

Date **22/01/2017**

Numéro de Projet

P 5C-404

Titre du Projet : **Spectacle de magie.**

Encadrant du projet : **Laurent Cabaret**

(Remplaçant Hanane Meliani)

Noms des élèves :

Gael COLAS

Sylvestre PRABAKARAN

Sommaire

1. Livrables : notre version du tour	3
2. Check-list de conception d'une « Grande Illusion »	4
3. Conception du tour	9
Étape 1 : Choisir l'effet magique	9
Étape 2 : Recherches sur l'Etat de l'Art.....	10
Étape 3 : Sélection de la solution technique	13
Étape 4 : Description précise du déroulement du tour	15
Étape 5 : Conception des plans techniques.....	18
Étape 6 : Réalisation du dispositif	26
Annexes.....	35
Consignes d'ajustement	35
Manuel d'utilisation	37
Code Arduino.....	39
Excel des positions	41

1. Livrables : notre version du tour

Notre projet se centre sur l'application d'un point de vue d'ingénieur à la conception et à la réalisation d'un tour de magie classique : le tour de « la femme coupée en deux ».

Nous avons imaginé une nouvelle version qui présente les effets des deux méthodes « classiques » réunies, méthodes que nous présentons dans la partie « Etat de l'Art ». Le dispositif que nous avons élaboré doit permettre de :

- Voir les extrémités (tête et pieds), en mouvement à l'extérieur de la boîte, même pendant la découpe ;
- Séparer totalement les deux tables, après la découpe.

Ceci étant rendu possible grâce à l'utilisation d'un système embarqué.

Notre livrable principal est donc le **dispositif lui-même**, permettant de réaliser la « Grande Illusion » :

- Les 2 tables : la normale et la « truquée » ;
- Les 2 caissons : dont le caisson des pieds contenant la partie électronique ;
- Les 2 pieds électroniques : commandés par une Arduino ;
- Les 2 lames.

Mais comme notre projet s'intéressait à la démarche d'ingénieur appliqué à la conception d'un tour de magie, notre tour s'accompagne de toute une documentation qui permet de le reproduire dans d'autres conditions, de l'utiliser et de le généraliser.

Les livrables complémentaires pour le tour lui-même sont :

- Une **check-list de conception d'une « Grande Illusion »** : cette check-list décrit les étapes à suivre, depuis l'idée initiale jusqu'à la réalisation du modèle final, pour un ingénieur souhaitant concevoir une telle illusion ;
- Les **plans** du dispositif : sous format SketchUp, ils fournissent un manuel de construction de la GI ;
- Une liste de **consignes d'ajustement** : cette liste donne les formules pour adapter la GI à n'importe quel magicien performant l'illusion. A partir des dimensions de membres donnés du magicien, on dimensionne les paramètres du dispositif ;
- Un **manuel d'utilisation** : il explique comment utiliser la GI. Le manuel donne notamment la liste des actions que doivent effectuer le magicien et son assistant pour que le tour soit réussi.

Les livrables associés aux pieds électroniques sont les suivants :

- Le **code Arduino** : c'est celui qui commande les pieds, dans leurs différents modes de mouvement ;
- L'**Excel des positions** : cet Excel permet à partir d'une liste de positions successives de l'extrémité du pied, qui peuvent être capturées à partir d'une vidéo par exemple, de générer automatiquement le code Arduino grâce auquel on peut reproduire ledit mouvement du pied de façon électronique.

Tous ces documents sont fournis en « Annexe ».

2. Check-list de conception d'une « Grande Illusion »

Voici un de nos livrables : une check-list qui décrit la démarche d'ingénieur à appliquer, selon nous, pour concevoir un tour de magie, de type « Grande Illusion », de l'idée initiale de l'effet magique à la réalisation finale et aboutie du dispositif. Cette démarche nous l'avons suivie empiriquement tout au long de notre projet, de par notre culture de futurs ingénieurs, mais nous la formulons ici de façon explicite.

Cette check-list peut se considérer comme une sorte de « mode d'emploi » destiné aux magiciens souhaitant concevoir un tour inédit (notamment les futurs membres du Club Magie de Centrale), en leur expliquant la méthode à appliquer.

Voici les étapes clés que nous avons retenues dans notre check-list. Cette succession n'est évidemment pas à sens unique, chaque étape peut évidemment influencer sur la précédente et donner lieu à des ajustements, d'après la méthode du « backtracking ».

Check-list :

- 1) Choix de l'effet magique
- 2) Recherches sur l'état de l'art
- 3) Sélection de la solution technique
- 4) Description précise du déroulement du tour
- 5) Conception des plans techniques
- 6) Réalisation du dispositif final

Dans la partie « 3. Conception du tour », ces étapes seront illustrées par la correspondance avec notre propre tour : « *la femme coupée en deux* ».

Étape 1 : Choisir l'effet magique

Tout d'abord comme c'est un tour de magie, il faut bien évidemment choisir l'effet magique que l'on souhaite présenter aux spectateurs durant la réalisation du tour.

Mais d'abord qu'est-ce qu'un « effet magique » ? Tout simplement, pour qu'il y ait magie du point de vue des spectateurs, il faut qu'un élément (ou plusieurs) défie, sans explication apparente à leurs yeux, un principe physique ou logique. Et plus ce principe est ancré dans l'esprit du spectateur, plus l'effet sera impressionnant. On peut par exemple penser aux exemples suivant : défier la gravité à travers la lévitation, défier le temps à travers les téléportations (mouvement plus rapide qu'habituellement), défier la conservation d'un état à travers des changes d'objet, défier la conservation de la matière à travers des apparitions ou des distributions, etc.

Une fois l'effet magique choisi, il est nécessaire de définir plus précisément les exigences, en termes d'effet magique, que doit satisfaire la « Grande Illusion » sous la forme de 2-3 verbes clés.

Étape 2 : Recherches sur l'Etat de l'Art

Le domaine de la magie est un domaine qui culturellement est entouré de mystère : lorsque des magiciens apprennent un tour, ils signent tacitement un « serment de confidentialité », la promesse de ne pas le révéler à des non-magiciens. Ceci permet de ne pas détruire la magie en révélant inutilement des techniques de magiciens aux personnes qui seraient de toute manière dans l'incapacité de reproduire la dite technique. De plus, beaucoup de magiciens vivent de tours qu'ils inventent et commercialisent, révéler leur tour les prive ainsi de leur gagne-pain. Ces deux phénomènes expliquent qu'il ait été culturellement difficile de se renseigner sur la conception et la réalisation de tour de prestidigitatation sans appartenir au préalable à un « cercle d'initiés ».

Mais aujourd'hui grâce à la numérisation des ouvrages des plus grands prestidigitateurs, nous avons accès à de précieuses sources d'information sur la conception et la réalisation des « Grandes Illusions » classiques. On peut citer notamment le fameux livre du plus célèbre illusionniste français, Jean-Eugène Robert Houdin : *Comment on devient sorcier : les secrets de la prestidigitatation et de la magie (1871)*. De plus la télévision, et plus récemment Internet, ont démocratisé les émissions où des illusions sont expliquées et démystifiées par des magiciens célèbres. Le duo de magicien Penn & Teller en ont notamment fait leur spécialité.

De ce fait, il est maintenant possible (et nécessaire !) de se renseigner sur les techniques qui ont déjà été employées auparavant lorsqu'on se lance dans la conception d'une « Grand Illusion ». Ces techniques peuvent être de plusieurs types :

- Illusion d'optique : double-fond dissimulé, jeux de miroir
- Dispositif mécanique
- ...
- Et plus récemment dispositifs électronique

En parallèle de cet « Etat de l'Art » des techniques « classiques » la magie, il est nécessaire de faire une étude bibliographique des technologies actuelles qui peuvent être utilisées pour

concevoir de nouvelles illusions modernes. Cela concerne notamment : la radio-télécommunication qui permet de transmettre des informations sans que le public ne s'en aperçoive, les systèmes embarqués qui permettent de commander de façon invisible tout une série d'actions secrètes, etc.

Étape 3 : Sélection de la solution technique

Une fois les recherches bibliographiques effectuées, nous pouvons identifier les différentes techniques pertinentes pour réaliser l'effet désiré. Puis, après une étape de sélection, choisir la solution la plus adaptée, ou ici en concevoir une nouvelle dans le cadre d'une innovation.

Cette solution technique sera pertinente si elle respecte deux principales conditions :

- 1) La solution permet de réaliser l'effet magique en répondant aux exigences fonctionnelles définies à l'étape 1 ;
- 2) La solution technique est « robuste » : elle peut-être employée dans les conditions du tour avec un taux de réussite de 100%.

Par le terme « réussite », nous entendons que l'effet magique du tour est réalisé sans que le spectateur ne puisse voir les mécanismes à l'œuvre, même si cela ne se fait pas dans les meilleures conditions de présentation.

Surtout lorsque la solution technique est complexe, il est nécessaire de concevoir un « mode dégradé » du tour dès cette étape : une façon de réaliser le tour même si l'une (ou plusieurs) des parties sensibles du tour est défaillante au moment de la représentation. Effectivement, les « Grandes Illusions » étant conçues comme de la magie de scène, en direct devant un public, il est important de prendre en compte les aléas possibles dans les premières étapes de leur construction.

Étape 4 : Description précise du déroulement du tour

Avant de pouvoir passer à la fabrication du dispositif dans son ensemble, il y a une étape spécifique à la magie : il faut décrire le déroulement du tour dans lequel s'insère l'illusion. En effet, ce seront les différentes actions du tour, ce que l'on souhaite montrer et ce que l'on souhaite cacher notamment, qui permettront de définir les éléments secondaires à ajouter au dispositif (autre que la solution technique choisie à l'étape précédente).

La première chose à faire est de se placer du point de vue du spectateur. Le but du tour est d'introduire l'effet magique, afin que celui-ci est le plus d'impact possible sur le spectateur. Pour cela, il faut leur donner le plus « d'informations clés » qui évoquent le principe physique que notre dispositif « abolira » : plus il y a de ces « informations clés », plus le principe physique sera ancré inconsciemment dans l'esprit du spectateur, et donc plus le spectateur sera ébahi de voir ce principe violé grâce au dispositif magique. La meilleure façon d'arriver à cet objectif est de réaliser un story-board du tour retraçant les étapes clés du tour du point de vue du public.

Cette étape est d'autant plus importante pour des tours classiques pour lesquels de nombreux spectateurs connaissent déjà des « trucs de magiciens » utilisés ; il faut dans ce cas convaincre le spectateur que ces « trucs » ne sont pas utilisés ici.

A partir de « ces informations clés », on en déduit les éléments secondaires, mais importants, ou les contraintes supplémentaires qui doivent apparaître sur notre dispositif.

La deuxième chose à faire, une fois que les éléments secondaires ont été bien définis, est de reprendre le déroulement du tour écrit précédemment, mais cette fois-ci du point de vue du magicien.

En gardant le story-board sous les yeux, on écrit le déroulement des actions que doit exécuter le magicien. Celles-ci sont de 2 types :

- « actions publiques » : ce sont tous les mouvements visibles du magicien faits pour présenter le tour au public. Le tour s'inscrivant dans un spectacle, il est nécessaire de le théâtraliser pour qu'il soit à la fois divertissement et gagne en effet magique.
- « actions secrètes » : ce sont les mouvements dissimulés au public. Il s'agit de tous les interactions du magicien avec le dispositif principal où les éléments secondaires qui doivent être dissimulés au public pour préserver l'effet magique.

Ces actions ne sont pas sans lien : le magicien peut réaliser une « action publique » pour dissimuler une « action secrète ». Le mieux est de ne pas avoir de gestes non justifiés qui pourrait rendre suspicieux les spectateurs.

Cette étape est d'autant plus importante qu'elle fournit par la suite un « mode d'emploi » de la « Grande Illusion » : y sont recensés les consignes de présentation pour introduire le tour, ainsi que les consignes de manipulation pour réaliser l'effet magique avec le dispositif invisible aux yeux du public.

Étape 5 : Conception des plans techniques

Maintenant que la solution technique a été identifiée et que les éléments secondaires ont bien été définis, nous pouvons passer à la réalisation des premiers plans techniques.

Ceux-ci sont réalisés en parallèle d'études de dimensionnement qui permettent de s'assurer de la faisabilité des différents éléments du dispositif, en remontant à des étapes amont si certaines parties se révèlent irréalisables.

Pour cela, deux types de tests peuvent être réalisés :

- Des études « grandeur nature » : une partie (ou plusieurs) du dispositif sont reproduites de façon simplifiée et on teste réellement la faisabilité ;
- Avec l'outil informatique : la réalisation d'une maquette 3D permet de modéliser le dispositif dans son ensemble gratuitement ce qui est un avantage non négligeable. Il dispose en outre de bibliothèques remplies d'éléments déjà modélisés comme des mannequins animés pouvant reproduire toutes les configurations des positions humaines.

Ces tests permettent de dimensionner, puis de fixer sur les plans les dimensions des éléments selon plusieurs contraintes :

- structurelle : d'assurer la faisabilité et la structure du tour.
- personnalisée : s'adapter précisément à une personne qui participerait au tour
- visuelle : faire apparaître des « informations clés » aux yeux du public. Cette partie prend notamment en compte la gestion des illusions d'optique qui permettent de renforcer l'effet d'un tour.

Enfin, ces études de dimensionnement permettent d'identifier la dimension « personnalisée » du tour évoquée précédemment, tout ce qui fait que le tour est spécialement adapté à une personne. Ainsi on peut aisément donner les consignes pour construire une version du dispositif adaptée à un autre magicien.

Étape 6 : Réalisation du dispositif

Enfin, une fois le plan terminé, celui-ci permet de dresser la liste exacte des matières premières nécessaires. On peut ensuite passer à la réalisation.

Celle-ci ne se fait pas d'une traite, mais de façon incrémentale : on réalise des éléments du tour que l'on teste ensuite, on les valide ou non par rapport à notre cahier d'exigences défini auparavant. S'ils sont validés, on passe aux éléments suivants, sinon il peut être nécessaire de revenir partiellement à une étape ultérieure.

Cette démarche incrémentale permet d'éviter de devoir corriger toutes les erreurs d'un coup à la fin avec la perte de temps voire d'argent que l'on imagine s'il faut reprendre tout un pan du dispositif.

Enfin, une fois le dispositif global assemblé et testé, comme il s'inscrit dans un tour global de scène, il est nécessaire de s'essayer sur un public restreint, qui ne connaît pas le tour de préférence, dans les conditions du tour. Lorsqu'on teste le tour, on se rend alors compte de certains aspects qui n'ont pas été traités lors des phases de réflexion. On peut alors modifier le dispositif en conséquence en prenant en compte les remarques des « spectateurs test ».

3. Conception du tour

Pour présenter notre travail, nous avons choisi d'organiser notre compte-rendu selon la check-list présentée précédemment. Cela a le double avantage d'illustrer ce livrable et de permettre d'organiser cette restitution.

Étape 1 : Choisir l'effet magique

Il s'agit de l'idée initiale sur laquelle nous voulions travailler, celle qui nous a inspiré ce projet innovation.

L'effet principal que nous voulions présenter était de défier le principe du vivant (pour l'être humain) en découpant quelqu'un, puis en le reconstituant : dans le tour dit de « la femme coupée en deux. »

Mais nous souhaitons avant tout appliquer nos connaissances d'ingénieur pratiquement pour revisiter de façon moderne ce tour classique : profiter des technologies actuelles pour présenter une version inédite, avec des effets supplémentaires de ce tour.

Pour notre tour, les exigences que nous avons formulées au lancement de notre projet étaient celles que nous avons indiquées dans la partie précédente :

- Voir les extrémités (tête et pieds), en mouvement à l'extérieur de la boîte, même pendant la découpe ;
- Séparer totalement les deux tables, après la découpe.

Étape 2 : Recherches sur l'Etat de l'Art

Le tour de la « femme coupée en deux » est ce qu'on appelle en magie une « Grande Illusion » (GI).

Le magicien Fred Ericksen définit le terme « Grande Illusion » ainsi :

« Une grande illusion est une discipline de la prestidigitatation (**magie**) **de scène**.

C'est généralement un numéro composé de plusieurs tours de magie qui utilisent des **appareils mettant en œuvre divers trucages astucieux** faisant souvent appel à des **illusions d'optique** pour bluffer le public. Le numéro de magie est généralement exécuté par un professionnel accompagné **d'assistantes** dont le rôle n'est pas seulement d'aider le magicien mais aussi de **détourner l'attention du public aux moments critiques du tour**. L'évolution des spectacles de grandes illusions s'éloigne de la simple présentation d'un appareil pour **incorporer des éléments scéniques**, musicaux et chorégraphiques. »

Les points en gras sont ceux que nous avons gardés à l'esprit lors de l'élaboration de notre version du tour. La GI dite « de la femme coupée en deux » peut être réalisée classiquement de deux façons :

1er cas : On peut voir la tête et les pieds de la personne sortir de la boîte pendant que celle-ci est coupée

Dans cette version, la femme est courbée dans le double fond de la table, en dessous de la boîte, pendant que la scie passe. La boîte est coupée, mais pas la femme qui ne se trouve pas dedans. Sur l'image ci-dessous, on peut bien voir la femme courbée en dessous de la boîte qui vient d'être coupée.



Dans la vidéo dont le lien est fourni ci-dessous, les magiciens Penn et Teller font une démonstration de cette version du tour, tout en expliquant les techniques utilisées : <https://www.youtube.com/watch?v=nXkwa5MuNow>

Le problème principal de cette version est que l'on ne peut séparer les tables après la découpe sans dévoiler le double fond.

2ème cas : On peut séparer les deux tables après la découpe

Dans cette version, la femme (contorsionniste) se recroqueville dans la première moitié de la boîte avant la découpe. La boîte est coupée, mais pas la femme qui ne se trouve que dans une seule moitié de la boîte.

Sur l'image ci-dessous, on peut bien voir la femme recroquevillée dans la boîte supérieure avant la découpe.



Puis, une fois les deux lames insérées, les 2 tables peuvent être séparées pour montrer que la découpe est totale.

Dans la vidéo dont le lien est fourni ci-dessous, le magicien fait une démonstration de cette version du tour, tout en expliquant étapes par étapes les techniques utilisées : https://www.youtube.com/watch?v=AoqrQeBL_r4

Le problème principal de cette version est que l'on ne peut pas montrer la tête ni les pieds en mouvement à l'extérieur de la boîte pendant la découpe.

Recherche bibliographique sur l'ARDUINO

Pour notre illusion, nous avons rapidement prévu d'utiliser un système embarqué commandé par une carte ARDUINO, nous avons donc fait les recherches bibliographiques associées pour déterminer de quel modèle de carte nous aurions besoin.

Pourquoi une ARDUINO ?

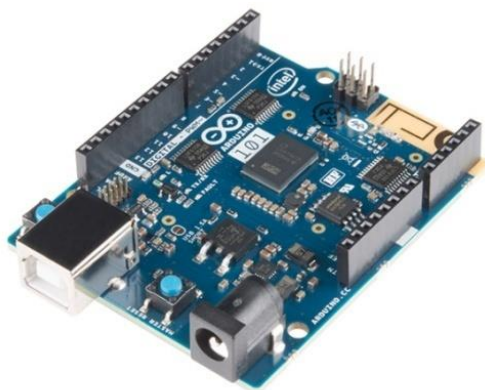
D'une part, c'est une interface libre de droit qui permet de trouver aisément de la documentation sur les commandes que nous souhaiterions utiliser pour coder le programme. Le langage utilisé est une version modifiée du C++ ce qui rend aisé la programmation de la carte.

D'autre part, ce type de carte répond technologiquement à nos besoins pour les pieds électroniques :

- Elle dispose de suffisamment d'entrées et de sorties pour être contrôlée et pour contrôler les moteurs (2 servomoteurs : 1 pour chaque articulation au niveau des chevilles)
- Elle est petite et peut aisément s'intégrer dans le système sans gêner les jambes de la personne qui se trouve dans la boîte.
- L'alimentation peut se faire facilement avec une tension continue, le système peut donc être indépendant d'une alimentation externe s'il dispose de piles ou d'une batterie.

Plus précisément, les caractéristiques techniques à prendre en compte de la carte ARDUINO choisie sont les suivantes :

Modèle de la carte : ARDUINO GENUINO 101



- Tension d'entrée : 7-12 V
- Tension de sortie : 3,3 V
- Entrées et sorties :
 - 14 pins digitaux dont 4 qui fonctionnent en PWM (Modulation de Largeur d'Impulsion pour gérer une vitesse de moteur ou la luminosité d'une LED par exemple)
 - 6 pins analogiques
- Mémoire Flash : 196 kB

Étape 3 : Sélection de la solution technique

Pour que la solution technique soit retenue, elles devaient répondre à deux exigences dans notre version du tour de la « femme coupée en deux », pouvoir :

- 1) Voir les extrémités (tête et pieds), en mouvement à l'extérieur de la boîte, même pendant la découpe ;
- 2) Séparer totalement les deux tables, après la découpe.

Les recherches sur l'Etat de l'Art, ainsi que notre culture de magiciens, nous ont apporté la **solution « classique » pour répondre à la 2^{ème} exigence : un double-fond**. Celui-ci permettrait à la « femme coupée en deux » de se dissimuler dans le caisson d'une seule table (celle du haut) pendant la découpe, puis de pouvoir séparer les deux tables. Les lames de la découpe permettraient lors de la découpe de cacher l'intérieur des deux caissons, préservant l'illusion que son corps se trouve moitié dans l'un, moitié dans l'autre.

Notre culture d'ingénieur nous a permis de concevoir la **solution innovante à la 1^{ère} exigence : un système embarqué nous permettrait de présenter des pieds mobiles sortant de l'autre caisson**. En effet, notre étude bibliographique sur la carte Arduino nous a prouvé qu'il était possible d'animer ces pieds grâce à des servomoteurs commandés par une Arduino. Ces pieds électroniques pourraient donc être en mouvement même après la découpe. Plusieurs modes de mouvement sont à prévoir selon l'étape du tour : avant, pendant ou après la découpe notamment ; modes de fonctionnement déclenchés par le magicien au moyen de boutons.

Présentation du "mode dégradé"

Une contrainte importante de notre dispositif, comme nous l'avons souligné en introduction, est qu'il doit permettre de réaliser un **tour de magie de scène**. La représentation du tour n'est pas filmée, mais consiste bien en une présentation « en live » devant un public. Notre dispositif doit donc remplir ses fonctions telles que définies en introduction :

- permettre de voir les extrémités (tête et pieds), en mouvement à l'extérieur de la boîte, même pendant la découpe ;
- permettre de séparer les deux tables, après la découpe ;

Et cela même en cas d'aléas, inhérents à la performance en direct.

L'étude de robustesse de la partie mécanique terminée, présentée dans une partie précédente, nous indique qu'il ne peut y avoir d'aléas de ce côté-là.

De plus, nous avons réalisé les tests sur un panel de magiciens du club, plusieurs membres du club peuvent réaliser ce tour, avec plus ou moins de rapidité et de facilité évidemment. Ainsi, nous ne sommes pas dépendant d'une seule personne pour la réalisation de ce tour : même si cette personne se blesse, nous pouvons tous de même effectuer ce tour.

La partie la plus sensible aux aléas est la partie électronique : malgré des tests de fonctionnement juste avant d'entrer sur scène, il n'est pas inenvisageable que le dispositif électronique ne fonctionne pas une fois sur scène ; cela peut être dû à un câble coupé, une soudure qui lâche, ou un moteur qui rend l'âme. Pourtant il faut être en mesure de continuer la représentation, c'est pourquoi nous avons appliqué nos techniques d'ingénieur pour concevoir un « mode dégradé » de notre tour.

Ce « mode dégradé » permet de remplir les deux fonctions précédentes, même en cas de défaillances de la partie électronique, avec une légère concession pour la première fonction. Celle-ci devient : « permettre de voir les extrémités (tête et pieds), ~~en mouvement~~ à l'extérieur de la boîte, même pendant la découpe ».

En effet, comme nous l'avons expliqué plus haut, les pieds électroniques sortent au moyen d'une glissière (du type utilisé pour les tiroirs de bureau) que le Loup sort en poussant avec ses pieds. La sortie des pieds n'est donc pas dépendante du fonctionnement de la partie électronique.

De même, la rentrée des pieds se fait par le Loup qui agrippe avec le haut de ses pieds, puis tire la barre supportant les pieds. Ce qui n'est pas non plus dépendant du dispositif électronique.

Dans ce mode dégradé, nous sommes donc en mesure de présenter notre tour en cas de défaillances de la partie électronique, et l'effet magique reste « réussi », selon notre définition présentée plus haut, même s'il est bien évidemment amoindri ; le tour perd en réalisme car les pieds (électroniques) ne sont plus vus en mouvement avant, pendant et après la découpe. Mais ce mode nous permet de présenter un produit robuste dans toutes les conditions d'utilisations, ce qui est un critère important pour juger de la qualité d'un projet d'ingénieur.

Étape 4 : Description précise du déroulement du tour

Notre tour s'inscrit dans un spectacle de magie plus vaste que nous jouerons fin mars de cette année. Dans ce tour, un Loup doit être coupé en deux. Voici le **déroulement du tour du point de vue du spectateur** tel que nous l'avons prévu :

- 1) Le Loup s'allonge sur les tables : une moitié du corps sur chaque table ;
- 2) Le Magicien installe les 2 caissons : un pour chaque moitié du corps. La tête du Loup dépasse à une extrémité de la boîte, ses pieds de l'autre côté ;
- 3) Le Magicien soulève le rideau du caisson du haut : il montre le corps du Loup, puis il rebaisse le rideau ;
- 4) Le Loup agite sa tête et ses pieds pour montrer qu'il est bien dans la boîte ;
- 5) Le Magicien sort les lames qu'il montre tranchantes ;
- 6) Le Magicien soulève le rideau du caisson du bas : il montre les jambes du Loup, puis il rabaisse le rideau ;
- 7) Rapidement après, il coupe la boîte en deux avec les lames ;
- 8) Les deux parties sont séparées pour montrer qu'il y a bien eu coupure ;
- 9) Le Loup agite ses pieds malgré la coupure ;
- 10) Les deux parties sont réassemblées et les lames ôtées ;
- 11) Le Magicien enlève les caissons ;
- 12) Le Loup apparaît indemne.

De plus, comme expliqué précédemment, notre tour est un grand classique ayant déjà été réalisé des centaines de fois sous pleins de formes différentes ; il était donc nécessaires de faire passer certaines « informations clé » pour renforcer l'effet du tour, celles-ci sont listées à l'étape 0.

Etape	Information clé	Elément du dispositif associé
0	Montrer qu'il n'y a pas de double-fond	Tables les plus fines possibles, avec une épaisseur de planche simulée
1	Montrer que les tables sont solides (pas de creux)	Volets rabattant dissimulant le double-fond qui doivent pouvoir être verrouillés + Tissus extensible dissimulant la surface des volets
2	Montrer qu'il n'y a pas de place dans le caisson pour totalement se cacher dans la partie supérieure.	Forme en "cercueil" du caisson pour diminuer le volume et optimiser au maximum l'espace utilisé.
2	Montrer qu'il n'y a pas de change de pieds, que les pieds qui bougent ne sont pas des faux pieds.	Système de glissière permettant la sortie des pieds électroniques en synchronisation avec le moment où la personne sortirait ses pieds du caisson + pieds électroniques.
5	Montrer que les lames ne sont pas truquées.	Lames en métal qui peuvent être examinées.
6	Montrer que le corps et les jambes sont toujours dans leurs caissons.	Une fausse jambe dans le caisson des pieds

Une fois défini grâce au « story-board » précédent les éléments secondaires que nous devions ajouter à notre dispositif, nous avons pu définir le déroulement **du tour du point de vue du magicien** cette fois :

- 1) Le Loup s'allonge sur les tables. Sur la table du haut, son haut du corps est en appui sur les volets du double fond à deux endroits : sur ses épaules et sur le bas du dos. Sur la table du bas, ses jambes sont pliées vers le haut ;
- 2) Le Magicien installe le caisson du haut : celui dont dépasse la tête ;
- 2) Le Magicien installe le caisson du bas ;
- 2) Le Magicien lance le Mode 1 de mouvement des pieds : sortie des pieds ;
- 2) Lors de l'installation, le Loup fait comme s'il déplaçait les jambes, mais il fait en fait sortir dans ce mouvement les pieds électroniques sur glissière ; les jambes du Loup sont recroquevillées dans sa boîte ;
- 3) Le Magicien lance le Mode 2 : les pieds sont « vivants » ;
- 3) Le Magicien soulève le rideau du haut pour montrer que le Loup a bien le haut du corps dans la boîte ; puis baisse à nouveau le rideau ;
- 3) Le Magicien déverrouille les volets rabattant du double-fond : celui du haut, puis celui du bas ;
- 5) Le Magicien fait son discours en prenant les lames pour laisser au Loup le temps de ramener ses jambes et de se recroqueviller dans le double ;
- 6) Le Magicien soulève le deuxième rideau pour montrer que ses jambes sont bien dans la deuxième boîte : il s'agit en fait de la fausse (demi-)jambe reliée au dispositif électronique ;
- 7) Le Magicien baisse le rideau et rapidement après coupe le Loup en deux avec les lames ; ces lames permettent de cacher l'intérieur des boîtes ;
- 7) Le Magicien lance le Mode 3 : les pieds « meurent » ; les pieds du Loup bougent dans un dernier sursaut de vie ;
- 8) Les roulettes des tables sont déverrouillées et les deux tables sont séparées ;
- 9) Le Magicien lance le Mode 4 : les pieds se « testent » ;
- 9) La tête du Loup, ainsi que les pieds électroniques bougent pour faire croire qu'ils appartiennent toujours à la même personne ;
- 10) Les deux tables sont réassemblées, les roulettes déverrouillées et les lames ôtées ;
- 10) Le Loup sort du double-fond et replace ses jambes dans le caisson inférieur ;
- 10) Le Magicien reverrouille les volets rabattants : celui du bas, puis celui du haut ;
- 11) Le Magicien enlève le caisson du haut ;
- 11) Le Magicien lance le Mode 1 : rentrée des pieds ;
- 11) Le Magicien enlève le caisson du bas ; dans le même temps, dans le geste de plier ses jambes, le Loup rentre les pieds électroniques dans le caisson en utilisant ses propres pieds ;
- 12) Le Loup apparaît indemne sur la table.

Cet enchaînement de toutes les actions « publiques » et « secrètes » que doivent effectuer le duo Magicien-Loup fournit un mode d'emploi de cette « Grande Illusion ».

Étape 5 : Conception des plans techniques

La partie mécanique

Avant de nous lancer dans la conception et la réalisation du dispositif, nous avons réalisé des **études de dimensionnement** pour s'assurer de la faisabilité du projet, comme nous avons appris à le faire dans nos autres projets complexes d'ingénieur.

Nous avons effectué deux sortes de tests :

- **Avec l'outil informatique**

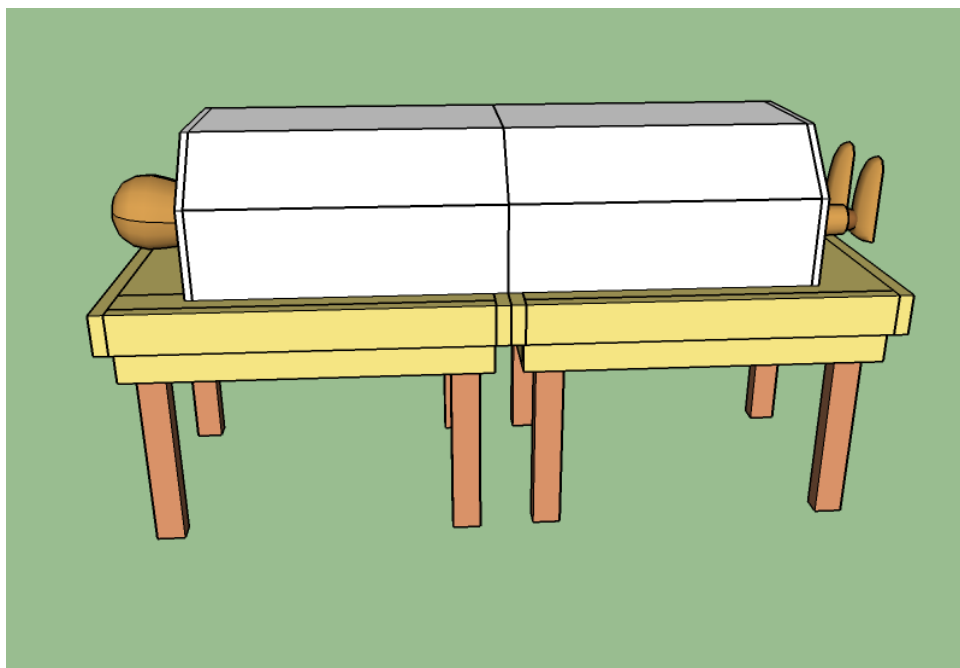
Nous avons fait une modélisation sous Google Sketch Up de notre dispositif : tables et boîtes. Puis à l'aide d'un mannequin, sur lequel les différentes articulations mobiles étaient modélisées, nous avons étudié différentes configurations de double-fond et de tailles de boîtes qui permettent au mannequin de se recroqueviller tout en s'assurant que ceci demeure invisible aux yeux des spectateurs.

- **Etudes « grandeur nature »**

Au moyen de plateaux et de plans inclinés, nous avons reproduit de façon simplifiée plusieurs parties du dispositif. Ces reproductions permettent de tester la faisabilité des solutions simulées trouvées avec l'outil informatique : en expérimentant nous-mêmes, nous avons déterminé si elles étaient physiquement réalisables.

Cette double approche, nous a permis de nous assurer que cette partie du dispositif était théoriquement réalisable et de la dimensionner.

Voici une image sur Google Sketch Up de notre dispositif.



Nous devons donc concevoir deux tables aux mêmes dimensions et à l'aspect extérieur identique. Il était important que les tables soit d'aspect semblable afin que le spectateur ne puisse pas se douter que la table supérieure possède un double fond, dissimulé au départ par un système de volet rabattant.

Dans cette partie, nous devons concevoir également deux caissons identiques possédant chacune une ouverture sur le côté face au public pour pouvoir montrer ce qui se passe à l'intérieur des boîtes. Ces ouvertures sont dissimulées par des rideaux le reste du temps.

La conception du double-fond



Le double fond repose sur une illusion d'optique simple : les planches disposées le long du plateau de la table donnent l'illusion que le plateau fait 10cm d'épaisseur, là où il n'en fait en réalité que 3 cm.

De plus, les planches disposées en contact des premières, à l'intérieur de la table comme pour solidifier celle-ci, permettent de dissimuler encore 10cm de double-fond.

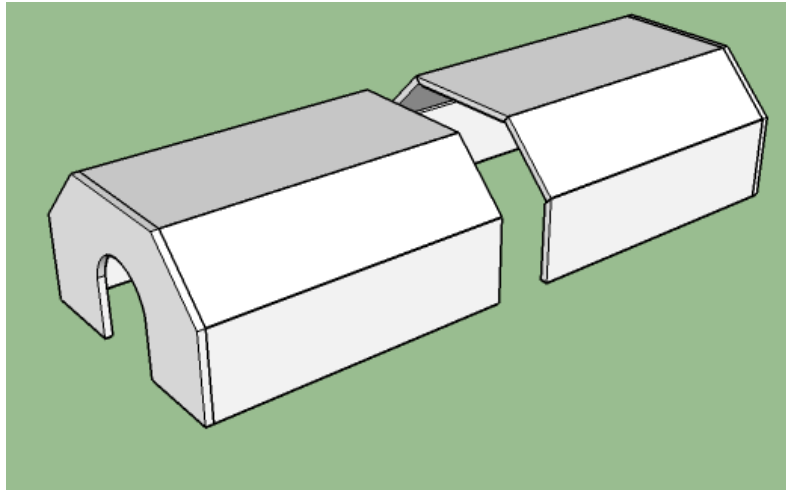
Au total, en prenant en compte l'épaisseur de la planche du double-fond, c'est un double-fond d'un peu plus de 15cm qui est dissimulé dans cette table. Ce double fond permet au Loup de se recroqueviller dans le caisson supérieur, tout en limitant la hauteur de celui-ci ; le double fond donne ainsi l'impression qu'il serait impossible de tenir tout entier dans une un caisson.

Le double fond est dissimulé initialement par un système de volets rabattant recouverts d'un tissu extensible qui dissimule le trou. Ainsi le Loup semble du point de vue spectateur s'allonger sur ce qui semble être un plateau solide. Le tissu extensible participe à l'illusion en épousant les contours du double-fond lorsque les volets sont rabattus, puis en se tendant donnant l'illusion d'un plateau lorsque les volets sont verrouillés.

La conception des caissons

Nous avons conçu deux caissons distincts :

- Le premier avec une ouverture pour la tête ;
- Le deuxième avec une ouverture pour chaque pied. C'est celui qui contient le dispositif des pieds électroniques.



Pour les caissons, nous avons choisi non pas une forme parallélépipédique, mais une forme en « sarcophage ». Cette forme particulière donne l'illusion que la boîte est moins haute qu'elle n'y paraît.

De plus, pour limiter la hauteur de ces boîtes, nous avons joué sur la largeur de celles-ci. En effet, se contorsionner dans la boîte en rentrant verticalement ses jambes pliées requiert que la hauteur du bassin au genou soit inférieure à la hauteur du bas du double-fond au haut de la boîte. Mais en rentrant en diagonale ses jambes pliés, en pivotant le bassin, on peut réduire la hauteur nécessaire ; c'est cette méthode que nous avons retenue.

Le document Google Sketch Up nous a au départ permis de dimensionner notre GI. Mais maintenant, il représente de façon exacte notre dispositif mécanique : la position de chacune des planches, leurs exactes dimensions (longueur*largeur*hauteur). Il offre donc **un « manuel de construction »** pour construire cette GI à l'identique. Il s'agit d'un de nos livrables.

Consignes d'adaptation

Mais comme certains paramètres de dimensionnement peuvent dépendre de la carrure et de la souplesse du magicien qui réalise cette illusion, nous avons réalisé des études qui permettent d'adapter cette GI à toute personne souhaitant la réaliser.

Les études suivantes, géométriques pour la plupart, sont celles qui permettent d'associer les longueurs caractéristiques du corps du Loup « à couper en deux », exécutant le tour, aux dimensions d'élément du dispositif. Ces **consignes d'adaptation** résumées en « Annexe » constituent un de nos livrables.

Dans cette partie, nous définirons les dimensions du corps du magicien qui peuvent dimensionner la GI, si l'on souhaite réaliser une GI « sur mesure ».

J'ai indiqué les valeurs que nous avons obtenues dans notre cas. Tous les résultats sont donnés en centimètres.

- **Hauteur du magicien : H_m**

La 1^{ère} dimension à déterminer est la **longueur de chaque table L_t** .
En appliquant un coefficient de sécurité de 1.1, on obtient la formule.

$$L_t = \frac{1.1 * H_m}{2}$$

Pour $H_m = 176\text{cm}$, on a : $L_t = 97\text{cm}$

- **Longueur du dos du magicien (mesuré du bas du bassin aux épaules) : L_m**

La 2^{ème} dimension à déterminer est la **longueur du double-fond L_d** .
En prenant en compte l'épaisseur des volets rabattants, il est prudent d'appliquer une marge de 5 cm.

$$L_d = L_m + 5$$

Pour $L_m = 61\text{cm}$, on a : $L_d = 66\text{cm}$

- **Largeur d'épaule du magicien : l_e**

La 3^{ème} dimension à déterminer est la **largeur du double fond l_d** , et par la même occasion, **la largeur de la boîte l_b** et la **largeur de la table l_t** .

Le magicien doit pouvoir pivoter son bassin dans le double-fond, il est important qu'il ait un espace latéral, on prend donc un coefficient de sécurité de 1.15.

$$l_d = 1.15 * l_e$$

Pour $l_e = 44\text{cm}$, on a : $l_d = 50\text{cm}$

Puis, comme on utilise également la largeur de la boîte et que celle-ci doit restée bien stable sur la table lors des mouvements de contorsion du magicien, nous avons déterminé que 7.5cm de chaque côté du double-fond réalisaient une marge acceptable.

$$l_b = l_d + 15 = 1.25 * l_e + 15$$

Pour $l_e = 44\text{cm}$, on a : $l_d = 65\text{ cm}$

Enfin, pour une question de stabilité également, on applique la même marge de 7.5cm entre les bords de la boîte et les bords de la table.

$$l_t = l_b + 15 = 1.25 * l_e + 30$$

Pour $l_e = 44\text{cm}$, on a : $l_t = 80\text{ cm}$

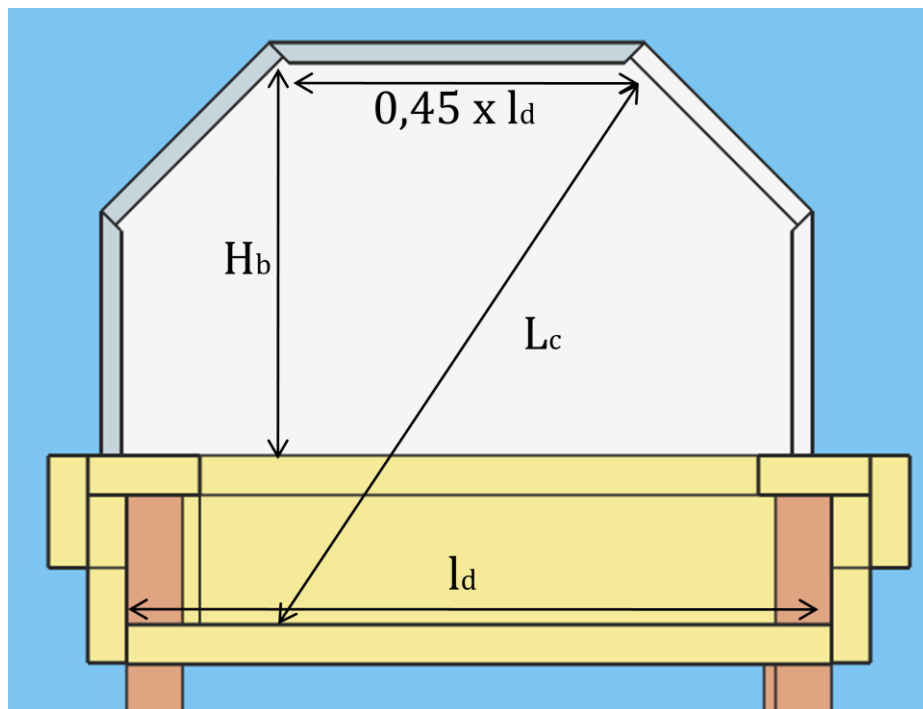
- **Longueur de la cuisse du magicien** (mesurée du bas du bassin au haut du genou) : L_c

La 4^{ème} dimension à déterminer est la hauteur **de la boîte** H_b .

Comme expliqué dans la partie précédente, la plus grande longueur que l'on doit faire passer dans cette boîte est la longueur de la cuisse du magicien **diagonalement**, lorsque le magicien se recroqueville dans la boîte supérieure.

Dans le cas d'une structure « en sarcophage », la cuisse du magicien doit donc pouvoir passer entre le haut de la pente inclinée d'un côté du sarcophage et le bas du double fond du côté opposé (cf schéma).

La largeur caractéristique de la boîte n'est donc pas l_d , mais la largeur utile de la planche supérieure : environ **$0.45 * l_d$ dans notre géométrie.**



Comme le double-fond nous fournit déjà une profondeur de 15cm environ, l'application du théorème de Pythagore nous donne :

$$(0.45 * l_d)^2 + (H_b + 15)^2 = L_c^2$$

On aboutit à l'équation du 2nd degré suivante :

$$H_b^2 + 2 * 15 * H_b + 15^2 + (0.45 * l_d)^2 - L_c^2 = 0$$

Dont la résolution d'une équation du 2nd degré donne la formule de H_b :

$$H_b = \sqrt{L_c^2 - (0.45 * l_d)^2} - 15$$

Pour $L_c = 55\text{cm}$, on a : $H_b = 31\text{cm}$

- **La hauteur du double-fond : H_d**

La hauteur/profondeur du double-fond est fixée indépendamment. Elle a été maximisée dans la limite où l'épaisseur apparente de la table, qui dissimule le double-fond ne choquait pas le spectateur.

$$H_d = 15\text{cm}$$

- **La hauteur de la table : H_t**

Enfin, la hauteur de la table est laissée à l'appréciation du magicien. Nous avons choisi une hauteur permettant de s'asseoir facilement sur la table.

On a : $H_t = 64\text{cm}$

Mais d'autres paramètres indépendants de la taille du magicien peuvent être pris en compte dans le dimensionnement de cette hauteur : par exemple la gestion des angles de vue (en cas d'estrade ou de gradins) pour éviter que le double fond ne soit visible.

La partie électronique

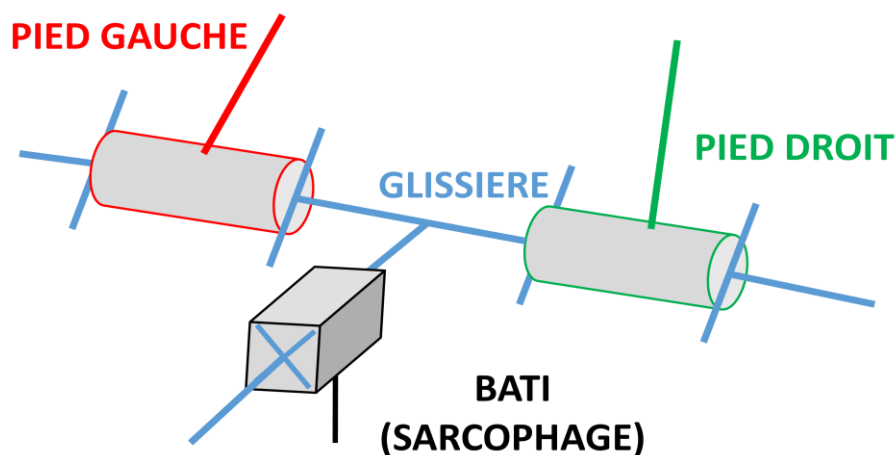
Pour être en accord avec la définition de notre « mode dégradé », présenté à l'étape 3, les pieds électroniques devaient pouvoir être sortis du caisson même en cas de défaillance de tout le système électronique. Nous avons donc décidé que la rentrée/sortie des pieds ne serait pas assurée par un actionneur, mais par un dispositif mécanique : une glissière. D'autant plus que les mouvements de translation sont plus complexes à mettre en place et peuvent être onéreux systèmes de vérins ou systèmes écrou/vis à billes.

Cette glissière doit être mise en place de telle sorte que le Loup puisse pousser ou tirer avec ses jambes les pieds électroniques pour les rentrer ou les sortir comme un tiroir. Cette fonction n'est donc pas à réaliser avec un actionneur

Ainsi, seules les liaisons pivots entre le système coulissant et les pieds sont à motoriser. Comme dit précédemment, ces liaisons seront assurées par des servomoteurs qui feront bouger les pieds de manière à ce qu'ils paraissent vivants.

Les pieds pourront bouger dans un seul plan vertical, celui dans le prolongement de la jambe. La cheville est donc représentée par une articulation à un seul axe.

On peut résumer les liaisons qui entrent en jeu dans notre dispositif par le schéma cinématique suivant :



Les servomoteurs que nous avons décidés d'utiliser sont des : *Multiplex Servo Digi*. Nous les avons sélectionnés selon 2 critères :

- **praticité** : ces servomoteurs prennent en charge la bibliothèque « Servo » de l'Arduino. Cette bibliothèque disposant de nombreuses fonctions utiles prédéfinies, cela rend les servomoteurs faciles à commander ;
- **robustesse** : le couple des servomoteurs permet de soulever un faux-pied muni d'une chaussure.



Lors de notre **dimensionnement pour le choix des servomoteurs**, nous avons pris comme valeurs:

- masse du faux-pied (en bois léger) : $m_{fp} = 450 \text{ g}$;
- masse de la chaussure : $m_{ch} = 250 \text{ g}$ (chaussure légère en toile) ;
- longueur de la chaussure : $l = 28 \text{ cm}$ (pointure 43).

Ce qui nous donne un moment maximum de :

$$C = (m_{fp} + m_{ch}) * g * l$$

L'application numérique donne :

$$C = 1.68 \text{ N.m}$$

Les caractéristiques constructeur des servomoteurs *Multiplex Servo Digi* sont :

- Moment max statique : $2.8 - 3.2 \text{ N.m}$;
- Moment max en mouvement : $2.3 - 2.7 \text{ N.m}$.

Ces valeurs sont bien supérieures au moment effectif C (calculé précédemment) que devra supporter notre servomoteur : celui-ci est donc utilisable dans notre dispositif. Ceci a ensuite été vérifié expérimentalement.

La description du déroulement du tour donnée à l'étape 4 nous permet de définir les différents **modes de mouvements** des pieds électroniques. Ces modes devront ensuite être codés en lignes de commande pour les deux servomoteurs.

- 1) **Mode 0 : par défaut, les pieds sont statiques à 90°**. Ce mode permet de ranger les pieds électroniques dans le caisson, sans qu'ils ne risquent de sortir ;
- 2) **Mode 1 : les pieds sont statiques à 30°**. Ce mode permet de sortir/rentre les pieds du caisson, à travers l'ouverture pratiquée dans le caisson du bas ;
- 3) **Mode 2 : les pieds sont « vivants »**. Dans ce mode, les pieds électroniques réalisent des mouvements de faible amplitude en continu : cela permet de donner l'illusion que ce sont des vrais pieds mobiles ;
- 4) **Mode 3 : les pieds « meurent »**. A la découpe, les pieds reproduisent les spasmes de douleur : ils font des mouvements de grande amplitude rapide, puis restent statiques ;
- 5) **Mode 4 : les pieds se « testent »**. Dans ce mode, les pieds pour montrer qu'ils sont de nouveau vivants réalisent des mouvements de grande amplitude réguliers.

Étape 6 : Réalisation du dispositif

La partie mécanique

Une fois le SketchUp terminé, nous avons par la même occasion une liste exacte des matières premières nécessaires ; du point de vue des planches de bois notamment, nous avons leurs côtes précises dans les trois dimensions : longueur*largeur*épaisseur. Nous avons pu rapidement acheter ce dont nous avons besoin dans un magasin de bricolage et passer à la réalisation.

La réalisation de la partie mécanique était très chronophage : toutes les planches à scier, poncer, assembler à la colle et avec des vis, etc. Nous y avons donc travaillé pendant notre temps libre, gardant les plages allouées au « projet inno » surtout pour les étapes de conception et de réalisation de la partie électronique, plus proches du travail d'ingénieur.

Voici notamment pour comparaison, la table avec double-fond qui a pour dimensions : 97cm*77cm*64cm (longueur*largeur*hauteur).



Dans sa version : SketchUp



Une fois réalisée

Cette fabrication a été basée sur la méthode du « **test-driven development** » : c'est-à-dire qu'à chaque étape, nous faisons des tests pour vérifier le fonctionnement des sous-dispositifs et s'ils répondaient bien au cahier d'exigence que nous avons défini. Sinon, nous réalisons les ajustements nécessaires

Cette démarche incrémentale a permis d'éviter de se retrouver à l'arrivée avec un produit inutilisable, plein de problèmes dont certains n'auraient sans doute pas pu être corrigés si tard dans le processus de réalisation.

Pour prendre un exemple de l'utilité de cette démarche, prenons celui du **système de verrouillage des volets rabattants**.

Initialement, nous pensions que les volets n'auraient pas besoin d'être verrouillés : lorsque le Magicien enlèverait le caisson du haut, « le Loup à couper en deux » n'aurait qu'à se gainer, en appui sur sa nuque et ses fesses, pour que les volets remontent tous seuls en position horizontale.

Mais en testant nous même le dispositif, nous nous sommes rapidement rendu compte que cette solution était impraticable : cela demandait un effort physique tel que tout

spectateur voyait immédiatement la rigidité forcée du Loup, de plus même gainé le dos courbé du Loup appuyait sur les volets qui ne pouvaient remonter totalement.

Nous avons donc ajouté un système de verrouillage des volets. Le Magicien peut insérer, par des trous dans le côté de la table, des tiges métalliques qui supportent les volets, une fois qu'ils sont en position horizontale. Le Loup n'a donc besoin de se gainer qu'un court instant, le temps que les volets remontent, et jamais alors que son corps est visible du public.

Cette modification n'aurait pas été possible plus tard dans le processus de réalisation, après l'ajout du tissu extensible qui recouvre le dessus de la table.



A gauche le système lorsqu'il est verrouillé, à droite lorsqu'il est déverrouillé permettant ainsi de gagner de l'espace en profondeur grâce au tissu extensible.

Enfin, une fois que nous avons fini d'assembler la partie mécanique du dispositif, nous avons pu réaliser les premiers tests globaux, même si nous n'avions pas encore les pieds électroniques. Devant un public restreint composé de membres du Club Magie, nous avons présenté notre illusion dans les conditions du tour (en suivant l'ordre des actions présentées à l'étape 4). En testant ce tour sur ces « spectateurs-tests », ceux-ci nous ont offert un point de vue extérieur sur notre travail et nous ont notamment permis de considérer d'autres « informations clés » qui leur semblaient nécessaires d'avoir en tant que spectateur. Nous avons pris leurs remarques en compte et modifier notre dispositif en conséquence.

C'est notamment lors de telle séances tests que nous avons eu l'idée de rajouter l'information clé de l'étape 6 : « pouvoir montrer l'intérieur des caissons, juste avant la découpe ». Nous avons par la suite ajouté :

- Les ouvertures dans les caissons qui permettent de montrer l'intérieur ;
- Les rideaux qui nous permettent de décider quand nous souhaitons montrer l'intérieur ;
- La fausse jambe qui donne l'illusion que la jambe du Loup se trouve à l'intérieur du caisson du bas juste avant la découpe.
- Les roulettes qui permettent de séparer facilement les tables.



La partie électronique

L'objectif important de la partie électronique était de reproduire de façon crédible et réaliste le mouvement naturel d'un pied humain.

Capture des mouvements réels d'un pied humain

La première idée que nous avons eue était d'utiliser le hasard pour reproduire les petits mouvements du pied au repos : les positions angulaires successives étaient générées aléatoirement dans une plage de valeurs définie (pour éviter les mouvements de trop grande amplitude), et les intervalles de temps où le pied était immobile étaient également définis aléatoirement.

Mais nous nous sommes rapidement rendu compte que le hasard ne donnait pas un aspect « naturel » à notre pied électronique, ces mouvements étaient :

- « bizarres » : le choix aléatoires des angles donnaient des successions d'angles passant brusquement d'une valeur extrême à une autre ;
- saccadés : les intervalles de temps aléatoires donnaient des successions de mouvement très rapides, puis très lents.

Ceci ne rendant pas compte du rythme relativement constant, bien qu'irrégulier, de la succession de mouvements fluides et de faibles amplitudes d'un pied au repos.

Puis nous avons eu l'idée suivante : quoi de mieux qu'un véritable pied humain pour simuler les mouvements d'un pied humain ? En effet, nous nous sommes dit que le meilleur moyen d'avoir un pied électronique reproduisant de façon crédible les mouvements d'un pied au repos est si ce pied électronique reproduisait de façon exacte la succession de mouvements filmés, réalisés par un pied humain au repos.

A partir de notre expérience acquise en travaux pratiques de mécanique, nous avons élaboré le protocole suivant :

- Filmer le pied d'un de nous pendant qu'il est allongé ;
- Faire l'acquisition des positions de l'extrémité du pied sous Synchronie ;
- Convertir ces mesures de déplacements en variation d'angle sous Excel ;
- Programmer ces consignes en angles et en temps sur Arduino.

Nous avons testé cette méthode sur un premier exemple, et en comparant le mouvement du pied sur la vidéo et les mouvements du servomoteur commandé par l'Arduino, nous avons validé la faisabilité de cette solution.

C'est cette méthode qui a été utilisée pour coder les différents modes (non statiques) de mouvements du pied : nous filmions le pied d'un de nous réalisant, pour de vrai, les mouvements que devait faire notre pied électronique, puis après acquisition et traitement sous Excel, nous avions le code Arduino correspondant.

Rédaction du code Arduino

La première chose qui a été faite sur le code est donc l'implémentation de l'aspect vivant des pieds. Tout comme la plupart des servomoteurs, les JUMBO MULTIPLEX DIGI reçoivent leurs consignes de position grâce à un signal PWM. La bibliothèque *Servo.h* fournie par Arduino permet ainsi de gérer ces positions simplement en utilisant la fonction *write(position)*. Dans notre code, cette instruction est écrite dans une fonction nommée *setAngle(angle)*. L'utilité de cette fonction sera expliquée par la suite. Le tableau Excel a donc permis de générer un code composé de suites de fonctions *setAngle(angle)* et de *delay(temps)* correspondants.

Une fois que les consignes de position ont été codées sur la carte Arduino pour donner l'aspect vivant aux pieds, il a fallu maintenant implémenter la gestion des modes qui a été présentées à l'étape précédente. En effet, bien que la partie la plus complexe en termes de réalisme ait été codée grâce à l'acquisition des positions, il reste à implémenter tous les autres modes qui correspondent à des consignes de position particulières. Afin de gérer ces modes, il a été décidé d'utiliser des boutons poussoirs qui ont l'avantage d'être petits et donc de ne pas poser de problème au niveau de l'encombrement et également au niveau de la visibilité étant donné que l'existence de ces boutons ne doit pas être connue par les spectateurs.

La présence de 5 modes nous a fait choisir un nombre de 4 boutons poussoirs. Étant donné que la séquence des modes est la même quelque soit la représentation du tour, on aurait pu envisager d'utiliser un seul bouton poussoir qui serait enclenché à chaque changement de mode. Mais par question de sûreté, nous avons préféré réserver un bouton à chaque mode, excepté le mode 0 qui est le mode initial et qui sera donc enclenché dès la mise en marche du système électronique.

Ainsi, le code dispose d'une variable de type entier afin de stocker le mode actuel. A chaque fois que la boucle loop est lue, les boutons poussoirs sont lus et changent le mode en fonction du bouton qui est appuyé.

Ainsi la structure qui était prévue à ce moment était la suivante :

```
void loop() {
    if(digitalRead(pinMode1)){
        mode = 1 ;
    }if(digitalRead(pinMode2)){
        mode = 2 ;
    }if(digitalRead(pinMode3)){
        mode = 3 ;
    }if(digitalRead(pinMode4)){
        mode = 4 ;
    }

    if(mode==1){
        //Consignes mode 1
    }if(mode==2){
```



```

        //Consignes mode 2
    }if(mode==3){
        //Consignes mode 3
    }if(mode==4){
        //Consignes mode 4
    }
}

```

Cependant la gestion des consignes par la carte Arduino implique des spécificités à prendre en compte : en effet, le langage implique que les consignes soient suivies dans l'ordre et tant qu'une consigne n'a pas encore été finie, il est impossible de lire la suivante. Cela pose problème pour un mode particulier : le mode 2 qui correspond aux pieds "vivants". Ce mode utilise les consignes qui ont été calculées dans le tableau excel et les applique à la suite. Ainsi, lorsque le mode 2 est actif, il est lu jusqu'à la fin de la suite de consignes qui correspond à la durée de la vidéo qui a été analysée (de l'ordre de 1 minute). Cela est problématique pour l'utilisation des modes car le mode 3 correspond au moment exact où la personne se fait couper. Les pieds doivent reproduire les spasmes à ce moment précis et il n'est donc pas question d'attendre que le mode 2 se termine jusqu'au bout.

Une solution à ce problème aurait été de lire la valeur des boutons poussoirs entre chaque instruction du mode 2 mais cela rendrait le code très lourd avec plusieurs dizaines d'instructions conditionnelles.

La solution que nous avons choisie a été d'utiliser la fonction *attachInterrupt* qu'offre la carte Arduino. En effet, elle permet d'utiliser des boutons poussoirs pour interrompre le code et lire une fonction particulière. Cette fonctionnalité se révèle donc très utile pour le bouton poussoir du mode 3 qui doit interrompre le mode 2. L'appui sur le bouton du mode 3 entraîne donc l'exécution de la fonction *executeMode3*. Cependant, cette solution ne résout pas totalement le problème car une fois que les instructions qui étaient dans la fonction *executeMode3* ont été lues, le programme reprend exactement à l'endroit où il était, à savoir en plein milieu du mode 2. Cela aura donc pour effet de continuer à faire bouger les pieds (après le spasme de douleur lié à la coupure) pendant jusqu'à une minute, alors qu'ils seront censés être immobiles (morts).

C'est là qu'intervient l'utilité de la fonction *setAngle(position)* qui était appelée. Cette fonction fait bouger les servomoteurs à la position demandée en argument uniquement si le mode est le mode 2. Dans le cas contraire, la fonction *setAngle* donnera une autre instruction qui dépend du mode actuel. Ainsi, l'instruction dans *executeMode3* modifie la valeur de mode, ainsi, lorsque le code reprend au milieu des instructions correspondant au mode 2, la fonction *setAngle* est toujours lue mais ne suit pas les consignes comme s'il était en mode 2.

Une autre subtilité est que la fonction *delay()* ne peut pas être utilisée dans une interruption. C'est pourquoi les instructions du mode 3 seront lues dans la fonction *setAngle*. Ainsi, la fonction *executeMode3()* se charge de changer le mode en un mode de transition (noté mode 23). La fonction qui la succède se chargera d'exécuter les actions du mode 3.

On note enfin que le mode 1 doit également être mis en mode interruption car celui-ci est activé à la toute fin après que les pieds soient à nouveau vivant une fois que les tables sont recollées. On a donc la structure de code suivante :

```

void setup() {
    //initialisation de toutes les entrées et sorties

```

```

    attachInterrupt(pinMode1,executeMode1);
    attachInterrupt(pinMode3,executeMode3);
}

void loop() {
    if(digitalRead(pinMode2)){
        mode = 2 ;
    }if(digitalRead(pinMode4)){
        mode = 2 ;        //on active temporairement ce mode pour
pouvoir donner des consignes au moteur.
        //consignes moteur.
        mode = 4 ;
    }

    if(mode==2){
        //Consignes mode 2
    }
}

void executeMode1(){
    //Consignes en mode 1
    mode = 1 ;
}

void executeMode3(){
    mode = 23
}

void setAngle(position){
    if(mode==2){
        servo1.write(position) ;
        servo2.write(position) ;
    }
    if(mode==23){
        //Consignes en mode 3
        mode = 3 ;
    }
}
}

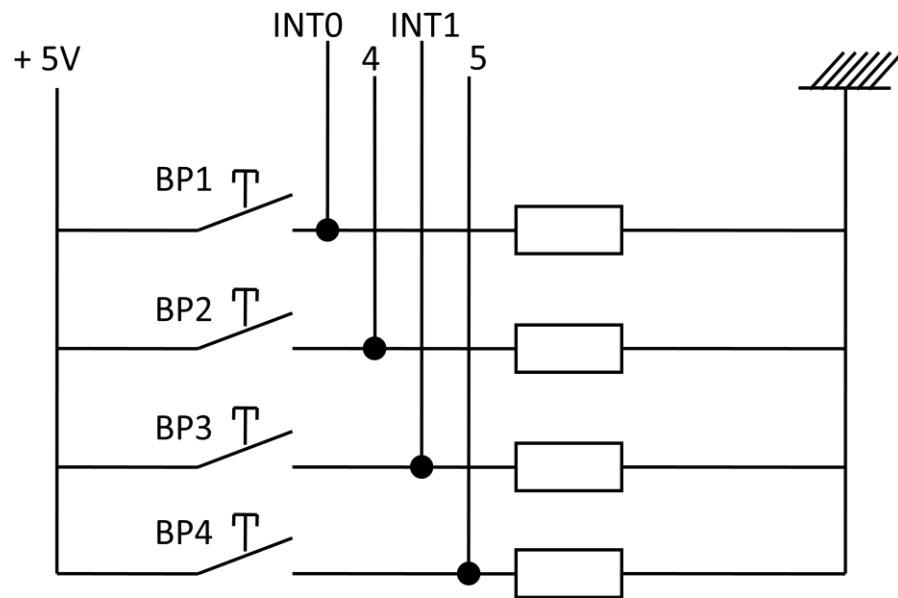
```

Avec cette structure, le code est donc fonctionnel et permet de faire bouger les deux pieds comme de vrais pieds. Cependant, ceux-ci ne se déplacent pas différemment rendant l'effet légèrement moins réaliste. La structure matérielle avec deux servomoteurs permet de donner des mouvement différents aux pieds mais demande un code un peu plus sophistiqué dans la mesure où il faut gérer les fonction *delay()* de manière plus complexe entre chaque consigne de position. Cette amélioration est envisagée par la suite d'ici le spectacle.

Montage du matériel

Enfin, il faut effectuer le montage de tout le matériel, à savoir, deux servomoteurs branchés aux pins 9 et 10 et quatre boutons poussoirs pour contrôler les modes. L'utilisation de ces boutons poussoirs implique l'utilisation de résistances élevées (nous avons choisis 22 k Ω).

Ainsi, nous obtenons le montage suivant pour les boutons poussoirs :



Bilan des coûts de la GI

Partie mécanique	+ 600.81€
Partie électronique	+ 296.84 €
Coût brut GI	= 897.65 €

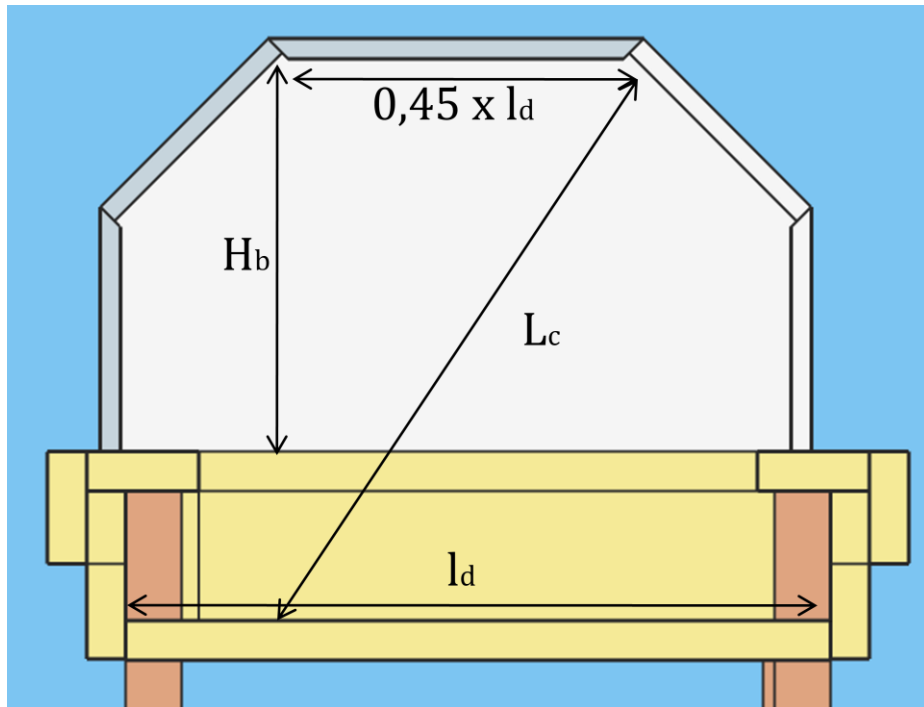


Subventions Fondation ECP	- 450.00 €
Matériel électronique du Lisa	
- 2 servomoteurs Jumbo	- 2 * 240.00 €
- 1 carte Arduino Uno	- 16.25 €
Coût effectif GI	= 191.40 €

Annexes

Consignes d'ajustement

Dans ce document, nous définirons les dimensions du corps du magicien qui peuvent dimensionner la GI, si l'on souhaite réaliser une GI « sur mesure ».



Dimensions utiles du corps du magicien :

- Hauteur : H_m
- Longueur du dos (mesuré du bas du bassin aux épaules) : L_m
- Largeur d'épaule : l_e
- Longueur de la cuisse (mesurée du bas du bassin au haut du genou) : L_c

Dimensions de la GI à calculer en fonction :

- longueur de chaque table : L_t
- largeur de la table : l_t
- hauteur de la table : H_t
- longueur du double-fond : L_d
- largeur du double fond : l_d
- hauteur du double-fond : H_d
- longueur de la boîte : L_b
- largeur de la boîte : l_b
- hauteur de la boîte : H_b

Formules d'adaptation :

- Pour la **table** :

$$L_t = \frac{1.1 * H_m}{2}$$

$$l_t = 1.25 * l_e + 30$$

Enfin, la hauteur de la table est laissée à l'appréciation du magicien. Nous avons choisi une hauteur permettant de s'asseoir facilement sur la table.

$$H_t = 64\text{cm}$$

Mais d'autres paramètres indépendants de la taille du magicien peuvent être pris en compte dans le dimensionnement de cette hauteur : par exemple la gestion des angles de vue (en cas d'estrade ou de gradins) pour éviter que le double-fond ne soit visible.

- Pour le **double-fond** :

$$L_d = L_m + 5$$

$$l_d = 1.15 * l_e$$

La hauteur/profondeur du double-fond est fixée indépendamment. Elle a été maximisée dans la limite où l'épaisseur apparente de la table, qui dissimule le double-fond ne choquait pas le spectateur.

$$H_d = 15\text{cm}$$

- Pour la **boîte** :

$$l_b = 1.25 * l_e + 15$$

$$H_b = \sqrt{L_c^2 - (0.45 * l_d)^2} - 15$$

Manuel d'utilisation

Consignes de présentation du tour : *point de vue du spectateur*

- 1) Le Loup s'allonge sur les tables : une moitié du corps sur chaque table ;
- 2) Le Magicien installe les 2 caissons : un pour chaque moitié du corps. La tête du Loup dépasse à une extrémité de la boîte, ses pieds de l'autre côté ;
- 3) Le Magicien soulève le rideau du caisson du haut : il montre le corps du Loup, puis il rebaisse le rideau ;
- 4) Le Loup agite sa tête et ses pieds pour montrer qu'il est bien dans la boîte ;
- 5) Le Magicien sort les lames qu'il montre tranchantes ;
- 6) Le Magicien soulève le rideau du caisson du bas : il montre les jambes du Loup, puis il rabaisse le rideau ;
- 7) Rapidement après, il coupe la boîte en deux avec les lames ;
- 8) Les deux parties sont séparées pour montrer qu'il y a bien eu coupure ;
- 9) Le Loup agite ses pieds malgré la coupure ;
- 10) Les deux parties sont réassemblées et les lames ôtées ;
- 11) Le Magicien enlève les caissons ;
- 12) Le Loup apparaît indemne.

- 3) Le Loup s'allonge sur les tables. Sur la table du haut, son haut du corps est en appui sur les volets du double fond à deux endroits : sur ses épaules et sur le bas du dos. Sur la table du bas, ses jambes sont pliées vers le haut ;
- 4) Le Magicien installe le caisson du haut : celui dont dépasse la tête ;
- 3) Le Magicien installe le caisson du bas ;
- 3) Le Magicien lance le Mode 1 de mouvement des pieds : sortie des pieds ;
- 4) Lors de l'installation, le Loup fait comme s'il déplaçait les jambes, mais il fait en fait sortir dans ce mouvement les pieds électroniques sur glissière ; les jambes du Loup sont recroquevillées dans sa boîte ;
- 5) Le Magicien lance le Mode 2 : les pieds sont « vivants » ;
- 4) Le Magicien soulève le rideau du haut pour montrer que le Loup a bien le haut du corps dans la boîte ; puis baisse à nouveau le rideau ;

Description des modes de mouvements des pieds électroniques :

- 1) **Mode 0 : par défaut, les pieds sont statiques à 90°.** Ce mode permet de ranger les pieds électroniques dans le caisson, sans qu'ils ne risquent de sortir ;
- 2) **Mode 1 : les pieds sont statiques à 30°.** Ce mode permet de sortir/renter les pieds du caisson, à travers l'ouverture pratiquée dans le caisson du bas ;
- 3) **Mode 2 : les pieds sont « vivants ».** Dans ce mode, les pieds électroniques réalisent des mouvements de faible amplitude en continu : cela permet de donner l'illusion que ce sont des vrais pieds mobiles ;
- 4) **Mode 3 : les pieds « meurent ».** A la découpe, les pieds reproduisent les spasmes de douleur : ils font des mouvements de grande amplitude rapide, puis restent statiques ;
- 5) **Mode 4 : les pieds se « testent ».** Dans ce mode, les pieds pour montrer qu'ils sont de nouveau vivants réalisent des mouvements de grande amplitude réguliers.

Consignes de réalisation du tour : *point de vue du magicien*

- 1) Le Loup s'allonge sur les tables. Sur la table du haut, son haut du corps est en appui sur les volets du double fond à deux endroits : sur ses épaules et sur le bas du dos. Sur la table du bas, ses jambes sont pliées vers le haut ;
- 2) Le Magicien installe le caisson du haut : celui dont dépasse la tête ;
Le Magicien installe le caisson du bas ;
Le Magicien lance le Mode 1 de mouvement des pieds : sortie des pieds ;
Lors de l'installation, le Loup fait comme s'il déplaçait les jambes, mais il fait en fait sortir dans ce mouvement les pieds électroniques sur glissière ; les jambes du Loup sont recroquevillées dans sa boîte ;
- 3) Le Magicien lance le Mode 2 : les pieds sont « vivants » ;
Le Magicien soulève le rideau du haut pour montrer que le Loup a bien le haut du corps dans la boîte ; puis baisse à nouveau le rideau ;
Le Magicien déverrouille les volets rabattant du double-fond : celui du haut, puis celui du bas ;
- 5) Le Magicien fait son discours en prenant les lames pour laisser au Loup le temps de ramener ses jambes et de se recroqueviller dans le double ;
- 6) Le Magicien soulève le deuxième rideau pour montrer que ses jambes sont bien dans la deuxième boîte : il s'agit en fait de la fausse (demi-)jambe reliée au dispositif électronique ;
- 7) Le Magicien baisse le rideau et rapidement après coupe le Loup en deux avec les lames ; ces lames permettent de cacher l'intérieur des boîtes ;
Le Magicien lance le Mode 3 : les pieds « meurent » ; les pieds du Loup bougent dans un dernier sursaut de vie ;
- 8) Les roulettes des tables sont déverrouillées et les deux tables sont séparées ;
- 9) Le Magicien lance le Mode 4 : les pieds se « testent » ;
La tête du Loup, ainsi que les pieds électroniques bougent pour faire croire qu'ils appartiennent toujours à la même personne ;
- 10) Les deux tables sont réassemblées, les roulettes déverrouillées et les lames ôtées ;
Le Loup sort du double-fond et replace ses jambes dans le caisson inférieur ;
Le Magicien reverrouille les volets rabattants : celui du bas, puis celui du haut ;
- 11) Le Magicien enlève le caisson du haut ;
Le Magicien lance le Mode 1 : rentrée des pieds ;
Le Magicien enlève le caisson du bas ; dans le même temps, dans le geste de plier ses jambes, le Loup rentre les pieds électroniques dans le caisson en utilisant ses propres pieds ;
- 12) Le Loup apparaît indemne sur la table.

Code Arduino

```
#include <Servo.h>

int pinServo1=9;
int pinServo2 = 10 ;
int pinMode1 = 0;
int pinMode2 = 4 ;
int pinMode3 = 1 ;
int pinMode4 = 5 ;
int mode = 0;
Servo myServo1 ;
Servo myServo2 ;

void setup() {
  myServo1.attach(pinServo1);
  myServo2.attach(pinServo2);
  attachInterrupt(pinMode1,
executeMode1, FALLING);
  attachInterrupt(pinMode3,
executeMode3, FALLING);
  pinMode(pinMode2,INPUT);
  pinMode(pinMode4,INPUT);
  Serial.begin(9600) ;
  mode = 0 ; setAngle(90) ;
}

//boucle principale
void loop() {
  if((digitalRead(pinMode2))){
    if((mode==1)||(mode==4)){
      mode = 2 ;
      Serial.println("En mode2");
    }
  }
  if((digitalRead(pinMode4))){
    if(mode==3){
      mode = 2 ;
      setAngle(60) ; delay(200);
      setAngle(90) ; delay(200);
      setAngle(65) ; delay(200);
      setAngle(95) ; delay(200);
      mode = 4 ;
      Serial.println("En mode4");
    }
  }

  if(mode==2){
    setAngle(92);delay(33);
    setAngle(91);delay(33);
    setAngle(92);delay(1000);
    setAngle(91);delay(1033);
    setAngle(90);delay(166);
    setAngle(91);delay(599);
    setAngle(92);delay(299);
    setAngle(91);delay(33);
    setAngle(90);delay(33);
    setAngle(89);delay(133);
    setAngle(88);delay(33);
    setAngle(89);delay(199);
    setAngle(88);delay(99);
    setAngle(87);delay(133);
    setAngle(88);delay(66);
    setAngle(89);delay(133);
    setAngle(91);delay(66);
    setAngle(92);delay(66);
    setAngle(94);delay(99);
    setAngle(96);delay(99);
    setAngle(97);delay(299);
    setAngle(96);delay(2733);
    setAngle(95);delay(299);
    setAngle(94);delay(99);
    setAngle(93);delay(133);
    setAngle(92);delay(33);
    setAngle(93);delay(33);
    setAngle(92);delay(33);
    setAngle(91);delay(233);
    setAngle(89);delay(66);
    setAngle(88);delay(166);
    setAngle(91);delay(66);
    setAngle(94);delay(33);
    setAngle(96);delay(33);
    setAngle(97);delay(33);
    setAngle(99);delay(33);
    setAngle(91);delay(66);
    setAngle(92);delay(199);
    setAngle(93);delay(1133);
    setAngle(94);delay(433);
    setAngle(93);delay(133);
    setAngle(94);delay(166);
    setAngle(96);delay(133);
    setAngle(95);delay(33);
    setAngle(94);delay(33);
    setAngle(93);delay(66);
    setAngle(94);delay(433);
    setAngle(93);delay(33);
    setAngle(94);delay(33);
    setAngle(93);delay(1066);
    setAngle(94);delay(166);
    setAngle(95);delay(66);
    setAngle(94);delay(233);
    setAngle(93);delay(933);
    setAngle(92);delay(333);
    setAngle(93);delay(66);
    setAngle(94);delay(133);
    setAngle(93);delay(199);
    setAngle(94);delay(66);
    setAngle(95);delay(99);
    setAngle(96);delay(33);
    setAngle(97);delay(33);
    setAngle(99);delay(33);
    setAngle(100);delay(33);
    setAngle(101);delay(66);
    setAngle(102);delay(33);
    setAngle(103);delay(33);
    setAngle(104);delay(33);
    setAngle(103);delay(33);
    setAngle(102);delay(33);
    setAngle(101);delay(33);
    setAngle(99);delay(33);
    setAngle(98);delay(33);
    setAngle(96);delay(33);
    setAngle(94);delay(166);
    setAngle(95);delay(199);
    setAngle(94);delay(166);
    setAngle(93);delay(99);
    setAngle(92);delay(33);
    setAngle(91);delay(66);
    setAngle(93);delay(66);
    setAngle(94);delay(99);
    setAngle(96);delay(99);
    setAngle(97);delay(299);
    setAngle(96);delay(2733);
    setAngle(95);delay(299);
    setAngle(94);delay(99);
    setAngle(93);delay(133);
    setAngle(92);delay(33);
    setAngle(93);delay(33);
    setAngle(92);delay(33);
    setAngle(91);delay(233);
    setAngle(89);delay(66);
    setAngle(88);delay(166);
    setAngle(91);delay(66);
    setAngle(94);delay(33);
    setAngle(96);delay(33);
    setAngle(97);delay(33);
    setAngle(99);delay(33);
```

```

    setAngle(98);delay(66);
    setAngle(97);delay(233);
    setAngle(96);delay(33);
    setAngle(95);delay(133);
    setAngle(94);delay(33);
    setAngle(93);delay(133);
    setAngle(92);delay(166);
    setAngle(94);delay(233);
    setAngle(96);delay(66);
    setAngle(97);delay(33);
    setAngle(98);delay(66);
    setAngle(99);delay(66);
    setAngle(97);delay(66);
    setAngle(96);delay(233);
    setAngle(97);delay(300);
    setAngle(98);delay(66);
    setAngle(99);delay(133);
    setAngle(98);delay(33);
    setAngle(97);delay(33);
    setAngle(96);delay(33);
    setAngle(95);delay(233);
    setAngle(94);delay(233);
    setAngle(95);delay(33);
    setAngle(96);delay(600);
    setAngle(97);delay(66);
    setAngle(98);delay(100);
    setAngle(99);delay(66);
    setAngle(98);delay(333);
    setAngle(97);delay(66);
    setAngle(96);delay(200);
    setAngle(94);delay(133);
    setAngle(93);delay(100);
    setAngle(96);delay(666);
    setAngle(95);delay(133);
    setAngle(94);delay(66);
    setAngle(93);delay(100);
    setAngle(94);delay(166);
    setAngle(95);delay(100);
    setAngle(96);delay(200);
    setAngle(97);delay(200);
    setAngle(99);delay(66);
    setAngle(100);delay(66);
    setAngle(98);delay(1066);
    setAngle(99);delay(233);
    setAngle(98);delay(200);
    setAngle(97);delay(33);
    setAngle(96);delay(33);
    setAngle(94);delay(400);
    setAngle(96);delay(33);
    setAngle(97);delay(66);
    setAngle(98);delay(933);
    setAngle(97);delay(66);
    setAngle(96);delay(600);
    setAngle(95);delay(2200);
}

    setAngle(96);delay(1133);
    setAngle(95);delay(466);
    setAngle(92);delay(33);
    setAngle(89);delay(33);
    setAngle(86);delay(100);
    setAngle(88);delay(33);
    setAngle(90);delay(33);
    setAngle(92);delay(33);
    setAngle(94);delay(33);
    setAngle(95);delay(1366);
    setAngle(94);
}
}

void executeMode1(){
    if((mode==0)||(mode==2)){
        mode = 2 ;
        setAngle(30) ;
        mode = 1 ;
        Serial.println("En mode1");
    }
}

void executeMode3(){
    if(mode==2){
        mode = 23 ; //Mode 23 correspond
        // à la transition entre le mode 2 et 3
    }
}

void setAngle(int a){
    if((mode == 2)){
        myServo2.write(a);
        myServo1.write(160-a);
    }
    if((mode == 23)){
        myServo1.write(70);
        myServo2.write(160-70);
        delay(200);
        myServo1.write(80);
        myServo2.write(160-80);
        delay(300);
        myServo1.write(70);
        myServo2.write(160-70);
        delay(200);
        myServo1.write(90);
        myServo2.write(160-90);
        delay(700);
        myServo1.write(60);
        myServo2.write(160-60);
        mode = 3;
        Serial.println("En mode3");
    }
}
}

```


Excel des positions

Voici un extrait de l'Excel des positions pour les 10 premiers pointages des positions du pied.

t (s)	X	Y	X-X0	Y-Y0	R	Temps	Theta	Theta entier	Delai	Code
0	0.228	0.2375	0.01	0.26	0.069	0	2.1464	92	0	setAngle(92);
0.03	0.228	0.2375	0.01	0.26	0.069	0.033333333	2.1464	92	33.333	
0.07	0.224	0.2375	0.007	0.26	0.069	0.066666667	1.4368	91	33.333	delay(33); setAngle(91);
0.1	0.229	0.2375	0.011	0.26	0.069	0.1	2.3828	92	33.333	delay(33); setAngle(92);
0.13	0.229	0.2375	0.011	0.26	0.069	0.133333333	2.3828	92	66.667	
0.17	0.229	0.2375	0.011	0.26	0.069	0.166666667	2.3828	92	100	
0.2	0.229	0.2375	0.011	0.26	0.069	0.2	2.3828	92	133.33	
0.23	0.229	0.2375	0.011	0.26	0.069	0.233333333	2.3828	92	166.67	
0.27	0.228	0.2397	0.01	0.26	0.07	0.266666667	2.1288	92	200	

Explication des colonnes :

- **t (s)** : Temps en secondes repéré par le logiciel de pointage
- **X** : Position en abscisse du pointage
- **Y** : Position en ordonnée du pointage
- **X-X0** : Différence d'abscisse par rapport au centre estimé de la rotation
- **Y-Y0** : Différence d'ordonnée par rapport au centre estimé de la rotation
- **R** : Rayon calculé : $\text{RACINE}((X-X0)^2+(Y-Y0)^2)$. Cette valeur est censée être constante à des erreurs de précision près.
- **Temps** : Temps précis en utilisant le pas de temps correspondant au nombre d'images par secondes de la vidéo (1/30).
- **Theta** : Angle en degrés calculé en utilisant la fonction Arctan
- **Theta entier** : Partie entière de l'angle à laquelle on ajoute 90 degrés pour correspondre aux consignes à donner au servomoteur.
- **Delai** : Délai calculé entre chaque changement d'angle. Ce sera le délai de pause entre chaque consigne envoyée au servomoteur.
- **Code** : Code correspondant aux consignes, si l'angle ne change pas, il n'y a pas d'instruction.

La concaténation de toute la colonne code a permis d'obtenir le code global à insérer dans l'exécution du mode 2.