de retour. Cela permet au strandbeest d'avancer sans trop d'oscillations et par conséquent, d'avoir une bonne stabilité.

Le théorème de Jansen :

Theo Jansen pour aboutir à ses recherches est donc passé par des expérimentations et de nombreuses modélisations, pour réussir à obtenir un ensemble optimal de longueurs pour les tiges de chaque patte. Par conséquent, il a fini par déterminer 13 longueurs spécifiques (nommées A à M) qui permettent d'obtenir un mouvement fluide et efficace.

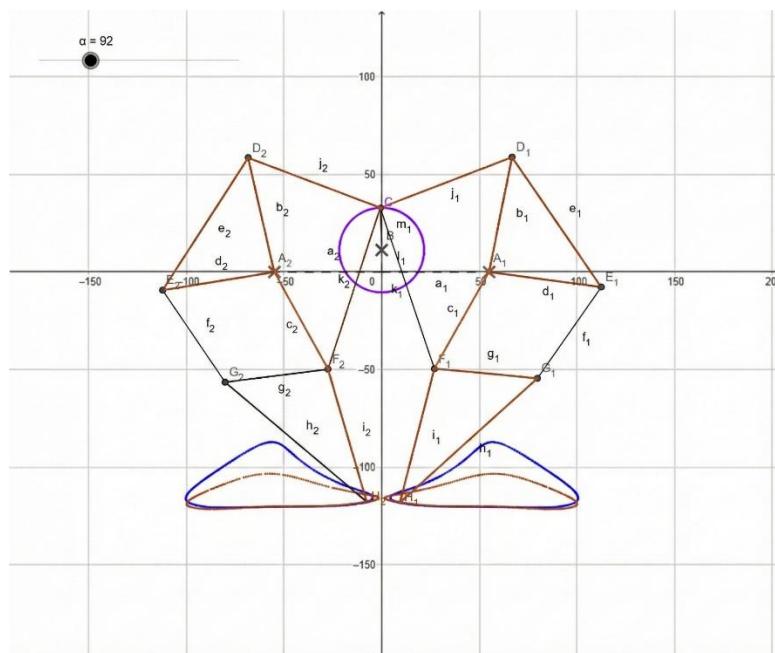
Mais, ces longueurs ne respectent en aucun cas un théorème d'un point de vue mathématique, car il a utilisé un modèle géométrique empirique pour définir la cinématique idéale de la marche.

Voici, à titre indicatif, les rapports de longueurs de base obtenu par Jansen :



Ces valeurs permettent à la patte de suivre une trajectoire ovale dont la partie inférieure reste presque parallèle au sol. Ainsi, le robot avance de manière continue lorsque plusieurs pattes sont déphasées autour du même axe.

Etude de la trajectoire :



Dans notre projet, nous sommes partis d'une intention rigoureuse : adapter les "nombres sacrés" de Theo Jansen à notre propre échelle. Puisque nous avons fixé notre base **a** à 55 mm contre 38 mm pour le modèle original, nous avons appliqué un coefficient multiplicateur de $\frac{55}{38}$ à toutes les autres longueurs. Théoriquement, cela aurait dû nous donner une courbe identique à la référence bleue, simplement plus grande. Cependant, nous avons rencontré un blocage technique lors de la simulation sur SolidWorks, le mécanisme refusant de tourner avec les cotes proportionnelles exactes. Pour débloquer la cinématique et permettre le mouvement, nous avons pris la décision de modifier significativement la valeur **k**, qui représente la distance entre l'axe de la manivelle et le point de pivot de la jambe. Alors que le calcul proportionnel nous donnait un **k** autour de 57 mm, nous l'avons passé à 87 mm, et c'est cette modification majeure qui explique la forme singulière de notre courbe marron.

En analysant notre résultat par rapport à la courbe bleue de référence, l'impact de ce **k** étiré est flagrant. La courbe bleue possède cette forme optimale en "D", avec une base plate pour la stabilité et une arche haute pour le retour du pied. Notre courbe marron, en revanche, s'est retrouvée comme "écrasée" verticalement et étirée horizontalement. En éloignant le point de pivot (en augmentant **k**), nous avons forcé le mécanisme à travailler dans une configuration plus ouverte, ce qui a eu pour effet d'aplatir la trajectoire du pied. Nous avons réussi à obtenir un mouvement fluide dans le logiciel, mais nous avons perdu la hauteur caractéristique du pas du Strandbeest.

Concrètement, cela donne à notre robot des caractéristiques de déplacement différentes du modèle original. La partie inférieure de notre courbe marron, qui correspond au moment où le pied touche le sol, est très allongée. Cela signifie que notre Strandbeest aura une foulée très longue ; il parcourra plus de distance à chaque tour de manivelle que s'il avait la courbe bleue. C'est un point potentiellement positif pour la vitesse sur un sol parfaitement lisse. Cependant, on remarque que cette ligne de sol n'est pas parfaitement droite, elle est légèrement bombée, ce qui risque de faire dandiner le robot de haut en bas pendant la marche, là où la courbe bleue assure une hauteur de hanche quasi constante.

Le véritable compromis de notre choix technique se situe au niveau de la phase de retour, c'est-à-dire la partie supérieure de la boucle. Sur la courbe bleue, le pied remonte haut, ce qui permet à la créature d'enjamber le sable ou les obstacles. Sur notre courbe marron, la phase de retour rase le sol, passant très près de la phase d'appui. En modifiant **k** pour satisfaire les contraintes de SolidWorks, nous avons transformé un "marcheur tout-terrain" en un "glisseur". Notre robot sera fonctionnel, mais il sera probablement vulnérable aux irrégularités du terrain, car il ne lèvera pas assez les pieds pour éviter de trébucher sur des obstacles que le modèle de référence aurait franchis sans problème.

3. Calculs de dimensionnement

Propriétés de la corde élastique

Le système repose sur une corde élastique (sandow) d'une longueur au repos L_0 de 1,0 mètre et d'un diamètre de 6 millimètres. Ce diamètre, relativement important pour du modélisme, laisse présager une capacité de force intéressante.

La caractéristique fondamentale de ce composant est sa constante de raideur (k). En se basant sur les données techniques, une force d'environ 40 à 50 Newtons est nécessaire pour doubler la longueur d'un tel sandow. Nous retiendrons donc pour cette analyse une valeur moyenne de : $k \approx 50 \text{ N/m}$

Concrètement, cela signifie que pour chaque mètre d'étirement, la corde oppose une force de rappel de 50 Newtons, ce qui équivaut à la force requise pour soulever une masse de 5 kg.

Modélisation de la force et de l'énergie

- **Comportement en traction et loi de Hooke**

Dans sa plage d'utilisation normale, la corde suit un comportement élastique linéaire. La force de rappel F est donc directement proportionnelle à son allongement ΔL . En étirant la corde de 1 mètre (pour une longueur totale de 2 mètres), la force maximale que le système pourra restituer au démarrage sera de :

$$F_{max} = k \times \Delta L = 50 \times 1 = 50 \text{ N}$$

- **Limites d'utilisation**

Il est important de comprendre les limites de ce matériau. La longueur maximale d'un sandow est généralement contrainte par sa gaine protectrice, autour de 150 % d'allongement (soit 2,5 m au total). À l'approche de cette limite, la force augmente de manière exponentielle et peut atteindre 80 à 100 Newtons. Solliciter la corde dans cette zone extrême est cependant déconseillé, car cela accélère son usure et crée un risque de rupture pour la structure du strandbeest.

- **Énergie potentielle stockée**

L'énergie accumulée dans la corde tendue, qui sera ensuite convertie en mouvement, est l'énergie potentielle élastique (E_{pe}). Elle se calcule avec la formule :

$$E_{pe} = \frac{1}{2}k \times (\Delta L)^2$$

Pour un allongement de 1 mètre, l'énergie stockée s'élève à :

$$E_{pe} = \frac{1}{2} \times 50 \times (1)^2$$

Pour mettre ce chiffre en perspective, 25 Joules représentent l'énergie nécessaire pour soulever une masse de 2,5 kg à un mètre de hauteur. C'est une quantité d'énergie tout à fait considérable pour une maquette, capable de la propulser sur une distance correcte.

Le rendement énergétique : hystéresis

Le modèle théorique doit être nuancé par la réalité matérielle. Les cordes élastiques sont sujettes au phénomène d'hystéresis : une partie de l'énergie fournie lors de l'étirement est inévitablement dissipée en chaleur lors du relâchement. Pour un sandow, le rendement énergétique se situe entre 60 % et 70 %. L'énergie réellement disponible (E_{utile}) pour le mécanisme sera donc plus faible :

$$E_{utile} \approx 25 \text{ Joules} \times 0,7 = 17,5 \text{ Joules}$$

Il est donc crucial de prendre en compte cette perte lors du dimensionnement de la transmission pour garantir un fonctionnement fluide et éviter que le mécanisme ne se bloque.

Application mécanique : le couple moteur

La transformation de la force de traction en rotation s'effectue en enroulant la corde autour d'un axe. Le couple (C), qui est la force de rotation, dépend alors du rayon r de cet axe, selon la relation :

$$C = F \times r$$

Avec un axe d'un rayon de 2 cm, le couple varie de cette façon :

- Au démarrage (force maximale) : $C_{max} = 50 \times 0,02 = 1 \text{ N.m}$
- À mi-course : La force et donc le couple sont réduits de moitié, tombant à $0,5 \text{ N.m}$

Un couple initial de 1 N.m est important pour la petite mécanique. Cependant, il est essentiel de retenir que ce couple n'est pas constant. Par conséquent, le mouvement du strandbeest se caractérisera par une forte accélération au départ, suivie d'un ralentissement progressif à mesure que la corde se détend.

Conclusion et recommandations

Notre analyse confirme que l'utilisation d'une corde élastique est une solution pertinente pour la motorisation d'un strandbeest. Elle offre une réserve d'énergie intéressante et un couple de démarrage élevé.

4. Gestion des coûts

Stratégie de minimisation des coûts

Pour respecter la contrainte budgétaire du projet d'ouverture, nous avons mis en place plusieurs procédés pour essayer de réduire au maximum les coûts. Nous avons choisi dans un premier temps, d'utiliser principalement l'impression 3D pour fabriquer la quasi-totalité des pièces puisque cela permet de minimiser grandement les coûts de matière, en utilisant en grande majorité du PLA et de l'ABS. De plus nos modèles ont été optimiser au maximum en retirant toute matière inutile ce qui permet des réduire la quantité de filaments utilisés et donc de réduire les coûts, ainsi que, réduire le temps d'impression. De même nous avons également fais en sorte de ne pas utiliser de vis, de boulon ou d'autres éléments de fixation afin de ne pas augmenter le budget. Tout cela nous a donc permis de rester très largement sous la limite des 100€ maximums indiqués, tout en gardant un strandbeest robuste et fonctionnel.

Bill of Materials & Bill of Pieces

N° du matériau	Nom du matériau	Quantité	Prix
1	PLA	511,22 g	11,75 €
2	ABS	111,82 g	2,57 €
3	Corde élastique	1	1,50 €

Le montant total de notre strandbeest est donc de : 15,82 €

N° de la pièce	Nom de la pièce	Quantité
1	Bielle	4
2	Bielle terminale	2
3	Fémur C	16
4	Fémur F	16
5	Abdomen inférieur	1
6	Abdomen supérieur	1
7	Circlips	40
8	Clé	1
9	Crochet	1
10	Entretoise	48
11	Entretoise pédicelle longue	2
12	Entretoise pédicelle moyenne	4
13	Griffe inférieure	4
14	Griffe supérieure	4
15	Levier	1
16	Manivelle	4
17	Métatarse inférieure	8
18	Métatarse supérieure	8
19	Patelle	8
20	Pédicelle	2
21	Poulie de renvoi d'angle	6
22	Poulie	1
23	Roue d'enroulement	1
24	Roue d'entrée	1
25	Roue de sortie	1
26	Roue libre	1
27	Tibia	8

5. Tests et méthode d'évaluation

Voici les distances parcourues par le strandbeest suivant le nombre de tours effectués par la clé :

Nombre de tours	Distance parcourue (cm)
1	10
2	30
3	40
4	53
4,5	65

Nous obtenons donc une vitesse moyenne après calcul suivant le nombre de tours de : 33,7cm/s | 48,8cm/s | 38,9cm/s | 36,8 ce qui donne finalement une moyenne globale de : 39,55cm/s soit 1,4km/h

6. Discussion sur les limites et amélioration possibles

Il y a des limites observées et de nombreuses pistes d'amélioration possibles :

- La résistance des portes poulies renvoie d'angle est limité par l'utilisation du PLA qui ne résiste pas à la force exercée par la corde une fois celle-ci remonté. Pour régler ce problème, nous avons donc rajouté des nervures sur les portes poulies pour que ceux-ci soient plus solides.
- La clé de remontage est aussi assez mal positionnée et ne permet pas de bien faire tendre la corde car elle est difficilement accessible. Pour régler cet inconvénient, on pourrait utiliser une sorte de clé de serrage à la place de notre clé actuelle qui serait alors plus facilement atteignable.
- Le crochet et l'engrenage permettant la remonté mécanique finissent par se rogner petit à petit à cause des frottements, ce qui fait que le crochet à de plus en plus de mal pour retenir la corde tendue. De plus, au bout de quatre tours et demi le crochet n'est plus assez solide pour retenir le couple exercé par la corde.
- Le bout des pattes empêchent une bonne adhérence à cause de leur finesse sur des surfaces lisses et le strandbeest à alors tendance à déraper.