

École polytechnique de Louvain

Conception et fabrication d'un système d'aide à l'apprentissage du vélo

Auteur: **Adrien ROISIN**

Promoteur: **Paul FISETTE**

Lecteurs: **Bruno DEHEZ, Quentin DOCQUIER, Hervé JEANMART**

Année académique 2018–2019

Master [120] : ingénieur civil mécanicien

Abstract (version française)

L'apprentissage du vélo est une étape symbolique durant l'enfance. Durant celui-ci, l'apprenant doit faire appel à son sens de l'équilibre, à sa maîtrise de la trajectoire ainsi qu'à la coordination des ces 2 points clés. Le vélo amène donc l'enfant à relever un nouveau défi et l'oblige à prendre confiance en lui. D'abord aidé de petites roues fixées à l'arrière, la plupart des enfants passent assez rapidement à la pratique du vélo sans aucune aide extérieure. Néanmoins, certains d'entre eux peuvent être confrontés à des difficultés d'apprentissage qui peuvent leur paraître insurmontables. Ces difficultés sont régulièrement liées à un handicap physique et peuvent les amener à se décourager et à abandonner. Afin de palier à ce problème, des écoles d'apprentissage ont mis en oeuvre une solution de stabilisation du vélo à l'aide d'un système de rouleau bombé placé à l'arrière de celui-ci. Cette solution est confrontée à 2 imperfections à savoir : une courbure imparfaite au centre du rouleau, ce qui amène des instabilités dynamiques et un manque de polyvalence car le système n'est adapté qu'à une seule taille de vélo. Le but de ce mémoire est de proposer une solution alternative résolvant ces 2 problématiques. Afin de palier à celles-ci, ce travail suit une démarche de conception allant du cahier des charges jusqu'à la proposition d'un premier prototype. Plusieurs solutions sont décrites puis évaluées. La solution sélectionnée est celle appliquant le principe des roues de friction. Ce système permet d'éviter une courbure imparfaite du rouleau. Il permet également, grâce au bon dimensionnement des pièces maîtresses, de s'adapter à plusieurs tailles de vélo (allant de 16 à 26 pouces). Une analyse de stabilité dynamique avec l'aide de robotran propose ensuite une validation du modèle et confirme l'utilité d'un tel système.

Abstract (english version)

Learning to ride a bike is a symbolic step in childhood. During this one, the learner must appeal to his sense of balance, his control of the trajectory as well as the coordination of these 2 key points. Cycling brings the child to a new challenge and requires him to gain self-confidence. First of all, with small wheels attached to the back, most children move quickly to cycling without any outside help. Nevertheless, some of them may face learning difficulties that may seem insurmountable. These difficulties are regularly linked to a physical disability and can cause them to become discouraged and give up. In order to overcome this problem, apprenticeship schools have implemented a solution for stabilizing the bicycle using a curved roller system placed at the rear of the latter. This solution is faced with two imperfections namely : imperfect curvature in the center of the roller which brings dynamic instabilities and a lack of versatility because the system is only suitable for one bike size. The goal of this thesis is to propose an alternative solution solving these 2 problems. In order to overcome these, this work follows a design process ranging from the specifications to a proposal for the first prototype. Several solutions are described and evaluated. The solution selected is that applying the principle of friction wheels. This system makes it possible at the same time to avoid an imperfect curvature of the roll. It also allows, thanks to the good sizing of the centerpieces, to adapt to several

bike sizes (from 16 to 26 inches). A dynamic stability analysis with the help of robotran then proposes a validation of the model and confirms the usefulness of such a system.

Remerciements

La première personne que je tiens à remercier est mon promoteur, le Professeur Paul Fiset pour l'ensemble de ses conseils et pour le temps qu'il m'a accordé. Je tiens aussi à le remercier pour les échanges constructifs que nous avons eu l'occasion d'avoir.

Je tiens ensuite à remercier l'assistant responsable de mon encadrement, Quentin Docquier, pour le temps et les conseils qu'il m'a prodigué ainsi que pour la proposition de ce sujet d'étude très intéressant.

Ensuite, je voulais remercier monsieur Benoit Herman pour ses nombreux conseils concernant la validation de mes plans d'usinage.

Je remercie Manon Vatlet qui m'a aidé dans le cadre du projet de "vehicule Dynamics" lié à ce mémoire.

Je voulais remercier tout spécialement Maïté Croonenborghs et Anne-Sophie Collin pour la relecture et la correction de ce document.

Enfin, je remercie ma famille pour le soutien apporté tout au long de mes études.

Table des matières

Abstract (version française)	2
Abstract (english version)	2
Remerciements	4
Liste des figures	9
Liste des tableaux	10
1 Remise en contexte	11
2 Démarche de conception	13
2.1 Cahier des charges	13
2.2 Conception partielle	15
2.2.1 Roue de Friction	16
2.2.2 Transmission par courroie/chaine	24
2.2.3 Choix d'un modèle	27
2.3 Dimensionnement & CAO	28
2.3.1 Les différents organes du prototype	28
2.3.2 La première roue de friction	29
2.3.3 La roue de friction intermédiaire	31
2.3.4 Le rouleau	32
2.3.5 Les bras de liaison	34
2.3.6 Le système de fixation au vélo	41
2.4 Système de freinage	42
2.4.1 Transmission de la friction par un système en croix	42
2.4.2 Transmission de la friction par câble bowden	43
2.4.3 Système choisi : le câble Bowden	43
2.5 Prototypage	45
2.5.1 Pièces choisies dans un catalogue constructeur	45
2.5.2 Pièces solidarisiées par soudage	46
2.5.3 La plaque de fixation du vélo	46
2.5.4 Les plaques de fixation de la première roue de friction	46
2.5.5 Le tube de la glissière de réglage de la roue intermédiaire	47
2.5.6 La glissière verticale qui permet le réglage en hauteur du système	47
2.6 Notice de montage	48
2.6.1 Montage de la première roue de friction (A)	48
2.6.2 Montage de la roue de friction intermédiaire (B)	48
2.6.3 Montage de la glissière de réglage de la roue de friction intermédiaire	49
2.6.4 Montage des barres de support côté gauche (C)	50
2.6.5 Montage des barres de support côté droit (D)	51
2.6.6 Assemblage des 2 roues de friction (E)	52

2.6.7	Montage du rouleau	53
2.6.8	Assemblage des glissières de réglage vertical et du rouleau (F) . .	53
2.6.9	Assemblage du rouleau et des roues de friction	54
2.6.10	Montage et assemblage du système de fixation au reste du prototype	55
2.6.11	Montage et assemblage du système de freinage au reste du prototype	56
3	Analyse de la stabilité	59
3.1	Modèle et formalismes	59
3.2	Contextualisation	60
3.3	Modélisation d'un vélo adulte	62
3.4	Roulement sans glissement	62
3.4.1	Explications	62
3.4.2	Comparaison modèle adulte RSG et Schwab	63
3.5	Modélisation d'un vélo enfant	65
3.5.1	Modèle du vélo enfant	65
3.5.2	Comparaison modèle enfant et adulte	66
3.5.3	Ajout d'un rouleau à la roue arrière	67
3.5.4	Ajout de l'inertie du rouleau	71
3.6	Discussion sur l'analyse de stabilité	74
4	Conclusion	75
A	1ère roue de friction	78
B	2ème roue de friction	79
C	rouleau	81
D	Bras de liaison	83
E	Bras de fixation	101

Table des figures

1.1	Système existant [3]	11
1.2	Discontinuité dans la courbure	11
2.1	Transmission par roues de friction	15
2.2	Transmission par courroie/chaîne	15
2.3	Modèle général du système à roue de friction	16
2.4	Sens de rotation des roues	17
2.5	Réglage du système	17
2.6	Distance minimum	18
2.7	Train épicycloïdal intégré dans le moyeu de la première roue.	19
2.8	Système de transmission de vitesse utilisant 2 roues intermédiaires coaxiales.	19
2.9	Train épicycloïdal pour un vélo [5]	19
2.10	Taille maximum de la roue 2	20
2.11	Distance maximum	20
2.12	Schéma roues coaxiales	21
2.13	Roues coaxiales modèle solidworks	21
2.14	Schéma de la roue 2	22
2.15	Schéma des roues de friction	22
2.16	Taille maximum de la roue 2	22
2.17	Distance maximum	23
2.18	Modèle général du système à courroie	25
2.19	Schéma du système à courroie	25
2.20	Configuration 16 pouces, 1 roue de friction	26
2.21	Configuration 26 pouces, 1 roue de friction	26
2.22	Configuration 16 pouces, 2 roues de friction	26
2.23	Configuration 26 pouces, 2 roues de friction	26
2.24	Configuration 16 pouces, courroie/chaîne	26
2.25	Configuration 26 pouces, courroie/chaîne	26
2.26	Vue général du prototype	28
2.27	Mise en contexte de la première roue de friction	29
2.28	Première roue de friction	29
2.29	Moyeu d'un vélo	29
2.30	Cassette de 3 pignons	29
2.31	Moyeu usiné	30
2.32	Assemblage de la première roue de friction	30
2.33	Arbre de la seconde roue de friction	31
2.34	Roulement à flasque	31
2.35	Roue de friction intermédiaire	31
2.36	Assemblage de la seconde roue de friction	32
2.37	Arbre du rouleau	33
2.38	Roulements du rouleau	33
2.39	Rouleau bombé	33
2.40	Assemblage du rouleau	33

2.41	Plaque de fixation de la première roue de friction	34
2.42	Glissière de réglage de la roue de friction intermédiaire	34
2.43	Barre intermédiaire du pantographe	34
2.44	Barre intermédiaire fixée au rouleau	34
2.45	Glissière de réglage en hauteur du système	34
2.46	Plaque de fixation à la première roue de friction	35
2.47	Tige couissant dans la glissière	36
2.48	Tube de la glissière	36
2.49	Clapet de blocage de la glissière	36
2.50	Assemblage de la glissière de réglage de la seconde roue de friction	36
2.51	Barre intermédiaire fixée entre la fixation de la première roue de friction et le point de pivot du pantographe	37
2.52	Barre intermédiaire fixée au rouleau	38
2.53	Glissière de réglage en hauteur du système	39
2.54	Glissière en aluminium	40
2.55	Glissière en acier	40
2.56	Vue générale du système de fixation	41
2.57	Tige de la glissière	41
2.58	Patte de fixation	41
2.59	Plaque de fixation	41
2.60	Système en croix	42
2.61	Câble Bowden [7]	43
2.62	Vue général du système de frein	44
2.63	Plaque fixée au prototype	44
2.64	Plaque fixée au vélo	44
2.65	Roulements du prototype	45
2.66	Pignons du prototype	45
2.67	Moyeu du prototype	45
2.68	Plaque usinée	46
2.69	Tube usiné	46
2.70	Tube usiné	46
2.71	Plaque usinée	46
2.72	Pièce en "H"	46
2.73	Pièce en U	47
2.74	Tube usiné	47
2.75	Poutre en arc de cercle	47
2.76	Plaque en "L"	47
2.77	Assemblage de la première roue de friction	48
2.78	Assemblage de la roue de friction intermédiaire	48
2.79	Assemblage de la glissière de réglage intermédiaire	49
2.80	Assemblage bras gauche (partie 1)	50
2.81	Assemblage bras gauche (partie 2)	50
2.82	Assemblage bras droit (partie 1)	51
2.83	Assemblage bras droit (partie 2)	51

2.84	Assemblage des 2 roues de friction	52
2.85	Roues de friction assemblées (E)	52
2.86	Assemblage du rouleau	53
2.87	Assemblage des glissières de réglage vertical (F)	53
2.88	Assemblage parties (E) et (F)	54
2.89	Assemblage des bras de liaison au rouleau	54
2.90	Assemblage de la glissière de fixation	55
2.91	Assemblage de la glissière de fixation et du prototype	55
2.92	Assemblage de la glissière de frein	56
2.93	Assemblage des patins de frein	56
2.94	Assemblage du câble Bowden	56
2.95	Ensemble du système de frein assemblé	57
2.96	Fixation du système de frein au prototype	57
3.1	Modèle de vélo de Schwab [4]	60
3.2	Valeurs propres de l'analyse de stabilité de Schwab [4]	61
3.3	Robotran adulte	62
3.4	Distribution de vitesse dans une roue en RSG	63
3.5	Degrés de libertés restants après application des contraintes	63
3.6	Validation du modèle adulte RSG avec celui de Schwab	64
3.7	Vélo enfant 20" utilisé dans le modèle [15]	65
3.8	Masses du modèle enfant	65
3.9	Dimensions pour le modèle enfant	65
3.10	Solidworks cadre/enfant	65
3.11	Différence entre les deux modèles	66
3.12	Géométrie d'un rouleau (rayon courbure : 60cm)	67
3.13	Calcul du rayon de roulement	67
3.14	Différents rayons de courbure considérés	68
3.15	Influence de l'ajout d'un rouleau et de différents rayons de courbure pour une faible inclinaison	68
3.16	Influence de l'ajout d'un rouleau et de différents rayons de courbure pour une inclinaison plus importante	69
3.17	Influence de l'angle d'inclinaison ; courbure = 0.3 m	70
3.18	Influence de l'angle d'inclinaison courbure = 3 m	71
3.19	Visualisation de la géométrie d'un rouleau réaliste (rayon courbure : 90cm)	71
3.20	Différents rouleaux considérés	72
3.21	Comparaison de la stabilité du modèle entre l'inertie d'une roue et l'inertie d'un petit rouleau à 0 ° d'inclinaison et pour une courbure de 0.3 mètre	72
3.22	Comparaison de la stabilité du modèle entre l'inertie d'une roue et l'inertie d'un petit rouleau à 0 ° d'inclinaison et pour une courbure de 1.5 mètre	73
3.23	Comparaison de la stabilité du modèle entre l'inertie d'une roue et l'inertie d'un petit rouleau à 10 ° d'inclinaison et pour une courbure de 0.3 mètre	73
3.24	Comparaison de la stabilité du modèle entre l'inertie d'une roue et l'inertie d'un petit rouleau à 10 ° d'inclinaison et pour une courbure de 1.5 mètre	74

Liste des tableaux

1	Cahier des charges	14
2	Tableau des facteurs de compensation	24
3	Tableau du nombre de dents des pignons	24

1 Remise en contexte

L'apprentissage du vélo est une étape clé dans la vie d'un enfant. En effet, après avoir appris à marcher, à courir, le vélo donne à l'enfant le moyen de se déplacer encore plus vite et plus loin. Faisant appel à son équilibre, à sa maîtrise de la trajectoire et à la coordination entre les deux, le vélo amène un nouveau défi à relever et oblige l'enfant à prendre confiance en lui-même. D'abord aidé de petites roues fixées à l'arrière, la plupart des enfants passent assez rapidement à la pratique du vélo sans aucune aide extérieure. Le vélo est alors pour eux un moyen d'être valorisé vis à vis de leurs compères.

Néanmoins, si la plupart des enfants suivent ce schéma sur une période de temps plus ou moins réduite, certains d'entre eux n'ont pas cette chance. Que ça soit par manque de confiance en eux ou suite à un handicap quelconque, l'apprentissage du vélo peut, pour certains, paraître une tâche inaccessible.

Afin de permettre à ces enfants de franchir cette étape progressivement, des centres d'aide à l'apprentissage ont été constitués ([1] et [2]). Pour mener à bien leur mission, ils se sont équipés de vélos adaptés. Ces vélos sont constitués d'un cadre classique duquel on a remplacé la roue arrière par un système équipé d'un rouleau bombé pour augmenter sa stabilité en roulis (figure 1.2). Sur ces différents vélos, le rouleau est amovible ce qui leur permet de changer celui-ci pour ajuster la courbure à la progression de l'enfant. Un enfant qui débute verra son vélo équipé d'un rouleau dont le rayon de courbure sera très grand pour lui apporter un maximum de stabilité. Celui qui aura déjà acquis un peu d'expérience se verra, quant à lui, équipé d'un rouleau de plus en plus bombé pour diminuer cette stabilité en roulis et forcer l'enfant à apprendre l'équilibre progressivement.



FIGURE 1.1 – Système existant [3]



FIGURE 1.2 – Discontinuité dans la courbure

Bien que ce système amène des solutions adéquates pour aider les enfants dans leur apprentissage du vélo, il comporte des défauts principalement au niveau de la flexibilité. En effet, l'enfant étant amené à grandir, il devra changer de taille de vélo. Les centres d'apprentissage doivent donc s'équiper de toute une gamme de vélo des plus petits jusqu'aux premières tailles adultes équipés de ce système ce qui est impossible pour un

particulier. Un système plus polyvalent permettrait d'accompagner un enfant tout au long de son apprentissage au moyen d'un unique dispositif. Par ailleurs, comme on peut le constater sur la figure 1.2, le rouleau est entraîné par une courroie en son centre ce qui amène une rupture de continuité dans sa courbe. Cette discontinuité amène à des instabilités dynamiques au point critique du système, à savoir, le centre du rouleau.

Ce mémoire tente de répondre aux 2 problématiques suivantes : "Comment rendre le système plus polyvalent ?" et "Comment rendre le système dynamiquement plus adéquat que la version existante ?"

Ce travail est organisé autour de deux sections techniques principales. Premièrement, la démarche de conception est présentée dans la section 2. Deuxièmement, une analyse de stabilité est fournie dans la section 3. Suivant ces deux sections, une conclusion propose un résumé de l'ensemble du projet ainsi que des pistes d'amélioration.

La première section décrit l'ensemble de la démarche de conception suivie en commençant par le cahier des charges. Celui-ci met en évidence les différentes fonctions principales que le système doit fournir tout en précisant les contraintes qu'il est amené à respecter. Les sections suivantes décrivent en détail les étapes suivies pour mettre en oeuvre ce cahier des charges en passant par une conception partielle, des propositions de différentes solutions et le choix de celle qui est la plus adéquate. Ces choix sont bien évidemment motivés par les contraintes du système et par la facilité de mise en oeuvre. L'ensemble des éléments du système modélisés sous Solidworks sont présentés et détaillés lors de l'étape suivante. Ensuite viennent l'usinage et l'assemblage de ces pièces. Le prototype est décrit entièrement depuis son système d'actionnement jusqu'au système de frein en passant par le système de fixation. Les pièces commandées directement chez un fournisseur et les pièces solidarisées par soudage sont ensuite présentées. Pour finir, la première section est clôturée par une notice de montage précisant l'ordre et les consignes d'assemblage.

La seconde section présente une analyse de stabilité dynamique du vélo. Tout d'abord, un rappel sur le modèle et les formalismes utilisés est présenté. Ensuite, le document décrit les travaux entrepris par monsieur Schwab [4] dans son étude dynamique du comportement d'un vélo ainsi que les différents modes de stabilité auxquels celui-ci est soumis. Les hypothèses de modélisation sont ensuite présentées ainsi que le modèle en lui-même. Cette analyse a été réalisée à l'aide de Robotran. La comparaison des résultats entre ce modèle et celui présenté par monsieur Schwab permet de confirmer sa validité. Par après, celui-ci est adapté pour un vélo de taille enfant et un certain nombre d'analyses sont ensuite réalisées pour tester la stabilité de différents modèles de rouleaux.

2 Démarche de conception

La démarche de conception est constituée de 6 étapes principales. La première d'entre elles consiste à établir le cahier des charges (tableau 1) du système c'est à dire identifier les différentes fonctions et contraintes. Ensuite vient l'étape de réflexion lors de laquelle plusieurs dispositifs sont envisagés. La troisième étape consiste alors à les comparer et à sélectionner le meilleur d'entre eux. Ce système est alors dimensionné puis modélisé par une méthode conception assistée par ordinateur (CAO). Pour finir, l'ensemble des pièces conçues sont assemblées pour former le premier prototype.

2.1 Cahier des charges

Le système doit assurer plusieurs fonctions. Elles peuvent être classées en 2 catégories. La première apporte de la flexibilité quant aux supports utilisés à savoir, offrir plusieurs rapports de réduction entre le pédalier et la roue arrière, conserver le système de freinage présent sur le vélo et assurer un amortissement. La seconde permet de faciliter l'apprentissage de l'utilisateur en apportant une aide progressive à la stabilisation ainsi qu'un système d'anti-basculement. On trouve ensuite les différents requis fonctionnels liés à ces fonctions.

Par ailleurs, on y trouve aussi la liste des contraintes. On peut y mettre en évidence les contraintes de facilité d'installation et de réglage telles que les contraintes FC1, FC3, FC4, FC5 et FC7 et les contraintes d'usage telles que FC2 et FC6. A nouveau, des requis de contrainte y sont associés et permettent de préciser certains détails.

TABLE 1 – Cahier des charges

Docquier Q. Fisette P.	Roue arrière adaptée avec rouleau pour l'apprentissage du vélo	date : 24/12/16 version : 1.0
Contexte : L'apprentissage de la bicyclette n'est en général pas trivial et peut s'avérer encore plus difficile en cas de retard moteur chez l'enfant. Le développement d'une roue adaptée offrant une dynamique plus lente permettrait de faciliter l'apprentissage.		
Date	Fonctions	
24/09/18	F1 : Aider à la stabilisation d'un vélo enfant de manière progressive	
24/09/18	F3 : Offrir plusieurs rapports de réduction pédalier/roue arrière	
24/09/18	F4 : Conserver le système de freinage si existant	
24/09/18	F5 : Assurer une raideur/amortissement vertical arrière	
24/09/18	F6 : Offrir un système d'anti-basculement	
Date	Requis fonctionnels	
24/09/18	FP1.1 : Sur sol plat (type hall de sport)	
24/09/18	FP1.2 : Rayon ajustable en moins de 5 minutes	
24/09/18	FP3.1 : Rapports remplaçant des rapports installés préalablement	
24/09/18	FP4.1 : Système utilisant les patins déjà installés (pas de torpédo)	
24/09/18	FP5.1 : Raideur/amortissement de l'ordre d'un pneu de vélo	
24/09/18	FP6.1 : La roue doit fonctionner avec et sans le système d'anti-basculement	
Date	Contraintes	
24/09/18	FC1 : Compatible sur vélo enfant standard : Ø 16, 18, 20, 24, 26 pouces	
24/09/18	FC2 : Surface de contact rouleau/sol continue et de classe C1	
24/09/18	FC3 : L'ensemble pédalier/chaîne doit rester inchangé	
24/09/18	FC4 : Mise en place de la roue inférieure à 15 minutes	
24/09/18	FC5 : Transportable facilement (portable à une main)	
24/09/18	FC6 : Rouleau non déformable et permettant le montage de divers profile	
24/09/18	FC7 : Limiter l'utilisation d'outils	
Date	Requis de contraintes	
24/09/18	FC1.1 : Adaptable à différents rayons de roue arrière	
24/09/18	FC1.2 : Adaptable à différents écartements de fourche arrière	

2.2 Conception partielle

Afin de déterminer la meilleure solution qui respecte les contraintes énoncées dans le cahier des charges, une méthodologie séquentielle a été utilisée.

Les premiers points abordés sont la continuité dans la courbure du rouleau, le système d'actionnement de ce dernier et enfin, la polyvalence de celui-ci.

En ce qui concerne le système d'actionnement et la continuité dans la courbure du rouleau, 2 solutions ont été envisagées. La première consiste à transmettre le couple d'actionnement au moyen de roues de friction (figure 2.1) et est présentée à la section 2.2.1. La seconde reprend la transmission par courroie proposée par les systèmes déjà existants mais en actionnant le rouleau par une de ses extrémités pour éviter toute discontinuité au sur la courbure de celui-ci (figure 2.2). Elle est présentée à la section 2.2.2.

Pour ce qui est de la polyvalence, le système est amené à être fixé à différentes tailles de vélo. La distance entre l'axe d'actionnement et le point de contact avec le sol doit donc être paramétrable pour éviter que le vélo ne soit incliné soit vers l'avant, soit vers l'arrière. Pour palier à ce problème, un système de glissière verticale de réglage a été envisagé. Ensuite, le système doit permettre à l'enfant, pour une même vitesse de pédalage, d'avancer à la même vitesse que le vélo dans sa configuration d'origine. Et enfin, le système de frein doit pouvoir être réutilisé sans modification ce qui nécessite un niveau de polyvalence supplémentaire.

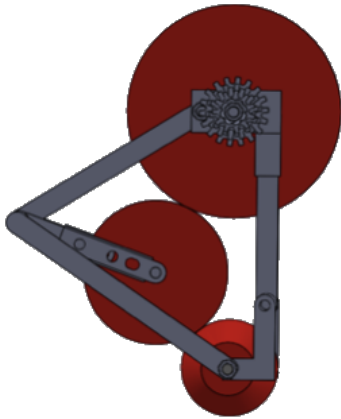


FIGURE 2.1 – Transmission par roues de friction

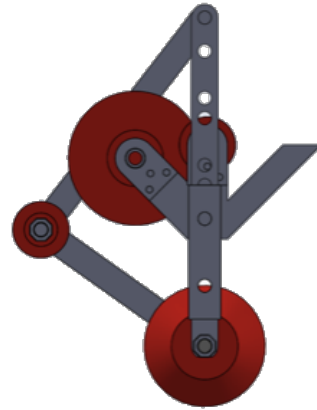


FIGURE 2.2 – Transmission par courroie/chaine

2.2.1 Roue de Friction

Le premier système présenté (figure 2.3) est l'actionnement par roues de friction au centre du rouleau. Celui-ci est constitué d'une **roue d'actionnement** entraînée par la chaîne du vélo, d'une **roue de friction intermédiaire** et d'un **rouleau bombé** assurant le contact avec le sol.

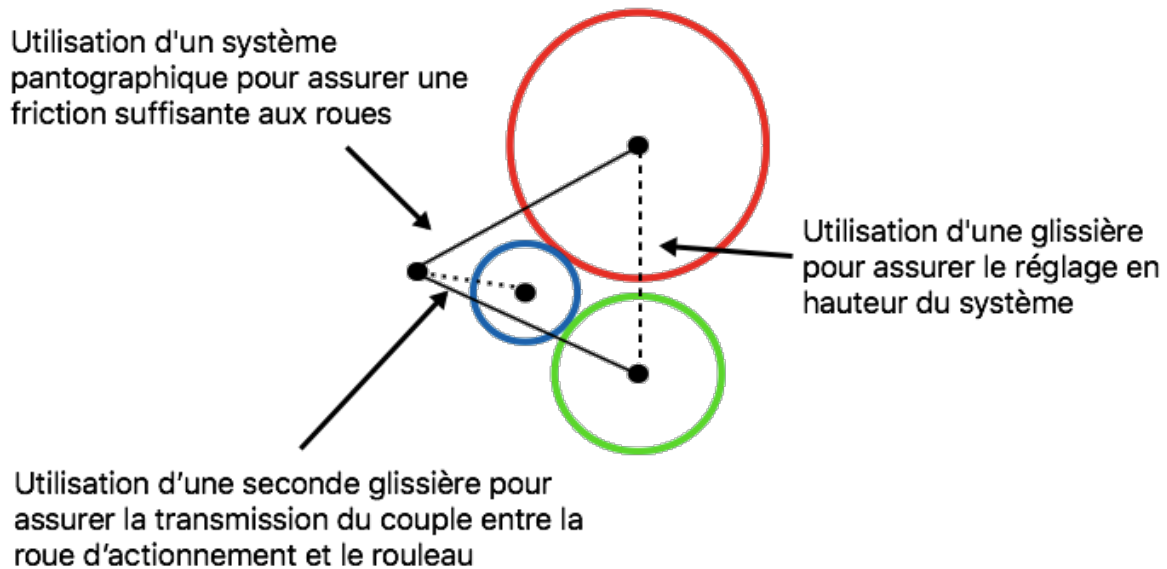


FIGURE 2.3 – Modèle général du système à roue de friction

Il est important de noter qu'entre 2 roues de friction, le sens de rotation sera inversé. Afin de s'assurer que le rouleau soit actionné dans le bon sens, la roue de friction intermédiaire est donc nécessaire car elle permet d'inverser une seconde fois le sens de rotation et revenir au sens d'actionnement d'origine du vélo (figure 2.4).

Afin d'adapter le système à différentes tailles de cadres de vélo, un réglage est nécessaire. Il s'effectue via la glissière verticale (en pointillés sur la figure 2.5) dans laquelle sont percés différents alésages, à savoir, 1 par taille de cadre (16, 20, 24 et 26 pouces). La glissière secondaire (en bleu) permet quant à elle d'assurer le contact entre la roue de friction intermédiaire et les autres éléments en rotation du système.

Une fois le système réglé au niveau de la glissière verticale et la roue de friction mise en contact, le poids du cycliste et du vélo réunis permettent d'assurer un contact suffisant entre les différentes roues via le système pantographique.

Le vélo, équipé de ce système, doit permettre à l'utilisateur d'avancer à une vitesse équivalente au vélo dans sa configuration d'origine pour un pédalage équivalent. Pour

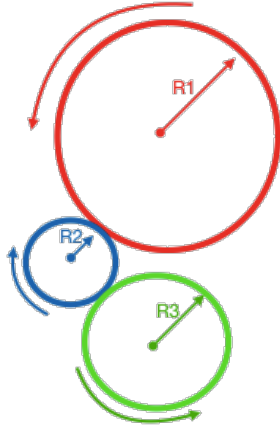


FIGURE 2.4 – Sens de rotation des roues

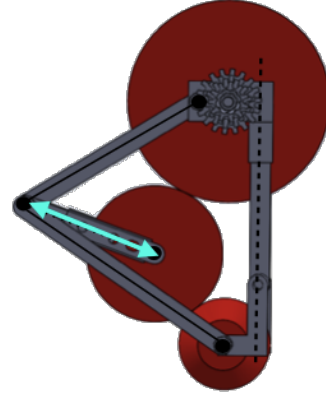


FIGURE 2.5 – Réglage du système

s'en assurer, il peut être intéressant de s'attarder plus en profondeur sur la cinématique du système. Comme on peut le voir sur la figure 2.4, l'actionnement s'effectue à la roue 1. La vitesse de rotation ω peut être transcrite en vitesse linéaire V en utilisant la relation suivante :

$$\omega = V/R \text{ [rad/s]} \quad (1)$$

Du fait du roulement sans glissement entre la roue 1 et 2, on sait que :

$$\omega_1 R_1 = \omega_2 R_2$$

On tire la même conclusion entre les roues 2' et 3 :

$$\omega'_2 R'_2 = \omega_3 R_3$$

Comme les roues 2 et 2' sont en réalité la même roue, alors :

$$V_{sol} = \omega_3 R_3 = \omega_2 R_2 = \omega_1 R_1 \quad (2)$$

Donc pour ω_1 donné, R_1 implique directement V_{sol} or :

$$\boxed{\omega_1 R_1 = V_{sol} = V_{vélo} = \omega_{vélo} \cdot R_{vélo}} \quad (3)$$

Par conséquent, seul le diamètre de la première roue aura un impact sur la vitesse d'avance du vélo. Si on reprend l'équation 3, on remarque que la vitesse de rotation ω_1 sera directement proportionnelle au rapport des diamètres entre une roue classique et la roue de friction. Afin de permettre au cycliste de se déplacer à vitesse normale, il faut donc que le rapport des diamètres soit le plus proche possible de 1.

Contraintes géométriques

On peut tout d'abord considérer que le rayon R_3 du rouleau est constant ($50 [mm]$). Les rayons R_1 et R_2 quant à eux, sont des variables du système. Ensuite, il faut se pencher sur le rayon maximum que peut atteindre R_1 . Comme on peut le constater sur la figure 2.6, le rayon $R_{1,max}$ est limité par le rayon du rouleau ainsi que par la distance D_{min} . Cette dernière se trouve limitée par le diamètre de la roue du plus petit vélo qui peut être équipé du système à savoir, un vélo de 16 pouces. Dans ce type de vélo, le rayon de la roue arrière vaut : $R_{vélo} \simeq 200 [mm]$.

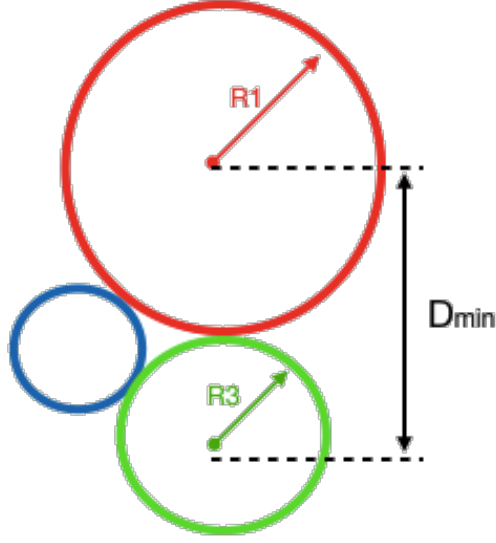


FIGURE 2.6 – Distance minimum

Comme

$$R_3 = 50 [mm],$$

$$R_{vélo} = R_1 + 2.R_3 = 200 [mm],$$

Alors,

$$D_{min} = R_1 + R_3 = 150 [mm]$$

Et,

$$R_{1,max} = 100 [mm]$$

Par conséquent, et sachant qu'il faut assurer une différence de vitesse minimale entre un vélo classique et un vélo équipé du système, 2 solutions ont été envisagées : l'intégration d'un train épicycloïdal au sein de la première roue pour appliquer un facteur multiplicatif compensatoire (figure 2.7) ou intégrer au système une seconde roue de friction intermédiaire coaxiale à la première mais de diamètre différent (figure 2.8) .

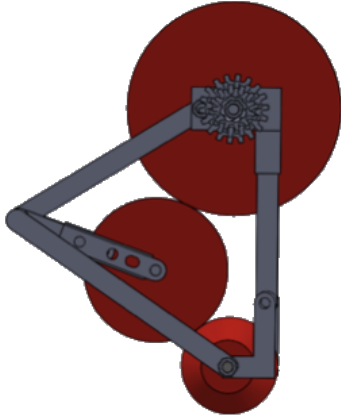


FIGURE 2.7 – Train épicycloïdal intégré dans le moyeux de la première roue.

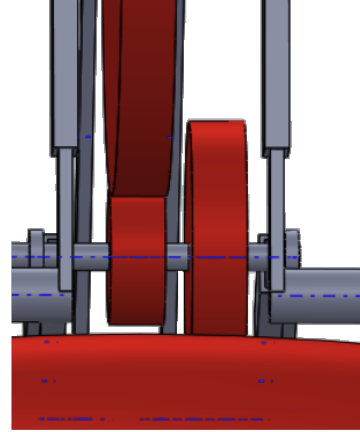


FIGURE 2.8 – Système de transmission de vitesse utilisant 2 roues intermédiaires coaxiales.

Utilisation d'un train épicycloïdal

Le train épicycloïdal, utilisé sur certains vélos, est un système de changement de vitesse intégré au moyeux de la roue arrière. Il permet de démultiplier les efforts fournis par le cycliste tout en évitant que la chaîne du vélo doive passer d'un pignon à l'autre. Ce système est compact et est protégé de l'environnement extérieur comme la pluie ou la boue. Il permet de changer de vitesse à l'arrêt sans problème de déraillement et la chaîne du vélo ne subit aucun effort latéral ce qui lui octroie une durée de vie plus élevée. Celui-ci (figure 2.9) est composé, à la manière d'une boîte de vitesse de voiture, d'un certain nombre d'engrenages qui assure la réduction ou la démultiplication de la vitesse de pédalage.

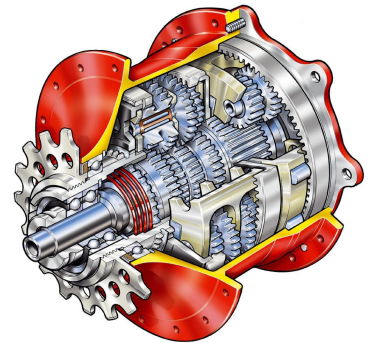


FIGURE 2.9 – Train épicycloïdal pour un vélo [5]

En intégrant un train épicycloïdal au sein du moyeu de la première roue de friction, il devient possible d'atteindre la vitesse équivalente à un vélo classique peu importe le diamètre de la première roue. Par contre, il reste nécessaire de s'intéresser aux contraintes géométriques du problème.

Contraintes géométriques

Si on s'intéresse d'abord à la configuration 16 pouces, il faut se pencher sur la taille maximale que pourra atteindre le rayon de la seconde roue ($R_{2,max}$). Dans cette configuration, la contrainte limitante sera d'éviter que la roue 2 ne touche le sol. Connaissant $R_{1,max}$ et R_3 , on peut déterminer géométriquement que $R_{2,max} = 75[mm]$ (voir figure 2.10).

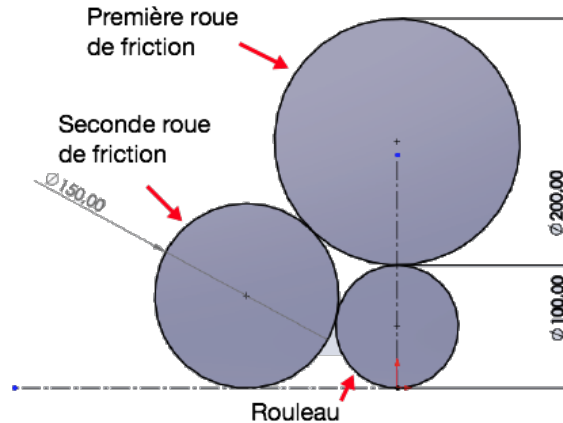
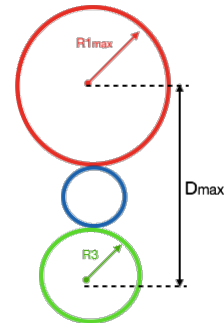


FIGURE 2.10 – Taille maximum de la roue 2

Il est ensuite naturel de s'intéresser à la valeur minimale de la roue 2 (figure 2.11). En effet, celle-ci devant transmettre la vitesse de rotation de la roue 1 au rouleau, il faut s'assurer qu'elle sera en contact des 2 côtés. Pour se faire il faut se référer à la seconde configuration extrême, un vélo de 26 pouces.

Les facteurs limitant sont les suivants :

- Rayon d'une roue de 26 pouces $\simeq 330[mm]$
- $R_3 = 50[mm]$
- $D_{max} = R_{1,max} + 2.R_{2,min} + R_3 = 150 + 2.R_{2,min} = 280[mm]$



Par conséquent, $R_{2,min} = 65[mm]$.

FIGURE 2.11 – Distance maximum

Le rayon de la roue de transmission est donc : $[65 < R_2 < 75][mm]$

Utilisation de 2 roues coaxiales

Si on se penche sur la solution comprenant 2 roues coaxiales, on peut faire l'hypothèse qu'on sera probablement confronté à une solution plus complexe ainsi qu'à un système plus lourd et légèrement déséquilibré. Néanmoins, cette solution ne doit pas être rejetée sans une analyse plus approfondie. Pour commencer, un rapport de 2 a été imposé entre les diamètres des roues coaxiales de transmission (figure 2.12).

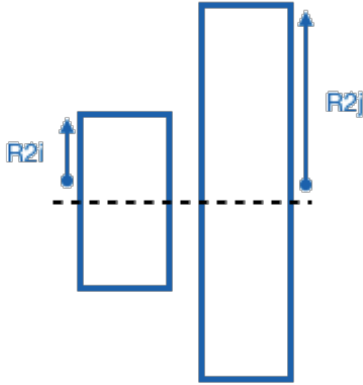


FIGURE 2.12 – Schéma roues coaxiales

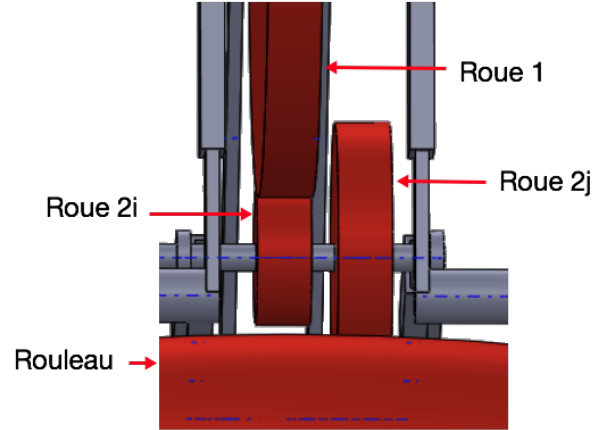


FIGURE 2.13 – Roues coaxiales modèle solid-works

En utilisant cette configuration (figure 2.13), la roue (2j) en contact avec le rouleau étant dotée d'un diamètre 2 fois supérieur à la roue (2i) en contact avec la première roue de friction, la vitesse du rouleau sera multipliée par 2. Par cette configuration, il est donc possible d'atteindre à nouveau la vitesse initiale du vélo pour un pédalage identique.

Contraintes géométriques

Nos invariants sont : $R_3(50 [mm])$ et $R_{max}(100 [mm])$ comme précédemment et la seule variable restante est $R_{2,i} = \frac{R_{2,j}}{2}$

Afin de déterminer $R_{2,i,max}$ et $R_{2,j,max}$, on applique la même contrainte que pour le cas précédant : aucune roue (hormis le rouleau) ne doit toucher le sol. Connaissant $R_{1,max}$ et R_3 , on trouve géométriquement (figures 2.14, 2.15 et 2.16) que $R_{2,j,max} = 200 [mm]$ et donc $R_{2,i,max} = 100 [mm]$.

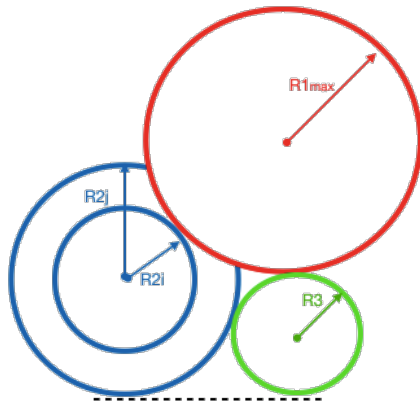


FIGURE 2.14 – Schéma de la roue 2

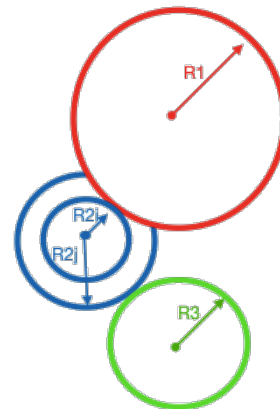


FIGURE 2.15 – Schéma des roues de friction

A nouveau, il est nécessaire de s'attarder sur les diamètres minimaux de ces 2 roues coaxiales. En effet, elles doivent assurer un contact entre les différentes roues, et ce, jusque dans la configuration 26 pouces.

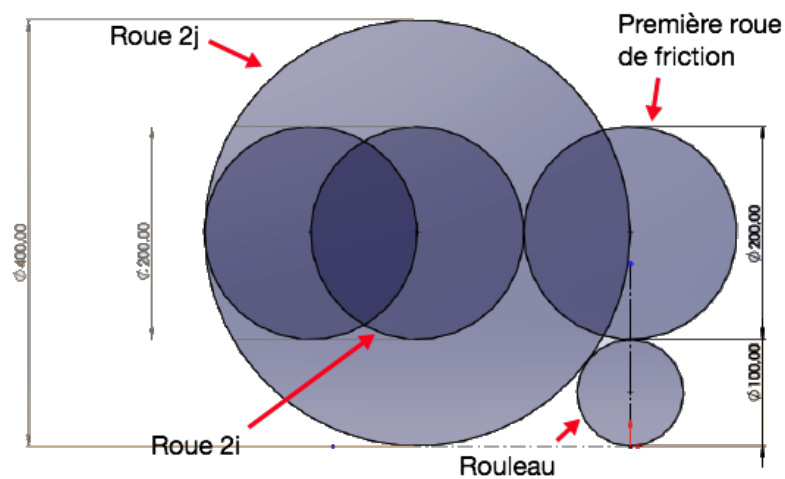


FIGURE 2.16 – Taille maximum de la roue 2

On sait que dans une configuration 26 pouces, la distance entre l'axe de rotation et le sol sera de $\simeq 330$ [mm]. Le rayon du rouleau, quant à lui, ne change pas et reste imposé à 50 [mm].

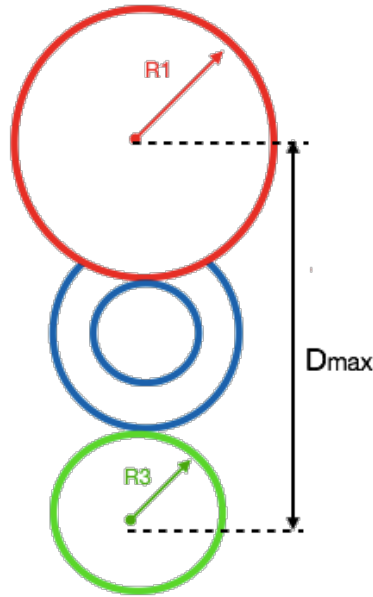


FIGURE 2.17 – Distance maximum

De plus, on sait que dans cette configuration,

$$D_{max} = R_1 + \frac{3}{2} \cdot R_{2j,min} + R_3 \simeq 15 + \frac{3}{2} \cdot R_{2j,min} = 280 \text{ [mm]}$$

Par conséquent,

$$R_{2j,min} = 87 \text{ [mm]}$$

Le rayon de la roue de transmission est donc : $[87 < R_{2j} < 200]$ [mm]

Compenser la perte de vitesse due au changement de taille de vélo

Comme on a pu le constater dans les 2 configurations présentées précédemment, le système permet de compenser à lui seul un rapport de diamètre de 2 entre la roue initiale du vélo et la première roue de friction. Ce qui signifie que dans le cas d'un vélo de 16 pouces (diamètre roue $\simeq 400$ [mm]), si notre première roue d'entraînement est

dimensionnée à sa valeur maximale (diamètre roue $\simeq 200[mm]$), ce facteur 2 est suffisant pour permettre au cycliste de se déplacer à une vitesse équivalente à celle d'un vélo "classique" pour une même vitesse de pédalage.

Par contre, lorsqu'on désirera utiliser ce même système dans une configuration différente (20,24 ou 26 pouces), le facteur multiplicatif requis pour atteindre une vitesse équivalente à un vélo "classique" sera plus important comme on peut le constater dans la troisième ligne du tableau 2. Par conséquent, il faudra appliquer un facteur multiplicatif compensatoire (quatrième ligne du tableau 2) en fonction du type de vélo utilisé.

TABLE 2 – Tableau des facteurs de compensation

Diamètre roue en [pouces]	16	20	24	26
Diamètre roue : $\varnothing_r$ [mm]	405	510	610	660
Rapport : $\varnothing_r/\varnothing_{2j}$	2	2.55	3.05	3.3
Facteur multiplicatif de compensation à appliquer : A	1	1.3	1.5	1.65

Afin de résoudre ce problème, une solution simple envisagée serait d'assigner un pignon à chaque taille de cadre différente compensant approximativement ce facteur multiplicatif. Ceux-ci seront vissés au système au niveau du moyeu à la manière de pignons classiques. Les vélos de 16 pouces étant couramment équipés d'un pignon arrière de 18 dents, le tableau 3 nous fournit le nombre de dents N nécessaires pour compenser le manque de vitesse dû au changement de taille de cadre. Pour les déterminer, la formule suivante a été appliquée :

$$N = 18/A$$

TABLE 3 – Tableau du nombre de dents des pignons

Diamètre roue en [pouces]	16	20	24	26
nombre de dents du pignon	18	14	12	11

2.2.2 Transmission par courroie/chaîne

Le second système (figure 2.18) envisagé utilise une transmission par courroie ou par chaîne. Pour éviter toute discontinuité au centre du rouleau (section 2.1), l'actionnement s'effectue par une des extrémités de celui-ci. Pour palier à la différence de diamètre entre la première poulie et la roue initiale du vélo, un système de 2 poulies coaxiales de diamètres différents est envisagé de la même manière que précédemment. Il faut aussi noter que le système doit être polyvalent en fonction de la taille du vélo d'où l'intégration d'une glissière verticale pour le réglage et d'un système pantographique pour tendre la courroie.

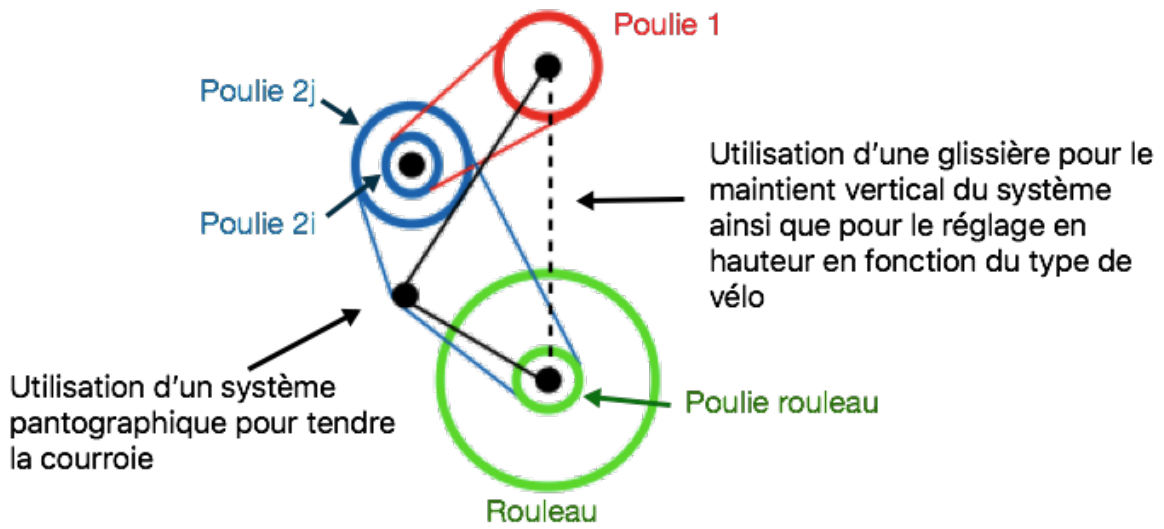
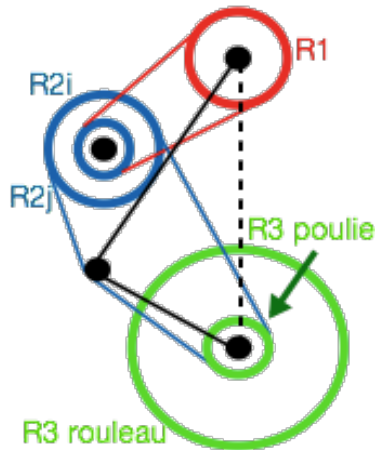


FIGURE 2.18 – Modèle général du système à courroie

Afin de déterminer quel sera l'impact sur la vitesse du vélo lorsqu'on remplacera la roue arrière par ce type d'actionnement, il peut être intéressant de s'attarder plus en profondeur sur la cinématique du système (figure 2.19).



- Rapport de réduction via la première courroie : R_1/R_{2i}
- Rapport de réduction entre les 2 poulies intermédiaires : R_{2j}/R_{2i}
- Rapport de réduction via la seconde courroie : $R_{2j}/R_{3,poulie}$
- Rapport de réduction entre le rouleau et sa poulie solidaire : $R_{3,poulie}/R_{3,rouleau}$

FIGURE 2.19 – Schéma du système à courroie

Ce qui nous donne une rapport de réduction comprenant de nombreux paramètres :

$$\text{Rapport total : } R_{tot} = (R_1/R_{2i}) \cdot (R_{2j}/R_{2i}) \cdot (R_{2j}/R_{3,poulie}) \cdot (R_{3,poulie}/R_{3,rouleau})$$

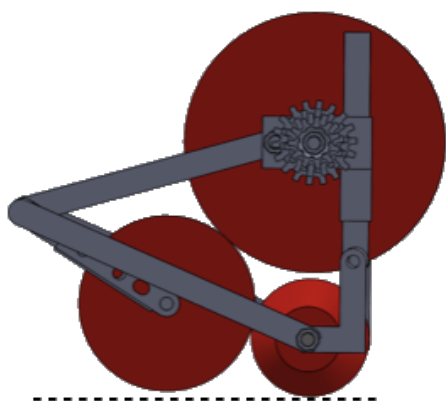


FIGURE 2.20 – Configuration 16 pouces,
1 roue de friction

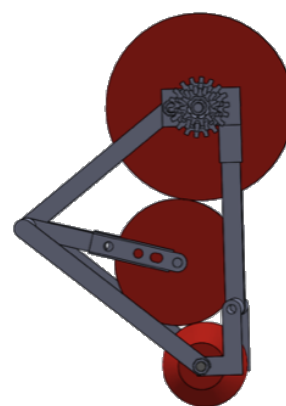


FIGURE 2.21 – Configuration 26 pouces,
1 roue de friction

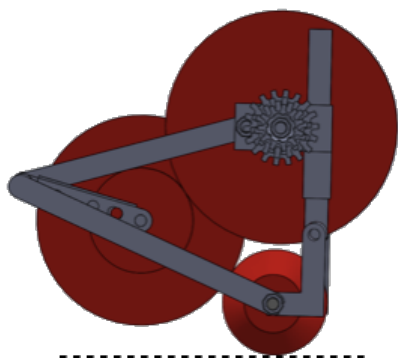


FIGURE 2.22 – Configuration 16 pouces,
2 roues de friction

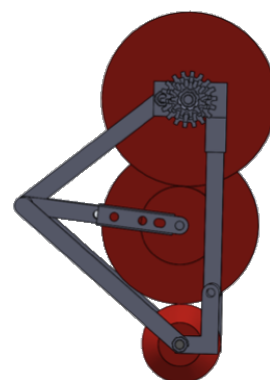


FIGURE 2.23 – Configuration 26 pouces,
2 roues de friction

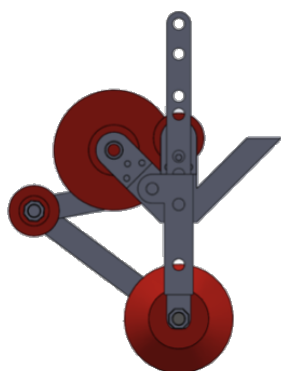


FIGURE 2.24 – Configuration 16 pouces,
courroie/chaine

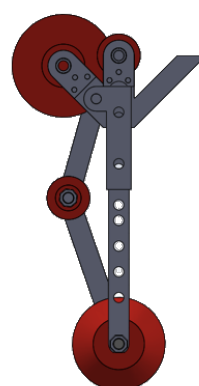


FIGURE 2.25 – Configuration 26 pouces,
courroie/chaine

2.2.3 Choix d'un modèle

Afin de sélectionner un des 3 modèles, il a aussi été pertinent de se pencher sur la problématique de la manutention nécessaire pour adapter le diamètre de la roue ainsi que pour changer la courbure de rouleau.

Manutention nécessaire pour une transmission par roue de friction

Lors de l'installation du système, le cycliste devra effectuer les opérations suivantes dans l'ordre :

- Détacher la roue arrière du vélo
- Enlever la chaîne
- Passer la chaîne sur le prototype
- Fixer le vélo à ce dernier
- Régler la hauteur en fonction de la taille du vélo
- Mettre les roues de friction en contact entre elles ainsi qu'avec le vélo.

S'il désire changer de courbure de rouleau :

- Desserrer les écrous extérieurs
- Enlever le rouleau
- Placer le nouveau rouleau
- Resserrer les écrous extérieurs

Manutention nécessaire pour une transmission par courroie/chaîne

Dans le cas du système entraîné par courroie/chaîne, les manutentions pour l'installation seront identiques à la différence près qu'il faudra tendre les différentes courroies. Il faut toutefois noter que dans le cas d'un changement de courbure de rouleau, le cycliste devra rajouter 2 étapes à son processus à savoir : enlever la courroie de la poulie solidaire au rouleau ainsi que replacer la courroie sur la poulie solidaire au nouveau rouleau. Ce changement prendra donc plus de temps que pour le premier système.

Système sélectionné

Lorsqu'on se penche sur l'analyse des 3 systèmes proposés, on remarque qu'ils sont tous les 3 valides pour les 2 configurations extrêmes à savoir 16 pouces (figures 2.20, 2.22 et 2.24) et 26 pouces (figures 2.21, 2.23 et 2.25). Après discussions, le système à roues de friction coaxiales a été sélectionné pour la suite du projet. En effet, il est plus abouti et plus audacieux que le système de transmission par courroie. Sa manutention requière moins d'étapes et il profitera d'un équilibrage plus intéressant que pour le système à courroies. Par ailleurs, l'adaptation du système de freinage (partie traitée dans la section 2.4) semble plus simple à mettre en oeuvre dans cette configuration. Pour finir, le choix s'est porté sur la configuration à 2 roues de friction coaxiales plutôt que vers

le système muni du train épicycloïdal car ce dernier, moins compact, laissait moins de marge de manoeuvre entre la seconde roue de friction et le sol dans sa configuration 16 pouces (figure 2.20 et figure 2.22). Par conséquent, celle-ci risquait de le toucher pendant l'utilisation de ce dernier.

2.3 Dimensionnement & CAO

L'étape suivante est le dimensionnement des différents organes du système. Afin de respecter les différentes contraintes du cahier des charges, le prototype doit entre autre, convenir à différentes tailles de vélo (16,20,24 et 26 pouces) et doit donc non seulement pouvoir être réglable en hauteur mais aussi pouvoir s'insérer dans l'entraxe de la roue arrière. L'entraxe minimum pour un vélo de 16 pouces est de 100mm.

Le système doit donc être suffisamment fin mais il ne faut pas négliger les efforts auxquels il sera soumis pendant les phases d'utilisation. En effet, remplaçant la roue arrière du vélo, le système sera soumis au poids du vélo ainsi qu'au poids du cycliste.

L'ensemble des plans des pièces présentées ci-dessous sont en annexe et tolérancées selon les règles dictées par le livre "Méthode active de dessin technique"[6].

2.3.1 Les différents organes du prototype

Au sein de ce prototype réalisé en CAO, on peut distinguer plusieurs sous-assemblages : La première roue de friction, la roue de friction intermédiaire, le rouleau, l'ensemble des bras de liaison entre les différentes parties et pour finir le système de fixation au vélo (figure 2.26).

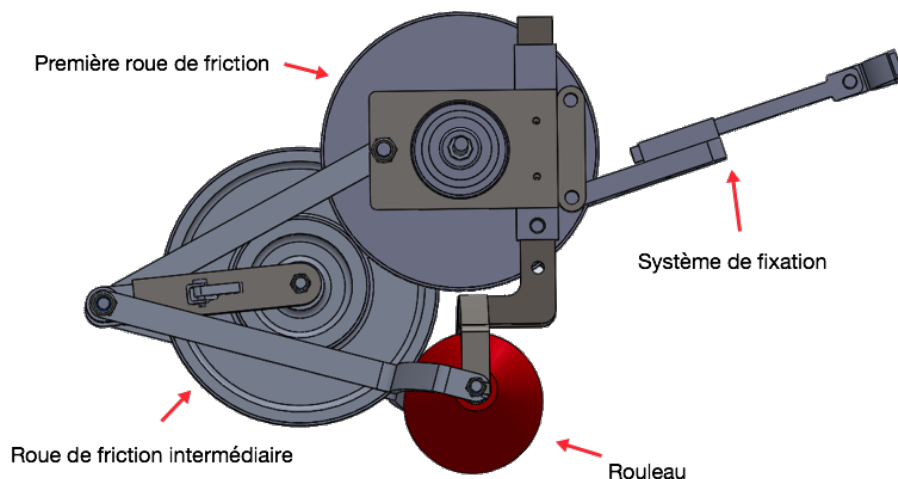


FIGURE 2.26 – Vue général du prototype

2.3.2 La première roue de friction

Le premier assemblage traité concerne la première roue de friction. Celle-ci est située et fixée à l'emplacement initial de la roue arrière du vélo. Cet assemblage a plusieurs fonctions principales. Tout d'abord, il doit réceptionner le couple fournis par la chaîne du vélo. Il doit ensuite être capable de le transmettre à son tour à la roue de friction intermédiaire. La contrainte principale est la limitation de la largeur du système à l'entraxe minimale d'un vélo (100 [mm]). Pour finir, il a été suggéré d'utiliser un moyeu d'une roue de vélo classique pour réduire le nombre de pièces à usiner et ainsi réduire le coût et le temps de fabrication.

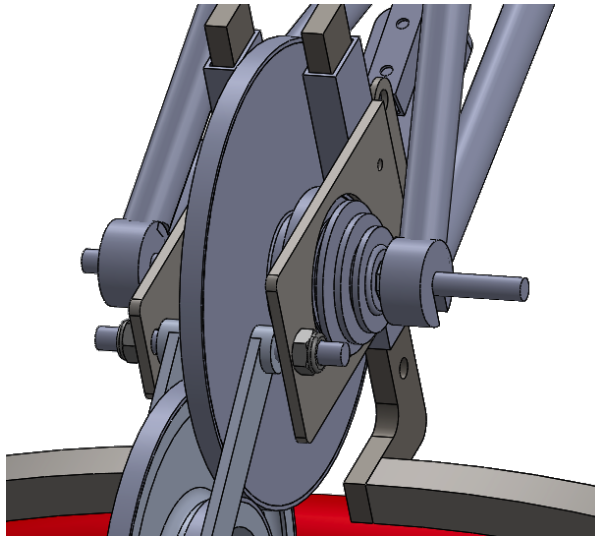


FIGURE 2.27 – Mise en contexte de la première roue de friction

On peut décomposer l'assemblage en différentes parties : La roue (figure 2.28), le moyeu (figure 2.29) et les pignons d'entraînement (figure 2.30).

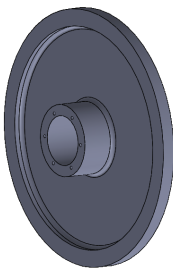


FIGURE 2.28 – Première roue de friction

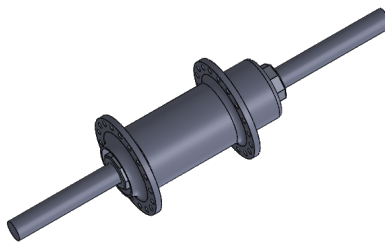


FIGURE 2.29 – Moyeu d'un vélo

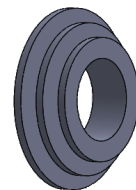


FIGURE 2.30 – Cassette de 3 pignons

De chaque côté du moyeu se trouvent les trous servant à maintenir les rayons de la roue. Comme ceux-ci ne sont pas présents dans notre système, les trous sont libres et peuvent servir à fixer la première roue de friction sur le moyeu. Néanmoins, comme on peut le constater sur la figure (figure 2.29), une des deux couronnes empêche l'emmanchement de la roue. Il a donc été décidé de l'enlever par usinage(figure 2.31) et de fixer cette dernière d'un seul côté.

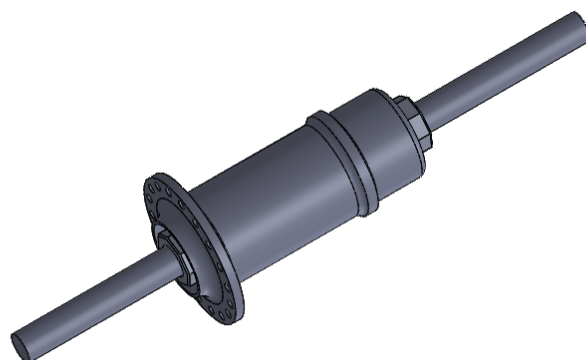


FIGURE 2.31 – Moyeu usiné

Il devient ensuite possible d'assembler les 3 pièces.

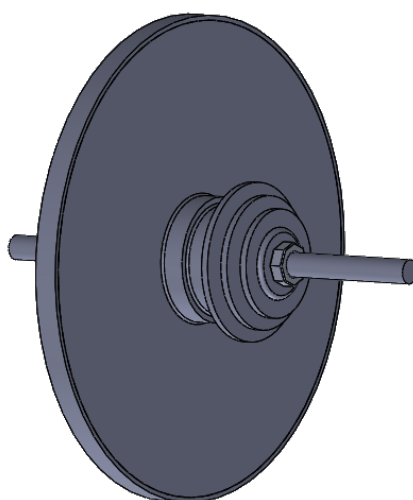


FIGURE 2.32 – Assemblage de la première roue de friction

Comme on peut le constater sur la figure (figure 2.28), la roue a été creusée pour limiter sa masse. Pour finir, afin d'assurer une adhésion maximal avec la roue de friction

intermédiaire, un revêtement en caoutchouc sera apposé sur la tranche de la roue de friction.

Dimensionnement

Afin de respecter les contraintes géométriques définies dans la section 2.2.1, le diamètre de la première roue de friction a été imposé à $200[mm]$. L'épaisseur de celle-ci a été réduite le plus possible ($10[mm]$) pour limiter l'encombrement tout en conservant une surface de friction minimum. Le choix des pignons s'est porté sur une cassette de 3 pignons respectivement de 16, 19 et 22 dents pour sa rapprocher au plus de la vitesse initiale comme décrit dans la section 2.2.1 tout en restant dans des cassettes de pignons classiques et à coût réduit. Enfin, le choix du moyeu s'est porté sur un moyeu compatible avec la cassette de pignons tout en ayant un entraxe inférieur à $100[mm]$. Le plan de la roue est disponible en annexe A.

2.3.3 La roue de friction intermédiaire

Le second assemblage du prototype est la roue de friction intermédiaire. Celle-ci remplit le rôle d'intermédiaire et assure la transmission du couple entre la première roue de friction et le rouleau. Pour rappel (voir section 2.2.1), le choix de 2 roues de friction coaxiale avait été effectué. Cette section se compose donc d'un arbre fixe (figure 2.33), de 2 roulements à flasque (figure 2.34) assurant la rotation de la roue sur celui-ci et enfin de la double roue de friction (figure 2.35).

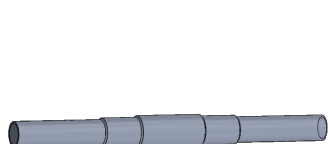


FIGURE 2.33 – Arbre de la seconde roue de friction

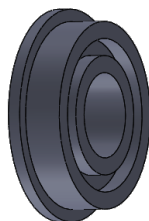


FIGURE 2.34 – Roulement à flasque

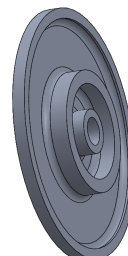


FIGURE 2.35 – Roue de friction intermédiaire

Enfin, la roue sera à nouveau creusée pour limiter la masse et un revêtement de caoutchouc sera de nouveau apposé sur le pourtour des sections en contact avec le rouleau ainsi qu'avec la première roue de friction.

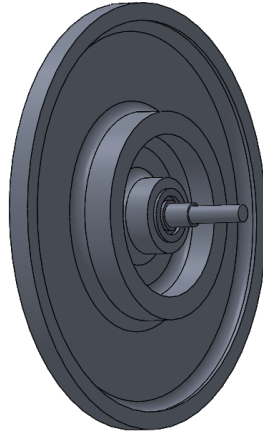


FIGURE 2.36 – Assemblage de la seconde roue de friction

Dimensionnement

Pour respecter les contraintes géométriques de la section 2.2.1, le diamètre de la grande roue est de $200[mm]$ et celui de la petite roue de $100[mm]$. Pour les mêmes raisons que dans le cas de la première roue de friction, il a été décidé de limiter la "tranche" de contact à $10[mm]$ pour chacune d'entre elles. Enfin, le choix des roulements à flasque s'est porté pour simplifier l'usinage de la double roue. Pour finir, le diamètre maximal de l'arbre a été défini à $10[mm]$. Les plans de la roue et de l'arbre sont disponibles en annexe B.

2.3.4 Le rouleau

Le rouleau est la seule partie du système qui sera contact avec le sol. Il s'agit de l'élément le plus important du système. En effet, son rôle est d'augmenter la stabilité du vélo par un rayon de courbure beaucoup plus important que dans le cas d'une roue classique. Afin de vérifier cette hypothèse, une analyse de stabilité a été réalisée (voir section 3).

Ensuite, bien qu'on s'attarde ici sur le rouleau en lui-même, il ne faut pas négliger les organes qui seront en contact avec ce dernier à savoir, les 2 bras de maintien ainsi que la seconde roue de friction. Il faut donc décomposer cet assemblage en 3 parties : l'arbre fixe (figure 2.37), 2 roulements (figure 2.38) assurant la rotation du rouleau sur ce dernier et enfin du rouleau à proprement parler (figure 2.39).

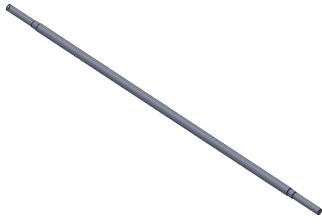


FIGURE 2.37 – Arbre du rouleau

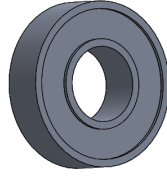


FIGURE 2.38 – Roulements du rouleau

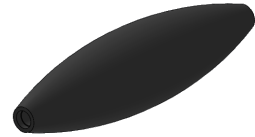


FIGURE 2.39 – Rouleau bombé

Enfin, afin d'assurer un coefficient de friction maximum entre le rouleau et le sol ainsi qu'avec la roue de friction intermédiaire 2 possibilités ont été envisagées : usiner le rouleau directement dans un caoutchouc ou appliquer un revêtement caoutchouteux par la suite.

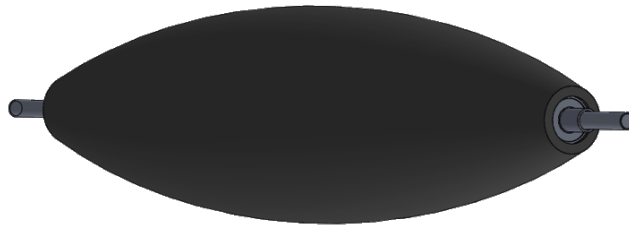


FIGURE 2.40 – Assemblage du rouleau

Dimensionnement

Dans le cas du rouleau, plusieurs rayons de courbures sont possibles. Dans ce cas-ci, un rayon de courbure de $6000[m]$ a été imposé. La longueur entre les 2 extrémités du rouleau a été imposée à $400[mm]$ et le diamètre au centre à $50[mm]$. Le diamètre de l'arbre a été imposé à $10[mm]$. Les plans du rouleau et de l'arbre sont disponibles en annexe C.

2.3.5 Les bras de liaison

Des bras de liaisons sont prévus pour assembler ces 3 parties comme on le voit sur la figure 2.26. Le système est décomposé en plusieurs parties : La fixation de la première roue de friction (figure 2.41), la glissière de réglage de la roue de friction intermédiaire (figure 2.42), la barre intermédiaire (figure 2.43), la fixation au rouleau (figure 2.44) et enfin la glissière verticale assurant le réglage en hauteur du prototype (figure 2.45). Les plans des barres de liaison sont présents en annexe D.

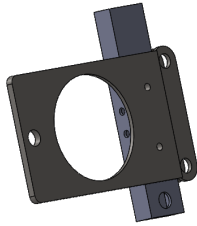


FIGURE 2.41 – Plaque de fixation de la première roue de friction

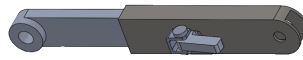


FIGURE 2.42 – Glissière de réglage de la roue de friction intermédiaire



FIGURE 2.43 – Barre intermédiaire du pantographe

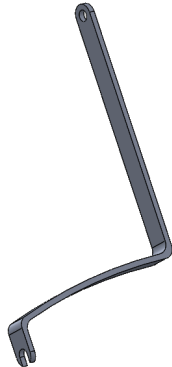


FIGURE 2.44 – Barre intermédiaire fixée au rouleau



FIGURE 2.45 – Glissière de réglage en hauteur du système

La fixation de la première roue de friction

Cette pièce (figure 2.46) sert de liaison entre différentes parties du prototype. Elle permet de lier la première roue de friction au système pantographique, à la glissière de réglage en hauteur, au système de freinage ainsi qu'au système de fixation. Elle est donc composée d'un tube de guidage pour la glissière de réglage, d'un alésage accueillant le roulement de la première roue de friction, d'un alésage pour fixer une barre de liaison intermédiaire ainsi que d'une pièce en forme de "H" à laquelle on peut fixer les systèmes de freinage et de fixation.

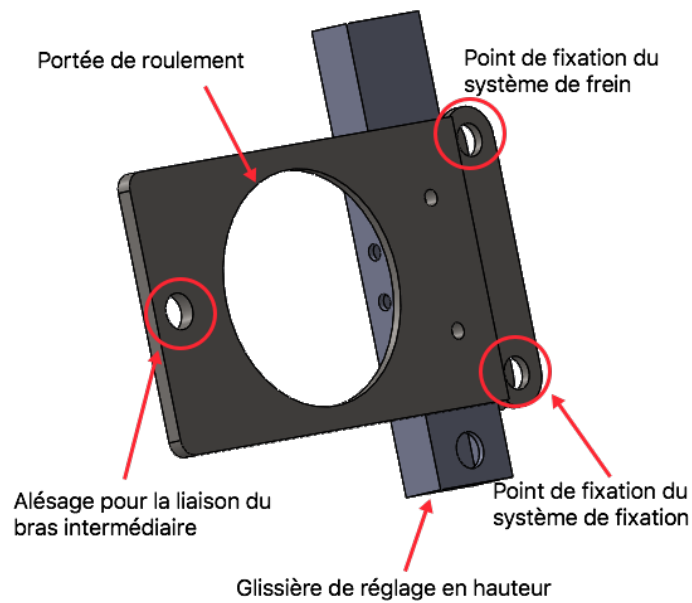


FIGURE 2.46 – Plaque de fixation à la première roue de friction

La glissière de réglage de la roue de friction intermédiaire

La fonction principale de cette glissière est d'assurer le contact entre la roue de friction intermédiaire avec la première roue de friction ainsi qu'avec le rouleau. Celle-ci a été pensée pour permettre un réglage facile et sans outils. Elle est composée de 3 parties : Les 2 parties coulissantes (figures 2.47 et 2.48) ainsi qu'un petit clapet pour bloquer la glissière une fois celle-ci réglée (figure 2.49).

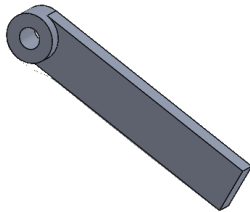


FIGURE 2.47 – Tige coulissant dans la glissière

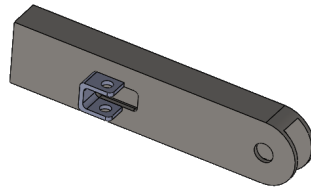


FIGURE 2.48 – Tube de la glissière

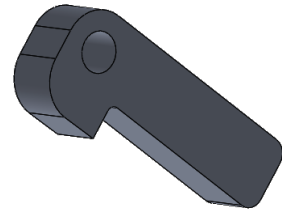


FIGURE 2.49 – Clapet de blocage de la glissière

Le prototype est composé de deux de ces systèmes de glissière (un de chaque côté de la roue).



FIGURE 2.50 – Assemblage de la glissière de réglage de la seconde roue de friction

La barre de liaison intermédiaire

La barre de liaison intermédiaire relie la pièce de fixation de la première roue de friction et le point de pivot du pantographe. Ne reprenant pas beaucoup d'efforts, cette liaison (figure 2.51) peut être assez fine. Elle est munie d'axes de pivot à ses 2 extrémités. Le premier vient s'emboîter dans l'alésage de la pièce de fixation de la première roue de friction prévu à cet effet. Le second sert quant à lui d'axe au point de pivot du pantographe. Le prototype est composé de 2 barres de liaison disposées de façon symétrique.



FIGURE 2.51 – Barre intermédiaire fixée entre la fixation de la première roue de friction et le point de pivot du pantographe

La fixation du rouleau

La dernière branche du système pantographique est celle qui relie le point de pivot du pantographe et le rouleau. Ne reprenant pas beaucoup d'efforts, cette liaison (figure 2.52) peut être assez fine. Afin de limiter l'encombrement, elle a été dessinée pour que son profil suive le profil du rouleau et gêne le moins possible le cycliste. Le prototype est composé de 2 barres de liaison disposées de façon symétrique.

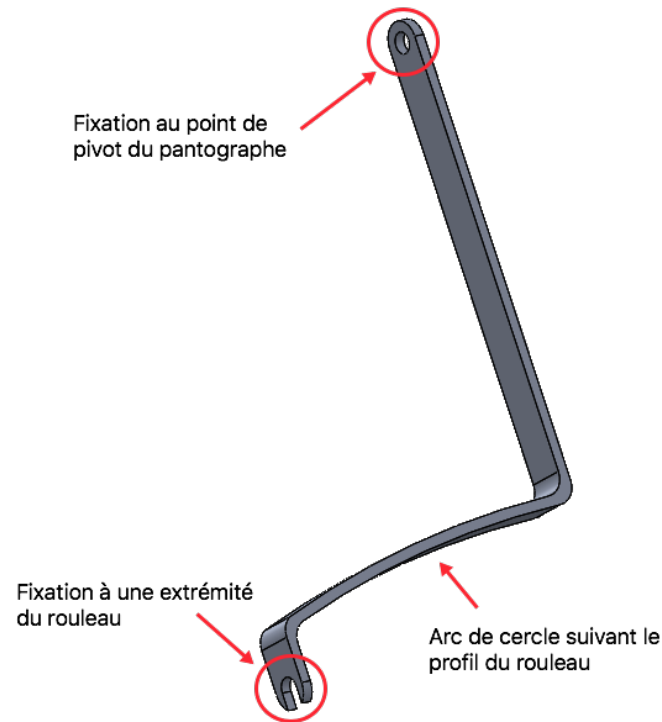


FIGURE 2.52 – Barre intermédiaire fixée au rouleau

La glissière verticale de réglage en hauteur du système

Cette glissière verticale (figure 2.53) a 2 fonctions principales : permettre le réglage en hauteur du prototype et reprendre les efforts dûs au poids du vélo et du cycliste. Elle est composée de 2 parties : La partie coulissante (figures 2.41) ainsi que d'un boulon à oreille permettant de bloquer le mouvement. On constate que la partie tubulaire venant réceptionner la barre est en fait la plaque de fixation de la première roue (figure 2.41). Le prototype est composé de 2 barres de liaison disposées de façon symétrique.

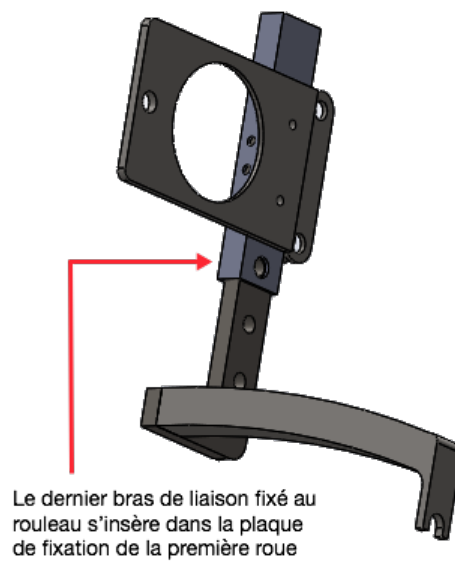


FIGURE 2.53 – Glissière de réglage en hauteur du système

Cette glissière devant reprendre une partie du poids du vélo, du cycliste ainsi que du poids du système, il faut s'assurer qu'elle est correctement dimensionnée. Après une rapide analyse via l'outil de simulation numérique de Solidworks, on peut remarquer que si cette pièce est usinée en aluminium, les efforts auxquels elle sera soumise dépasseront la limite d'élasticité du matériau (figure 2.54). Par conséquent, elle se déformerait plastiquement. Ne pouvant élargir davantage sa section du fait des contraintes géométriques du système, le choix s'est porté vers l'utilisation d'acier plutôt que d'aluminium (figure 2.55).

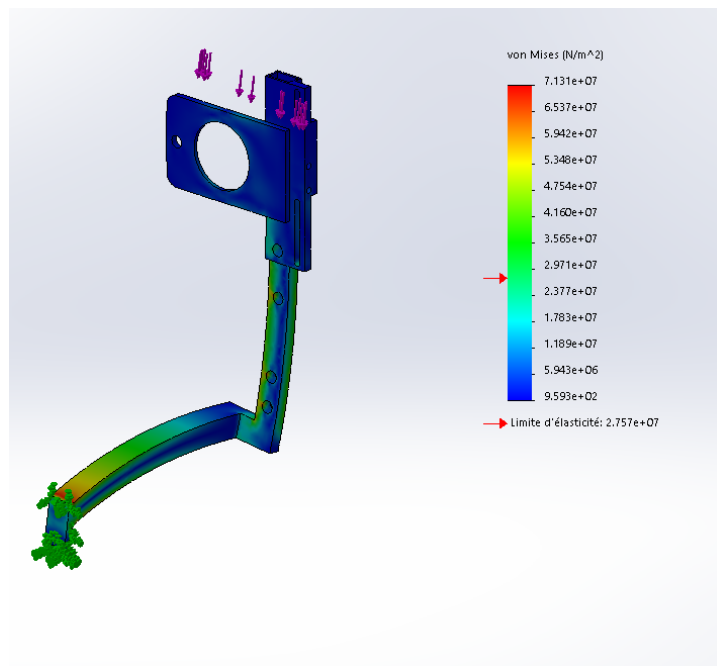


FIGURE 2.54 – Glissière en aluminium

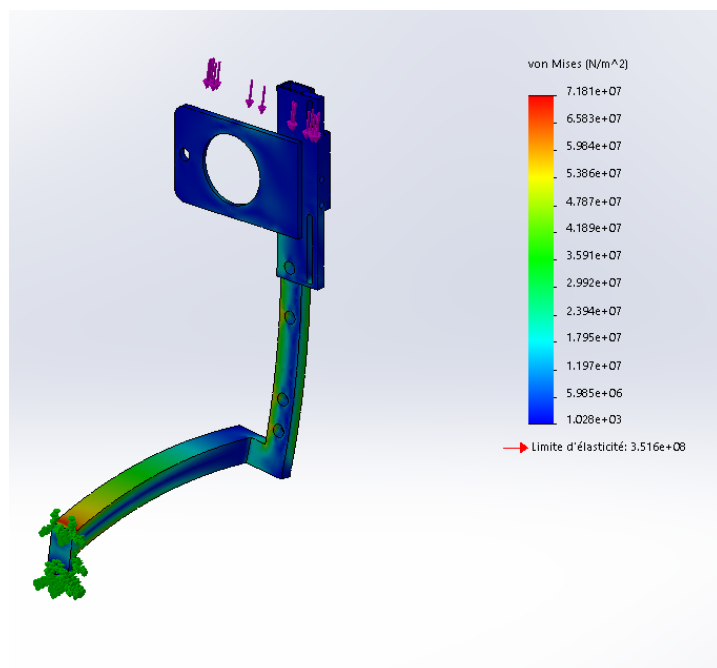


FIGURE 2.55 – Glissière en acier

2.3.6 Le système de fixation au vélo

En ce qui concerne la fixation du prototype au vélo, il s'effectue en 2 points. Pour le premier, il s'agit du moyeu qui est situé dans l'assemblage de la première roue de friction. Ce premier point de fixation bloque tous les degrés de liberté sauf 1 : la rotation autour de l'arbre. Pour bloquer ce dernier degré de liberté, un système de fixation a été ajouté. Celui-ci devant rester polyvalent, il est muni d'une nouvelle glissière pour le réglage de sa longueur et d'une vis de pression pour le blocage. D'un coté fixé au prototype par une charnière, de l'autre fixé au tube de selle par des colsons.

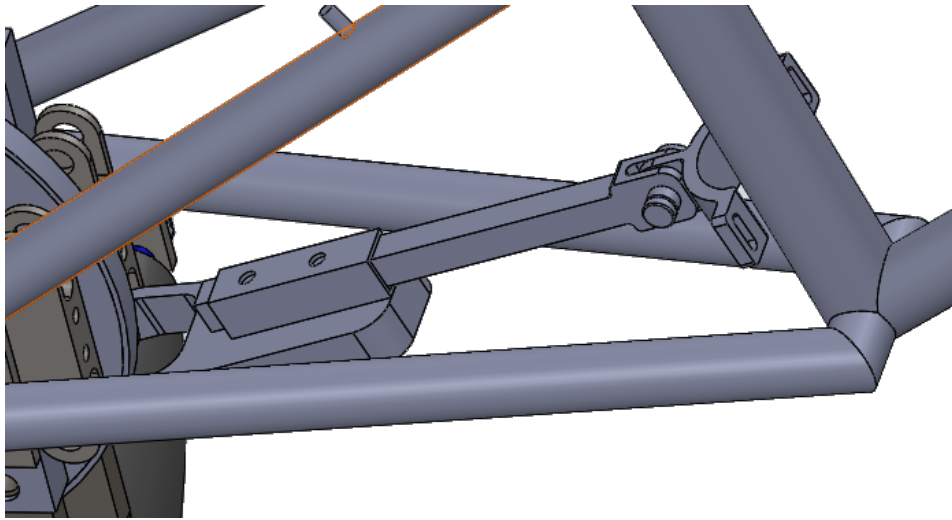


FIGURE 2.56 – Vue générale du système de fixation

Ce système est composé de 3 parties : La tige de la glissière (figure 2.57), la patte qui vient se poser contre la barre de selle (figure 2.58) et enfin, La plaque de fixation au prototype (figure 2.59).

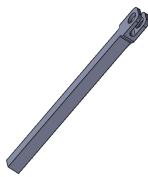


FIGURE 2.57 – Tige de la glissière

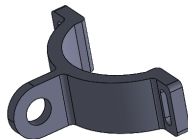


FIGURE 2.58 – Patte de fixation

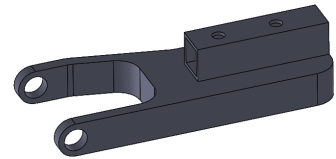


FIGURE 2.59 – Plaque de fixation

2.4 Système de freinage

Comme on peut le constater dans le cahier des charges, le prototype devra conserver le système de freinage existant. Il faut donc mettre en oeuvre une extension permettant de récupérer la pression au niveau des patins de frein pour transmettre un freinage au niveau du rouleau. Afin de simplifier la conception de cette partie, le choix a été fait d'appliquer le freinage directement sur la première roue de friction en faisant l'hypothèse que la chaîne de frottement entre les différentes roues suffirait à transmettre cet effort. Comme précisé précédemment, l'entièreté du prototype doit être adaptable à chaque taille de vélo ce qui implique que le système de freinage doit lui aussi être polyvalent.

Bien que complexe, cette partie du problème n'est pas insoluble. Après réflexion, 2 systèmes ont été trouvés. Le premier utilise un système en croix, le second utilise quant à lui un système équivalent aux câbles Bowden des vélos pour transmettre cette pression à la première roue de friction.

2.4.1 Transmission de la friction par un système en croix

Dans le premier système, le but est de transmettre une force de compression par un système en croix à la manière d'une paire de ciseaux. Ce système est assez simple à mettre en oeuvre mais apporte néanmoins un inconvénient non négligeable : un manque de polyvalence. En effet, à chaque changement de vélo, le système nécessite d'être allongé ou raccourci en fonction de la taille du cadre ce qui complexifie sa conception mais aussi son utilisation car celle-ci nécessite plusieurs réglages.

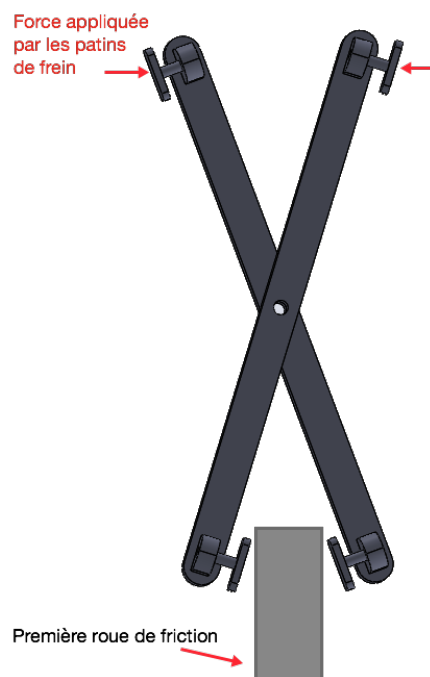


FIGURE 2.60 – Système en croix

2.4.2 Transmission de la friction par câble bowden

La deuxième solution proposée utilise le même principe que pour un système de frein classique à savoir, le principe des câbles Bowden. Le but est de transmettre une force via la traction d'un câble dans une gaine. L'avantage de cette technique, contrairement au système en croix, est que la force peut être transmise à une distance qui peut varier sans nécessiter de réglage hormis l'allongement ou le rétrécissement d'une glissière.



FIGURE 2.61 – Câble Bowden [7]

2.4.3 Système choisi : le câble Bowden

Le principe des câbles Bowden a été sélectionné pour sa polyvalence. Afin de le mettre en oeuvre, plusieurs pièces ont dû être conçues (figure 2.62). La première d'entre elles est une plaque (figure 2.63) fixée au prototype sur laquelle sont solidarisés les patins de frein. Sous cette plaque est fixée la partie femelle de la glissière de réglage. La seconde est une autre plaque (figure 2.64) sous laquelle est située la partie mâle de la glissière et sur laquelle sont fixés deux petites pattes. Les patins de frein du vélo appliqueront leur poussée sur celles-ci. Cette pression sera ensuite transformée en traction sur le câble Bowden via 2 petites poulies. Celui-ci transmettra à son tour cette traction pour appliquer une pression des patins de frein (du prototype) sur la première roue de friction. La longueur du câble Bowden sera suffisante pour permettre une variation de distance de l'ordre de 25 à 30 cm. L'ensemble du système de frein n'a pas été dimensionné, il est seulement schématisé.

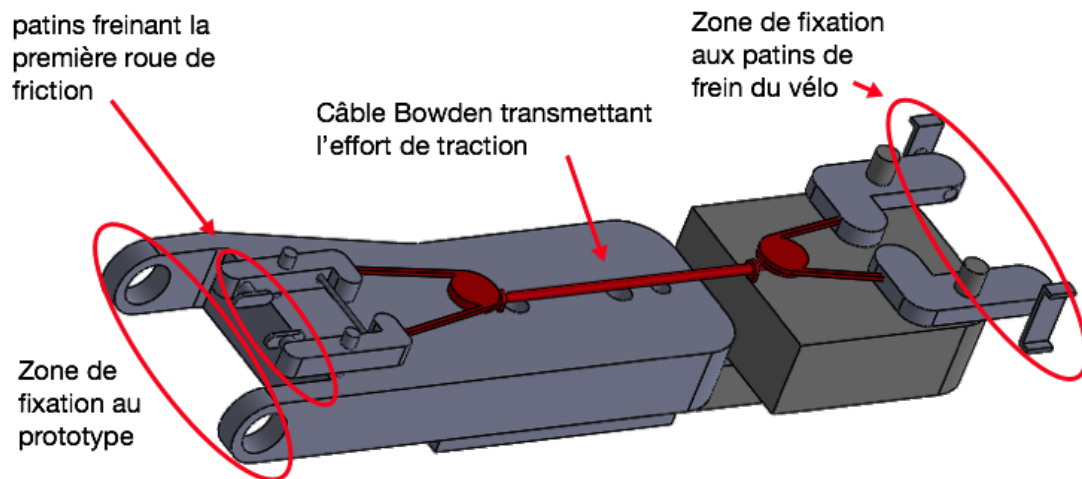


FIGURE 2.62 – Vue général du système de frein

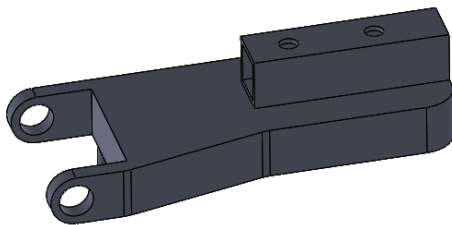


FIGURE 2.63 – Plaque fixée au prototype

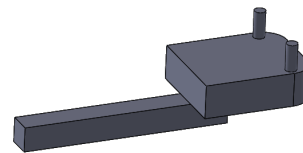


FIGURE 2.64 – Plaque fixée au vélo

2.5 Prototypage

Bien que le prototype n'ait pas été réalisé dans ce mémoire, chaque pièce a été pensée pour être soit usinée, soit commandée chez un fournisseur. La plupart d'entre elles peuvent être usinées en une fois. Néanmoins, certaines doivent être usinées en plusieurs parties puis solidarisées par soudage.

2.5.1 Pièces choisies dans un catalogue constructeur

Certaines d'entre elles étant des pièces courantes, il est plus simple et plus économe de les commander directement chez un fournisseur tel que Misumi. Celui-ci fournit aux clients un catalogue papier [8] ainsi qu'un site internet [9] sur lequel il est possible de commander des pièces directement.

Dans le cadre de ce mémoire, les roulements (figure 2.65) ainsi que les axes de pivots, les écrous et les écrous papillons doivent y être commandés en cas de fabrication du prototype. Le moyeu du vélo [10] (figure 2.67) ainsi que la cassette de 3 vitesses [11] (figure 2.66) ont aussi été commandés en ligne.



FIGURE 2.65 – Roulements du prototype



FIGURE 2.66 – Pignons du prototype



FIGURE 2.67 – Moyeu du prototype

2.5.2 Pièces solidarisées par soudage

Comme décrit précédemment, certaines pièces ne peuvent pas être usinées en une seule partie. Pour contrer ce problème, les pièces en question sont conçues en plusieurs parties aisément usinables. Elles sont ensuite soudées. Chacune d'entre elles a été prévue avec des trous de centrage qui permettent, à l'aide de goupilles, l'alignement et le maintien des pièces entre elles pendant les opérations de soudure.

2.5.3 La plaque de fixation du vélo

Cette pièce est composée de 2 parties : une plaque (figure 2.68) et un tube usinés (figure 2.69).

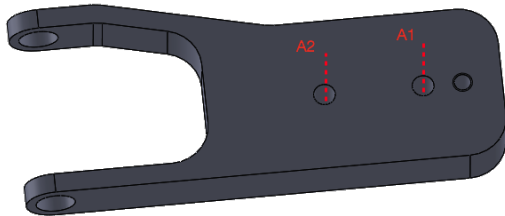


FIGURE 2.68 – Plaque usinée

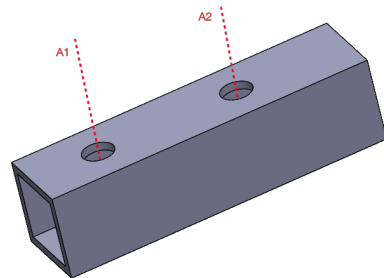


FIGURE 2.69 – Tube usiné

2.5.4 Les plaques de fixation de la première roue de friction

Cette pièce est composée de 3 parties : un tube (figure 2.70), une plaque (figure 2.71) et une pièce en H usinée (figure 2.72).

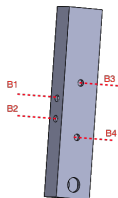


FIGURE 2.70 – Tube usiné

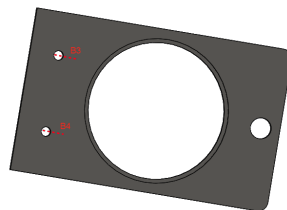


FIGURE 2.71 – Plaque usinée

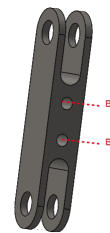


FIGURE 2.72 – Pièce en "H"

2.5.5 Le tube de la glissière de réglage de la roue intermédiaire

Cette pièce est composée de 2 parties : une petite pièce usinée en forme de U (figure 2.73) et un tube (figure 2.74).

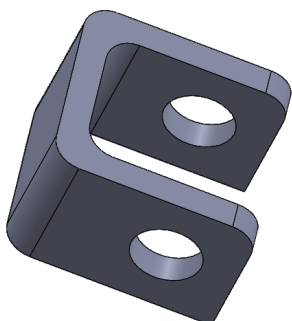


FIGURE 2.73 – Pièce en U



FIGURE 2.74 – Tube usiné

2.5.6 La glissière verticale qui permet le réglage en hauteur du système

Cette pièce est composée de 2 parties : une poutre en arc de cercle (figure 2.75) et une plaque en forme de L (figure 2.76).

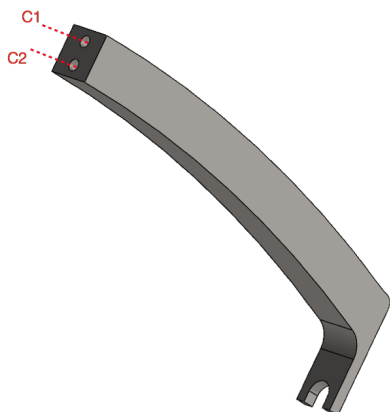


FIGURE 2.75 – Poutre en arc de cercle

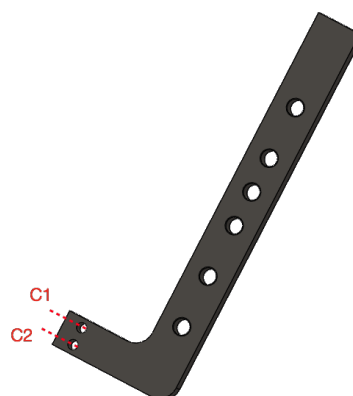


FIGURE 2.76 – Plaque en "L"

2.6 Notice de montage

Comme évoqué précédemment, le prototype n'ayant pu être usiné à temps, ce mémoire fournit une notice de montage du prototype.

2.6.1 Montage de la première roue de friction (A)

La première étape consiste à assembler les différents éléments de la première roue de friction. Pour commencer, insérez le moyeu dans la roue puis boulonnez-le à l'aide de 6 vis M3x10. Si l'arbre a dû être retiré pour l'usinage du moyeu, insérez-le ensuite et fixez-le à l'aide des écrous (1) et (2) fournis avec le moyeu.

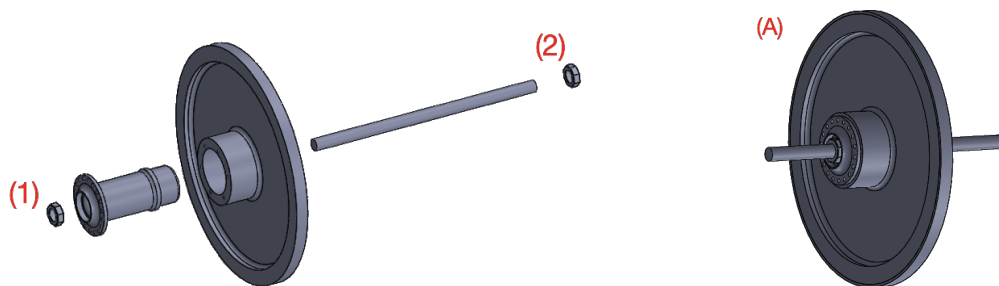


FIGURE 2.77 – Assemblage de la première roue de friction

2.6.2 Montage de la roue de friction intermédiaire (B)

La seconde étape consiste à assembler les différents éléments de la roue de friction intermédiaire. Insérez les 2 roulements à flasque de part et d'autre de la roue puis insérez l'arbre. Pour finir, insérez les 2 entretoises sur celui-ci.



FIGURE 2.78 – Assemblage de la roue de friction intermédiaire

2.6.3 Montage de la glissière de réglage de la roue de friction intermédiaire

L'étape suivante est l'assemblage des 3 éléments des 2 glissières de réglage de la roue intermédiaire. Insérez d'abord le clapet dans le U puis, insérez l'axe de pivot que vous bloquez avec le circlips fournis avec celui-ci. Répétez l'opération pour la seconde glissière.

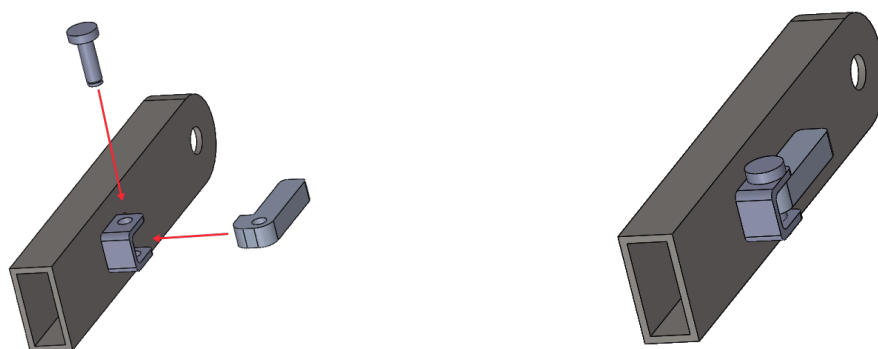


FIGURE 2.79 – Assemblage de la glissière de réglage intermédiaire

2.6.4 Montage des barres de support côté gauche (C)

Ensuite, vient l'assemblage du bras latéral gauche. Insérez la tige dans la glissière puis le bras intermédiaire dans celle-ci. Après, faite passer l'autre extrémité du bras intermédiaire dans l'alésage prévu à cet effet et boulonnez le avec l'écrou (3).

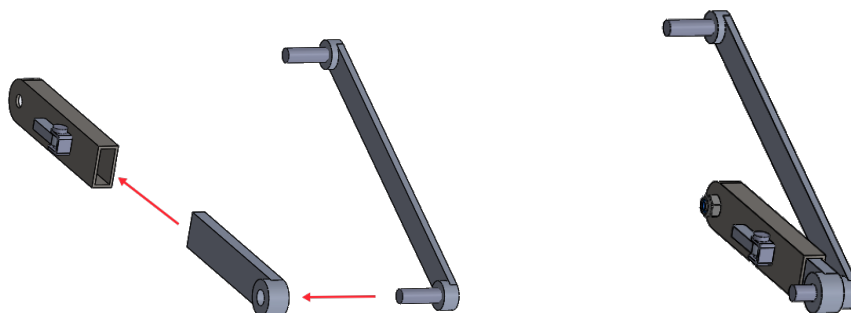


FIGURE 2.80 – Assemblage bras gauche (partie 1)



FIGURE 2.81 – Assemblage bras gauche (partie 2)

2.6.5 Montage des barres de support côté droit (D)

Répétez les opérations que vous venez d'accomplir sur le bras de droite.

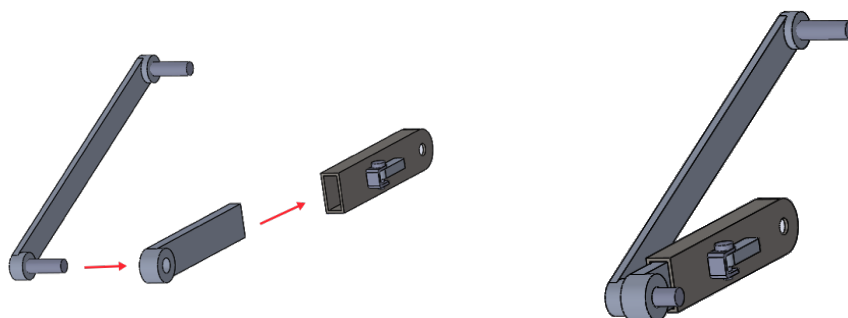


FIGURE 2.82 – Assemblage bras droit (partie 1)

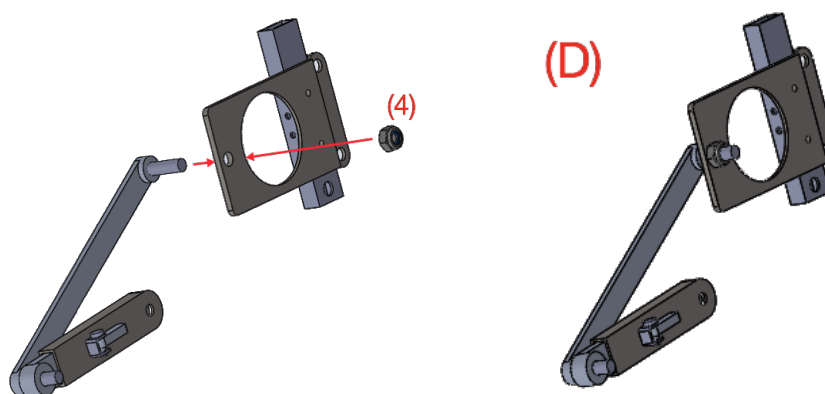


FIGURE 2.83 – Assemblage bras droit (partie 2)

2.6.6 Assemblage des 2 roues de friction (E)

Il est maintenant possible d'assembler la première roue de friction (A), la seconde roue de friction (B) ainsi que les bras gauches (C) et droits (D). La première étape consiste à emboîter les 2 roues de friction dans le bras gauche et à les solidariser via l'écrou (6). Insérez ensuite le roulement (7) sur la première roue de friction par la droite. Après, emboîtez le bras droit et fixer le à la roue intermédiaire via l'écrou (8). Pour finir, on visse la cassette de pignons (9) par la droite du système.

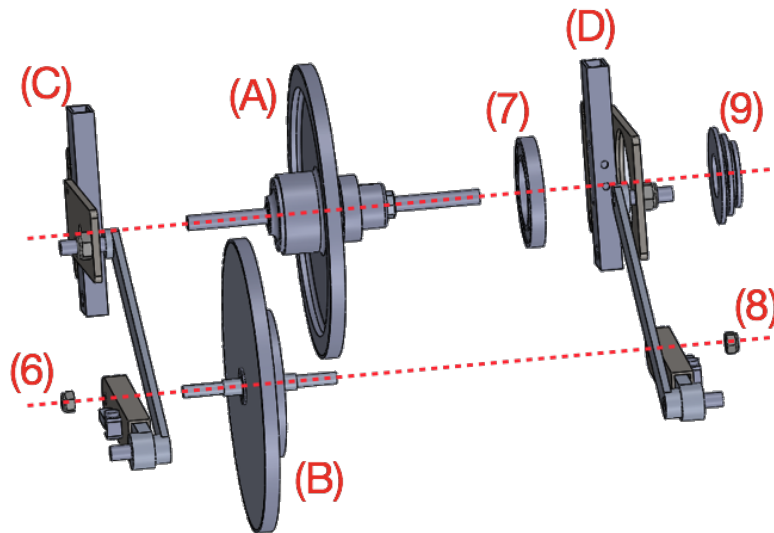


FIGURE 2.84 – Assemblage des 2 roues de friction

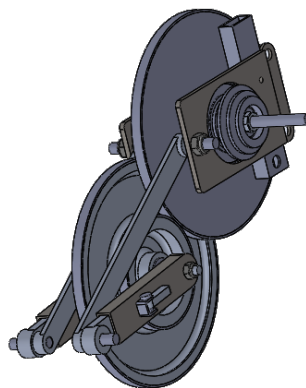


FIGURE 2.85 – Roues de friction assemblées (E)

2.6.7 Montage du rouleau

Pour monter le rouleau, il suffit de passer l'arbre à travers ce dernier puis de placer les roulements de part et d'autre de celui-ci. On peut alors emmancher les entretoises de chaque côté.

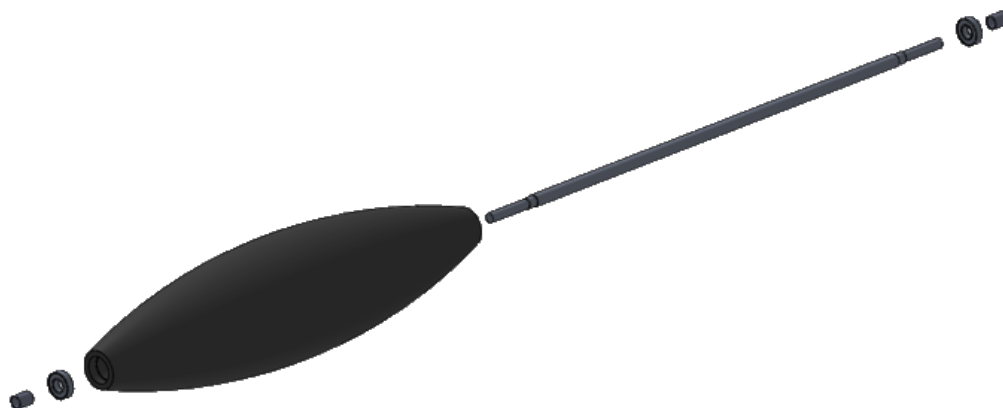


FIGURE 2.86 – Assemblage du rouleau

2.6.8 Assemblage des glissières de réglage vertical et du rouleau (F)

On peut ensuite y placer les 2 bras verticaux qui font office de réglage vertical du système.



FIGURE 2.87 – Assemblage des glissières de réglage vertical (F)

2.6.9 Assemblage du rouleau et des roues de friction

Enfin, on peut assembler les parties (E) et (F) en les emboîtant puis en rajoutant les 2 derniers bras de liaison (10) et (11) et en boulonnant le tout avec les écrous (12), (13), (14), (15).

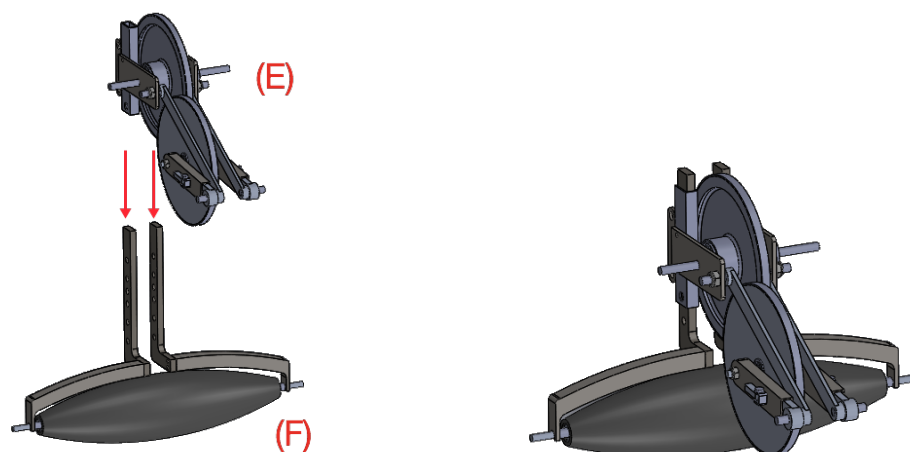


FIGURE 2.88 – Assemblage parties (E) et (F)

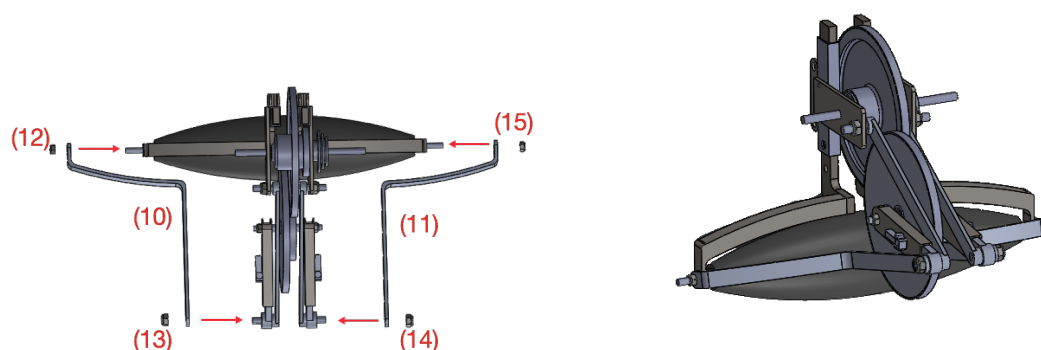


FIGURE 2.89 – Assemblage des bras de liaison au rouleau

2.6.10 Montage et assemblage du système de fixation au reste du prototype

En ce qui concerne le système de fixation, il faut simplement insérer la tige (16) dans le tube (17) puis assembler le tout avec le reste du prototype.

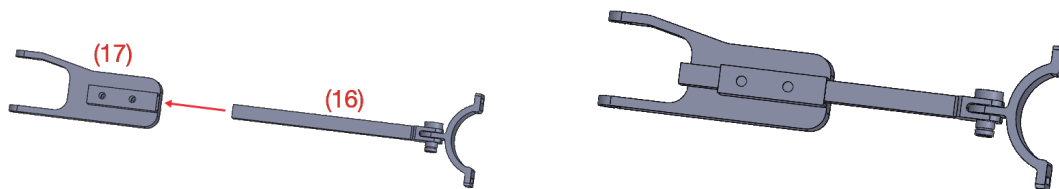


FIGURE 2.90 – Assemblage de la glissière de fixation

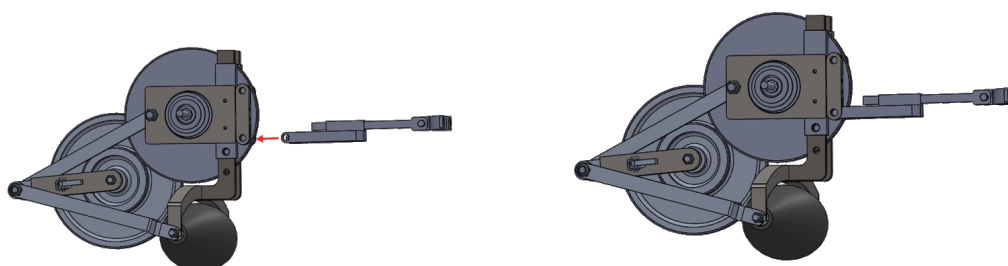


FIGURE 2.91 – Assemblage de la glissière de fixation et du prototype

2.6.11 Montage et assemblage du système de freinage au reste du prototype

La dernière partie à assembler est le système de frein. Dans un premier temps, il faut insérer la tige (19) dans la glissière (18) (figure 2.92). Ensuite, assemblez les patins de frein (20) et (21) sur la glissière (18) et les 2 autres (22) et (23) sur la pièce (19) (figure 2.93). Enfin, fixez le ressort (24) entre les patins de freins (20) et (21) puis fixez le câble Bowden des 2 côtés (figure 2.94). Pour finir fixer le système au dessus du système de fixation dans la partie haute du "H" (figure 2.96).

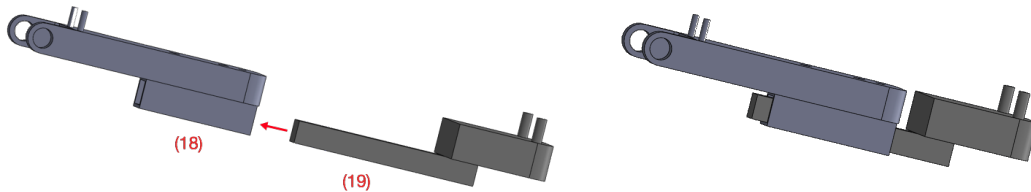


FIGURE 2.92 – Assemblage de la glissière de frein

FIGURE 2.93 – Assemblage des patins de frein

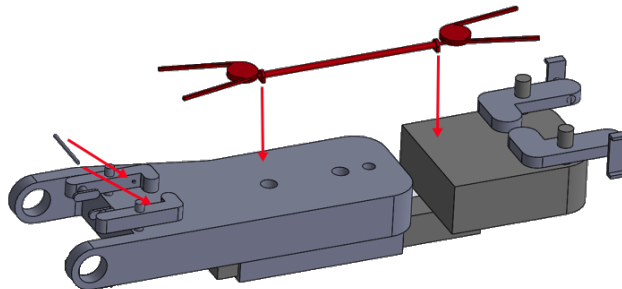


FIGURE 2.94 – Assemblage du câble Bowden

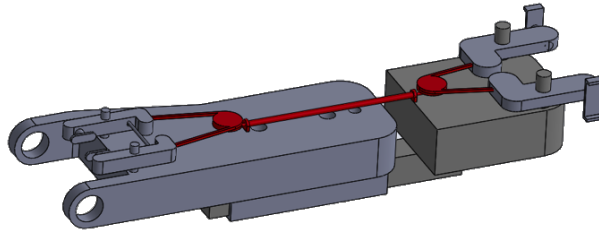


FIGURE 2.95 – Ensemble du système de frein assemblé

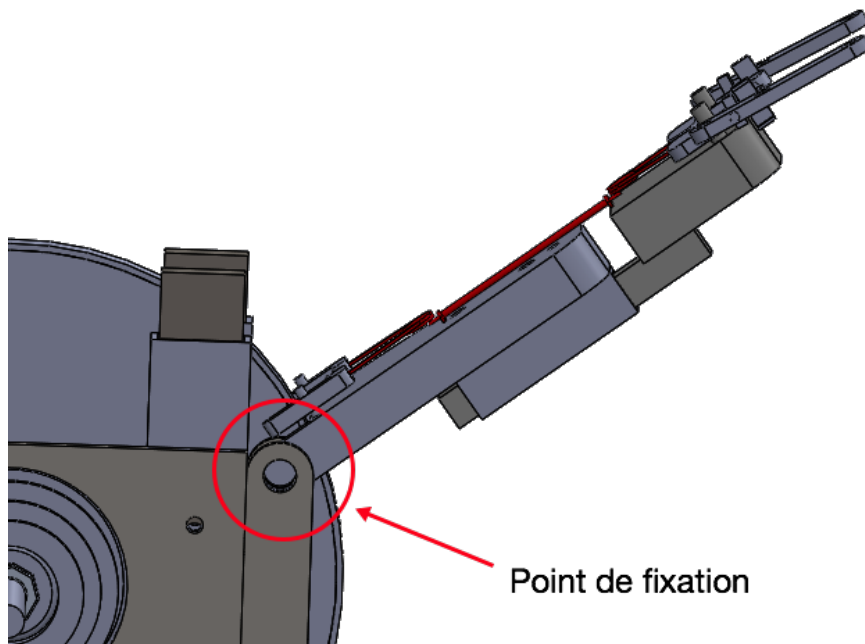


FIGURE 2.96 – Fixation du système de frein au prototype

3 Analyse de la stabilité

Afin de valider l'utilisation de ce système, une analyse de stabilité est effectuée. Tout d'abord, les hypothèses et les formalismes de modélisation sont présentés et ont été inspirés du document "On the rigid contact and pure Rolling motion on a at ground through a relative coordinates MBS formalism : Theoretical aspects and implementation in Robotran" réalisé par Quentin Docquier [12]. Vient ensuite une rapide recontextualisation bibliographique ; laquelle a permis la création d'un premier modèle dynamique 2D réalisé avec Robotran. Après, une seconde version du modèle est présentée pour inclure l'épaisseur et la courbure de la roue de vélo. Enfin, la troisième version intègre quant à elle un modèle de masse et d'inertie plus proche de la réalité. Pour finir, les résultats obtenus sont présentés et analysés.

3.1 Modèle et formalismes

Hypothèses de modélisation

- Le corps en contact avec la surface est axisymétrique.
- Un disque est parfaitement circulaire et totalement rigide et possède une épaisseur nulle.
- Une roue est parfaitement circulaire et totalement rigide avec une épaisseur dont le profil est en demi-cercle.
- Le sol est horizontal, ne contient aucune irrégularité

Equations pour un système multicorps

Les équations de mouvement pour un système multicorps contraint sont écrites comme suit (voir "Robotran basics"[13] et [14]) :

$$M(q).\ddot{q} + c(q, \dot{q}, frc, trq, g) = Q(q, \dot{q}) + J\lambda \quad (4)$$

$$h(q) = 0 \quad (5)$$

$$\dot{h}(q, \dot{q}) = J(q).\dot{q} = 0 \quad (6)$$

$$\dot{h}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = J(q).\ddot{q} + \dot{J}\dot{q}(q, \dot{q}) = 0 \quad (7)$$

Outre les contraintes de boucle, d'autres contraintes algébriques dénommées "contraintes de l'utilisateur" $h_{usr}(q) = 0$ peuvent survenir pour d'autres raisons, par exemple pour imposer le parallélisme entre deux corps ($\theta^i = \theta^j$). En rassemblant ces m contraintes, on peut écrire :

$$h(q) = \begin{pmatrix} h_t(q) \\ h_{usr}(q) \end{pmatrix} = 0 \quad [mx1]$$

Les contraintes utilisateur ne sont pas générées automatiquement. Il faut donc exprimer la matrice Jacobienne J ainsi que le terme quadratique $\hat{J}\dot{q}$ en fonction des coordonnées généralisées q et des vitesses généralisées $\dot{q}$.

$$\dot{h}_{usr}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = J(q, l(q), \theta(q))\ddot{q} = 0$$

$$\ddot{h}_{usr}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = J(q, l(q), \theta(q))\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q}, l(q), \dot{l}(q, \dot{q})\theta(q), \dot{\theta}(q, \dot{q}))\dot{q} = 0$$

3.2 Contextualisation

Le modèle de référence pour ce projet est présenté dans le document "Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle : a benchmark and review" co-écrit par Meijsaard, Papadopoulos, Andy Ruina et Schwab [4] et est communément appelé modèle de Schwab. Il propose une analyse de l'équilibre et de la stabilité d'un vélo par linéarisation des équations dynamiques en roulement sans glissement et ce pour un modèle de vélo simple. En effet il considère uniquement quatre corps ; un cadre (comprenant le poids et l'inertie du cycliste), une fourche et les deux roues (voir figure 3.1).

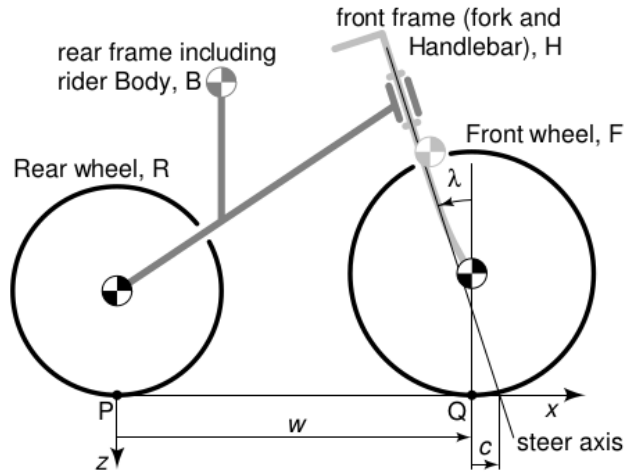


FIGURE 3.1 – Modèle de vélo de Schwab [4]

Les résultats de l'analyse de stabilité sont interprétés au travers d'un graphique représentant les valeurs propres obtenues en résolvant le problème aux valeurs propres pour différentes vitesses d'avance. Pour rappel, pour que le véhicule soit autostable les valeurs propres réelles doivent être négatives. Les résultats obtenus par Schwab sont visibles sur le graphique de la figure 3.2.

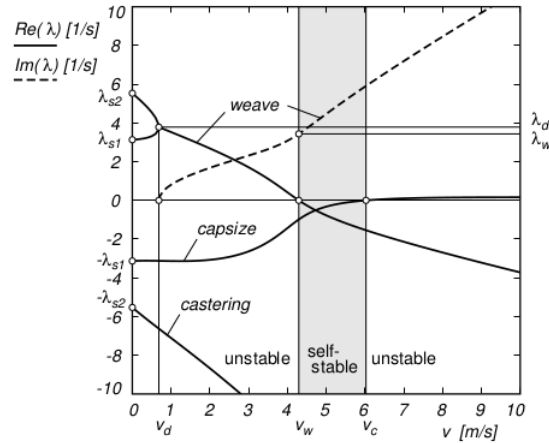


FIGURE 3.2 – Valeurs propres de l’analyse de stabilité de Schwab [4]

Ce graphique met en évidence 3 modes principaux :

Le louvoiement (weave)

Le mode de louvoiement est un mouvement oscillant dans lequel le vélo se dirige de manière sinueuse dans la direction d’avance et ce avec un léger décalage de phase par rapport à son inclinaison. Lorsqu’il est stable ce mode tend à s’amortir ; inversement il s’amplifie lorsqu’il est instable et peut mener à la chute.

Le chavirement (capsize) = roulis

Lorsque le mode de chavirement est instable, le vélo s’enfonce progressivement dans une spirale qui se resserre au cours du temps, ce qui mène à une augmentation de l’angle d’inclinaison du vélo et finalement à la chute.

Le guidonnage (castering)

Le mode de guidonnage est lié à la trajectoire de la roue avant lorsqu’elle est libre. Quand le mode est stable, ce qui est toujours le cas pour un vélo, la roue avant réagit comme une roue de caddy de supermarché et se réaligne sur la trajectoire du vélo.

Dans l’analyse de Schwab (figure 3.2), le louvoiement est instable en dessous d’une vitesse de 4.3 m/s puis devient de plus en plus stable en accélérant. Le chavirement est lui stable à basse vitesse et devient instable aux alentours de 6 m/s. Le mode de castering est toujours très stable. On observe donc une plage d’autostabilité, pour ce modèle-ci, pour des vitesses comprises entre 4.3 m/s et 6 m/s.

3.3 Modélisation d'un vélo adulte

Dans un premier temps, il est intéressant de se pencher sur la conception d'un modèle Robotran dont les dimensions sont identiques à celles du vélo utilisé par Schwab afin d'avoir une base cohérente avant de faire varier différents paramètres. Il faut noter que ce modèle fait l'hypothèse d'un problème plan (pas d'épaisseur).

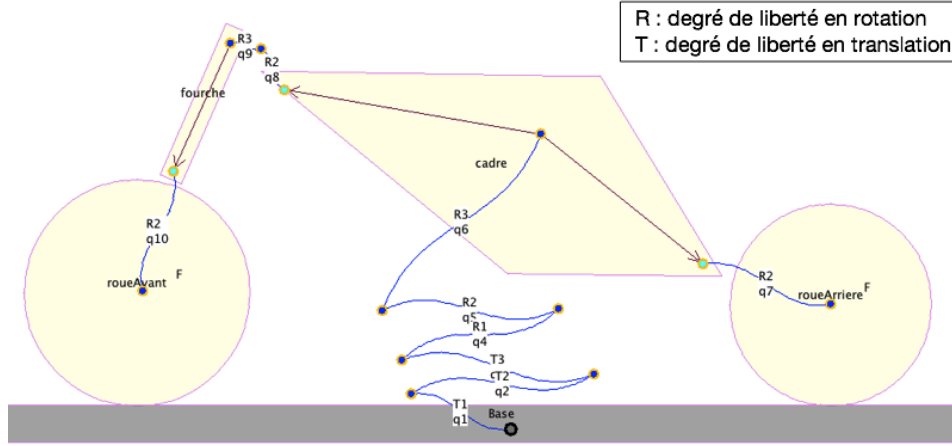


FIGURE 3.3 – Robotran adulte
(les degrés de liberté sont représentés via les lignes bleues)

Comme on peut le remarquer sur la figure 3.3, ce modèle comporte 6 degrés de liberté au niveau du cadre, 1 au niveau de la direction du guidon ainsi que 1 pour chacune des roues. Il est donc composé de 9 degrés de liberté au total. Le joint "q8", quant à lui, fixe l'angle d'inclinaison du guidon avec la verticale.

3.4 Roulement sans glissement

Afin de s'assurer de coller au mieux au modèle de monsieur Schwab, il est nécessaire de faire l'hypothèse de roulement sans glissement d'abord en 2 dimensions, puis en 3 dimensions.

3.4.1 Explications

En quelques mots, le concept du roulement sans glissement (RSG) pourrait être résumé comme le mouvement en rotation d'un corps par rapport à sa surface d'appui sans qu'il ne glisse sur celle-ci. Ce qui signifie que la vitesse du point matériel de contact est nulle (figure 3.4).

Dans le cas d'un RSG en 3 dimensions, il faut tenir compte de la composante transverse au pneu. En effet, celle-ci doit être considérée comme nulle pour éviter tout glissement latéral. En repartant du modèle de base (figure 3.3), il est nécessaire de s'intéresser à nouveau aux différents degrés de liberté. En effet, certains d'entre eux vont être bloqués par la contrainte de roulement sans glissement (figure 3.5).

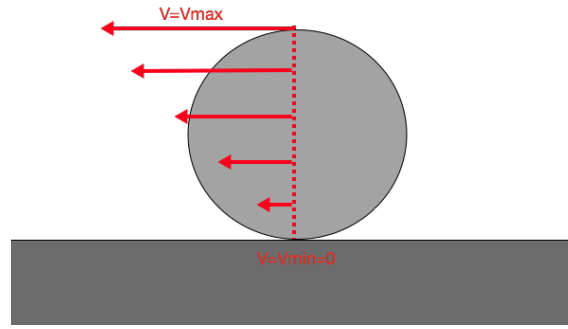


FIGURE 3.4 – Distribution de vitesse dans une roue en RSG

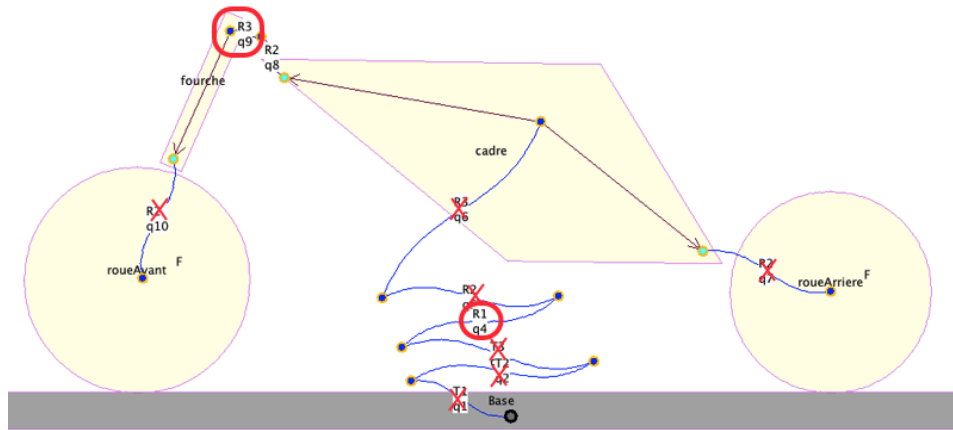


FIGURE 3.5 – Degrés de libertés restants après application des contraintes

La roue arrière est entraînée par un couple, représenté par une variable commandée dans Robotran ; le joint "q7" n'est donc pas libre. Via les contraintes de RSG aux 2 roues, on sait aussi que les joints "q1", "q2", "q3", "q5", "q6", "q10" en sont directement dépendantes et ne sont donc plus des degrés de liberté. Une fois cette démarche effectuée, il ne reste plus que 2 variables indépendantes (donc 2 degrés de liberté), à savoir les joints "q4" (inclinaison latérale du vélo) et "q9" (rotation du guidon pour diriger le vélo).

3.4.2 Comparaison modèle adulte RSG et Schwab

Afin de valider le modèle, une comparaison au modèle de Schwab s'impose :

Comme on peut le constater sur la figure 3.6, le modèle RSG colle de façon très précise au graphe de Schwab ce qui en fait un modèle réaliste. Celui-ci pourra donc être utilisé et extrapolé dans le cas d'une roue en 3 dimensions par la suite.

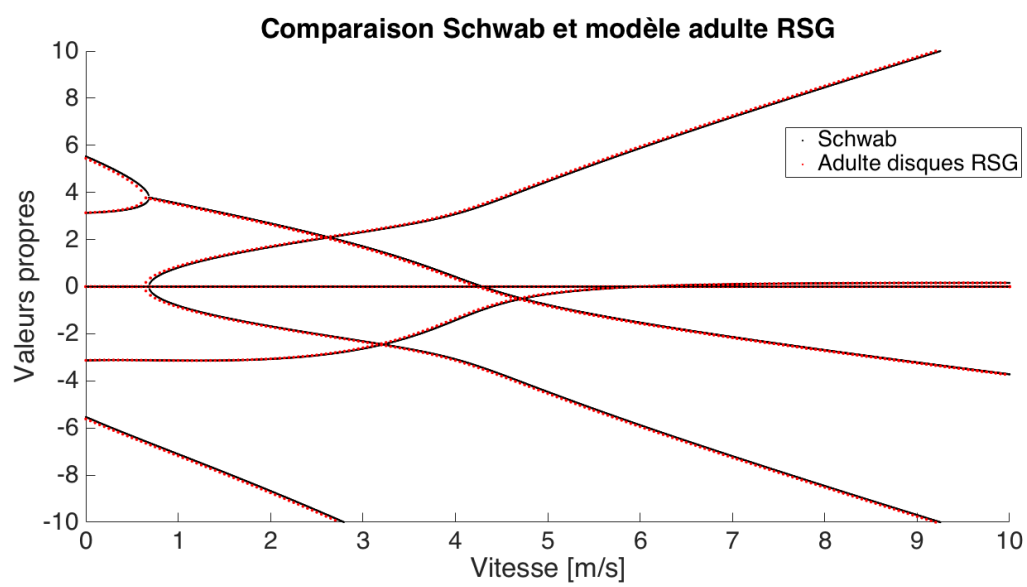


FIGURE 3.6 – Validation du modèle adulte RSG avec celui de Schwab

3.5 Modélisation d'un vélo enfant

3.5.1 Modèle du vélo enfant

Pour pouvoir analyser le comportement d'un vélo enfant, le modèle du vélo adulte présenté ci-dessus à été modifié avec les dimensions et les masses des différents composants d'un vélo pour enfant représenté à la figure 3.7. Ce vélo est équipé de roues de 20 pouces et est adapté pour un enfant d'une taille proche de 1.30 mètre.



FIGURE 3.7 – Vélo enfant 20" utilisé dans le modèle [15]

Pour chaque composante du modèle, les masses mesurées sont reprises dans le tableau de la figure 3.8, les dimensions sur la figure 3.9 et l'ensemble été mesuré expérimentalement. Les roues avant et arrière ont respectivement un diamètre de 48 et 45 centimètres.

-	masse [kg]
cadre	7
guidon	3.3
roue avant	1.0
roue arrière	1.2
TOTAL VELO	12.5
enfant	30
TOTAL	42.5

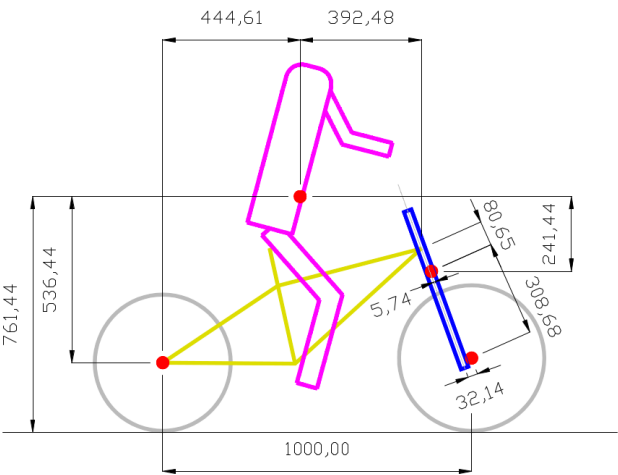


FIGURE 3.8 – Masses du modèle enfant

FIGURE 3.9 – Dimensions pour le modèle enfant

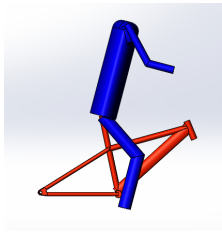


FIGURE 3.10 – Solidworks cadre/enfant

Le centre de masse (représenté sur la figure 3.9 par un point rouge) et la matrice d'inertie de chacun des corps composant le modèle, ont été modélisés en Solidworks. La figure 3.10 représente l'ensemble cadre/enfant modélisé comme un assemblage sur Solidworks.

3.5.2 Comparaison modèle enfant et adulte

Par la suite, il est intéressant de comparer la stabilité entre les 2 tailles de vélos (enfant et adulte).

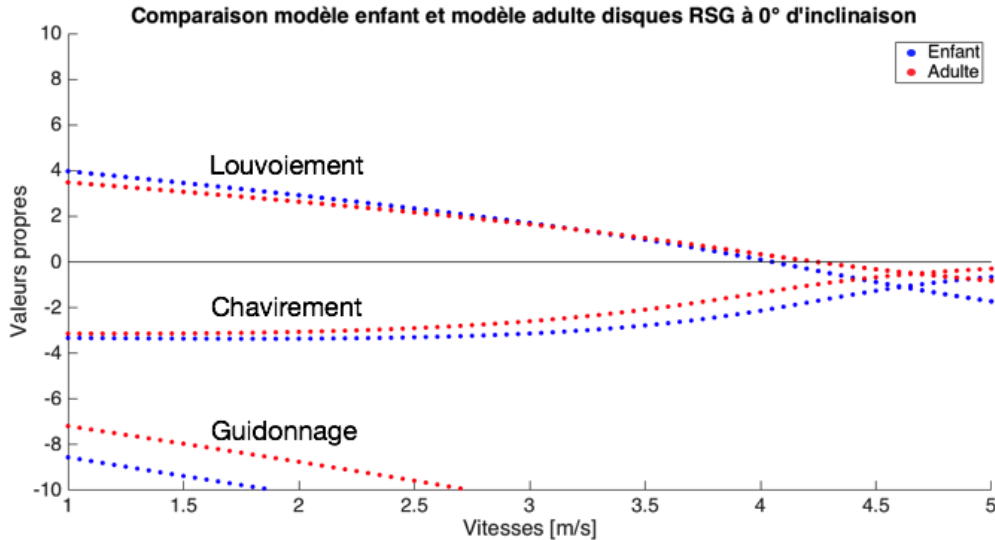


FIGURE 3.11 – Différence entre les deux modèles

La figure 3.11 montre que le mode de chavirage (capsize) d'un vélo enfant sera plus stable que celui d'un vélo adulte. On peut aussi remarquer qu'en ce qui concerne le mode de louvoisement, à faible vitesse, le vélo adulte sera plus stable mais la tendance s'inverse quand la vitesse se rapproche de 4 m/s.

Il est néanmoins important de notifier que le mode de chavirement sera probablement prépondérant dans l'apprentissage du vélo puisque il fait appel à l'équilibre de l'enfant là où le mode de louvoisement peut se rectifier aisément via le guidon. On remarquera donc qu'un vélo de petite taille sera plus adapté à l'apprentissage.

Les réactions des vélos adulte et enfant sont très similaires. Les enfants étant la cible principale des adaptations qui suivent, la suite du projet se concentrera autour d'un vélo de taille enfant.

3.5.3 Ajout d'un rouleau à la roue arrière

Implémentation

La première phase pour l'ajout d'un rouleau à la roue arrière est une considération purement géométrique. Le rayon de roulement est la distance entre l'axe de rotation et le sol au point de contact. Lorsqu'on se trouve en ligne droite, celui-ci est donc identique au rayon de la roue disque (225 mm pour le vélo enfant). L'inertie et la masse ne sont pas modifiées, de sorte que le seul paramètre modifié est la géométrie de la surface de roulement arrière. Outre le décalage du point de contact par rapport au sol, l'ajout d'un rouleau implique une modification du rayon de roulement en fonction de l'inclinaison du vélo. Cette modification aura un impact important pour l'analyse modale.

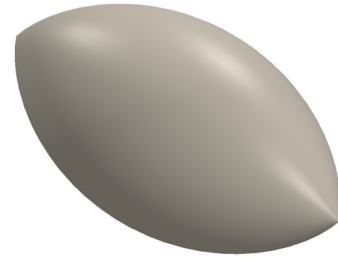


FIGURE 3.12 – Géométrie d'un rouleau (rayon courbure : 60cm)

En effet, pour une vitesse d'avance fixée, on peut en déduire une vitesse de rotation du rouleau nécessaire pour respecter la condition de roulement sans glissement. Étant donné la courbure du rouleau, le rayon de roulement décroît lorsque le vélo s'incline. Cette diminution a un impact direct sur la vitesse de rotation du rouleau.

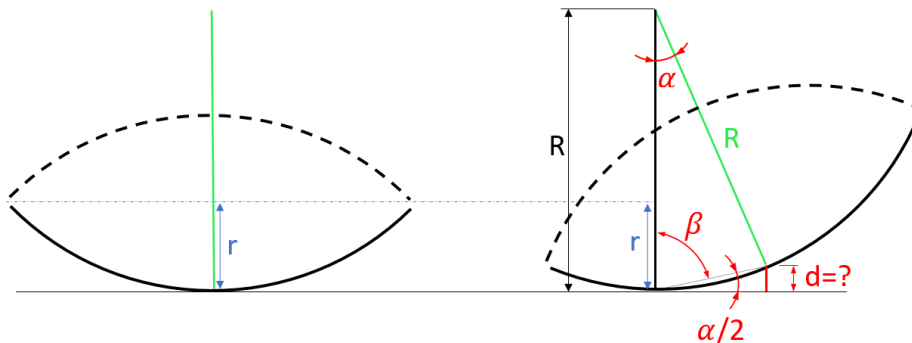


FIGURE 3.13 – Calcul du rayon de roulement

En effet, pour un rayon de courbure R , en ligne droite, le rayon de roulement sera égal à la distance r correspondant au rayon de la roue de base. Mais lors de l'inclinaison du vélo d'un angle α (exagéré sur le schéma), le rayon de roulement sera diminué de la distance d , comme illustré sur la figure 3.12. Cette distance peut être déterminée à l'aide de l'équation de la corde du cercle ($C = 2R\sin(\frac{\alpha}{2})$) et de quelques formules trigonométriques. On obtient que : $d = 2R\left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2$

Comparaison des différentes courbures

Il est à présent intéressant de comparer la stabilité d'un vélo lors de l'ajout d'un rouleau mais également pour différents rayons de courbure de ce dernier. Ici, 2 rouleaux différents ont été considérés dont les rayons de courbure sont 60 centimètres et 3 mètres. Leur profil est visible sur la figure 3.14 où la couleur des points correspond aux courbes sur les graphiques qui suivent. Les courbes des disques étudiées dans les sections précédentes seront affichées en noir.

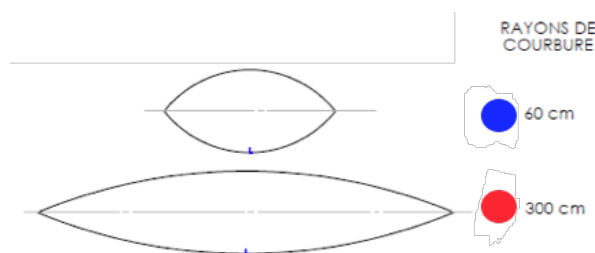


FIGURE 3.14 – Différents rayons de courbure considérés

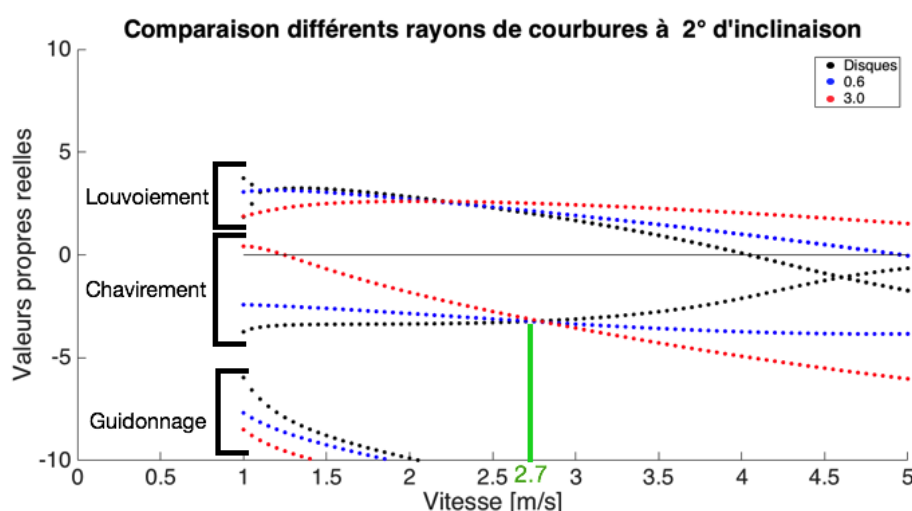


FIGURE 3.15 – Influence de l'ajout d'un rouleau et de différents rayons de courbure pour une faible inclinaison

La figure 3.15 permet de comparer la réaction d'un vélo enfant équipé à l'arrière soit d'un disque soit d'un rouleau de rayon de courbure de 0,6 ou 3 m pour une faible inclinaison (2° d'inclinaison). Lorsque le vélo est incliné, le modèle robotran n'arrive pas à déterminer de stabilité dynamique pour des vitesses trop faibles. Les vitesses inférieures à 1m/s ont donc été ignorées. On observe que :

- Pour le mode de louvoisement : à très faible vitesse (< 2 m/s), les rouleaux sont moins instables que le disque et cet effet s'accroît avec l'augmentation du rayon de courbure. À plus grande vitesse, le disque est par contre plus stable et l'instabilité augmente avec l'augmentation du rayon de courbure du rouleau.
- Pour le mode de chavirement : on observe une réaction inverse, le disque est plus stable pour une vitesse inférieure à 2.7 m/s ; par contre les rouleaux sont plus stables à grande vitesse et de plus en plus avec l'augmentation du rayon de courbure.
- Pour le mode de guidonnage : une grande stabilité est observée dans tous les cas et celle-ci augmente avec le rayon de courbure il peut donc être ignoré.
- Pour la plage d'autostabilité : cette dernière se décale de plus en plus vers les grandes vitesses avec l'augmentation du rayon de courbure mais elle s'élargit également.

Pour synthétiser, le mode de chavirement se stabilise significativement avec l'ajout d'un rouleau dès $2,7 \text{ m/s} \simeq 10 \text{ km/h}$ (figure 3.15) ce qui est une vitesse rapidement atteinte en vélo même pour un enfant. Pour rappel, le mode de louvoisement, même s'il est amplifié par l'ajout du rouleau, reste aisément contrôlable par l'utilisateur au moyen du guidon.

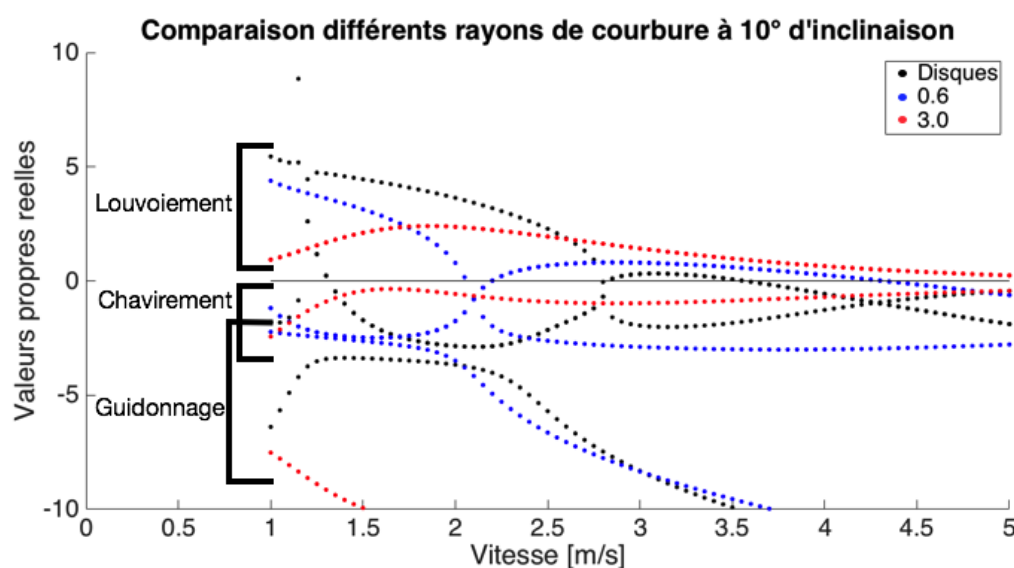


FIGURE 3.16 – Influence de l'ajout d'un rouleau et de différents rayons de courbure pour une inclinaison plus importante

La figure 3.16 présente les mêmes éléments géométriques mais pour un angle d'inclinaison du vélo plus élevé à savoir, 10° :

- Les courbes de chavirement ont le même profil pour le disque et pour une courbure de 60 centimètres.
- Lorsque le rouleau présente une courbure plus importante, le profil de la courbe de stabilité diffère. La stabilité est globalement moins élevée lorsque la vitesse augmente.

On peut donc conclure que pour un rayon de courbure donné, il existe un angle maximum d'inclinaison au delà duquel le modèle devient de plus en plus instable. Une étude sera alors nécessaire pour déterminer, pour un angle d'inclinaison maximum imposé, le rayon de courbure maximum. Plus ce rayon de courbure sera grand, plus le rouleau apportera de stabilité en ligne droite et à faible inclinaison.

Comparaison des différents angles d'inclinaison

Une fois les différentes courbures comparées, on peut observer l'influence sur la stabilité de différents angles d'inclinaison pour un rayon de courbure donné. La figure 3.17 représente une courbure de 0.3 mètre et la figure 3.18 de 3 mètres.

Sans grande surprise, l'augmentation de l'inclinaison implique une perte de stabilité du mode de chavirement. Le mode de louvoisement est, quant à lui, stabilisé par l'inclinaison du vélo. Pour un faible rayon, les courbes restent assez proches surtout à grande vitesse ; mais lorsque le rayon augmente, le mode de chavirement se déstabilise très rapidement avec l'angle d'inclinaison.

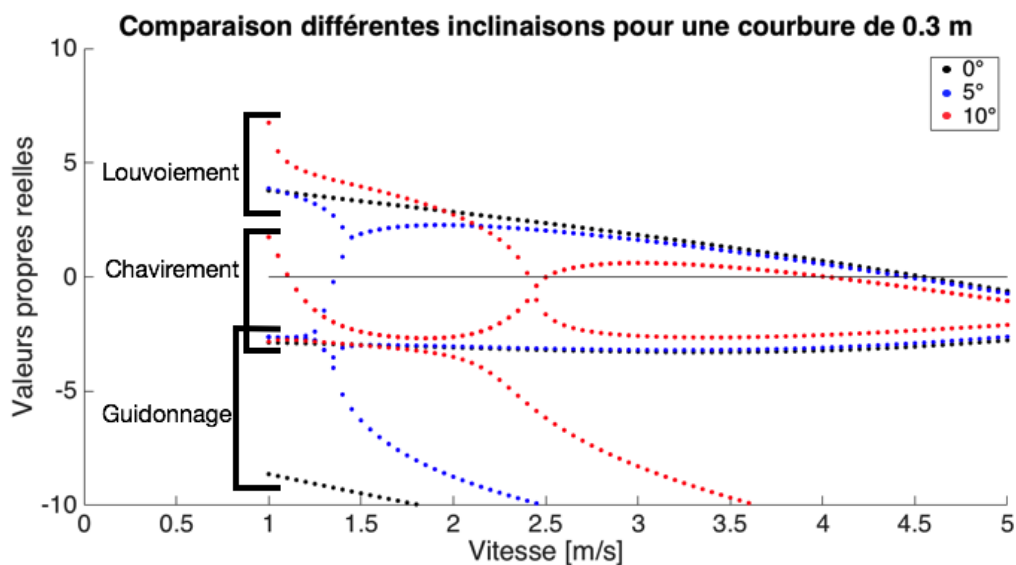


FIGURE 3.17 – Influence de l'angle d'inclinaison ; courbure = 0.3 m

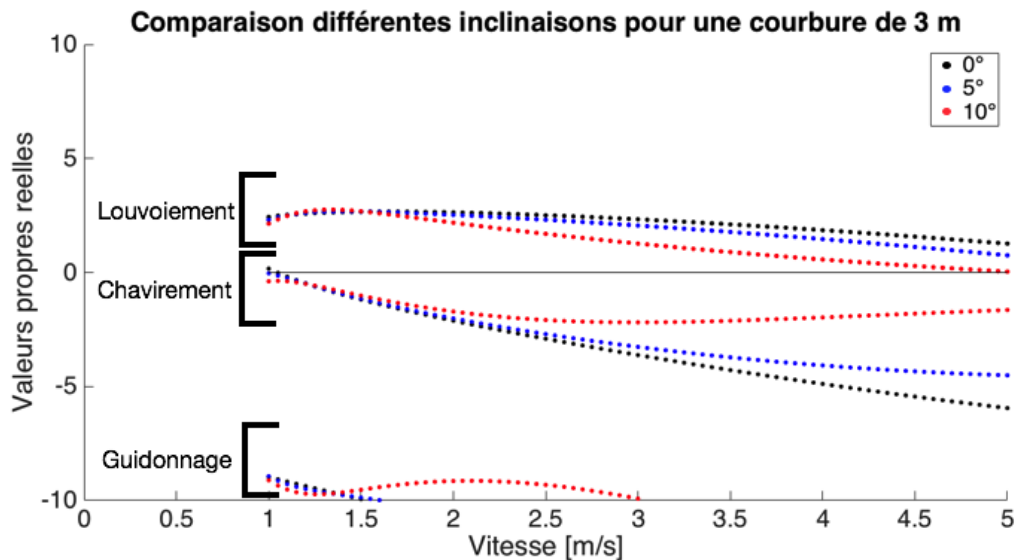


FIGURE 3.18 – Influence de l'angle d'inclinaison courbure = 3 m

3.5.4 Ajout de l'inertie du rouleau

L'inertie du rouleau a ensuite été adaptée pour coller au mieux à une situation réelle. Cette étape permet de valider ou non l'hypothèse faite précédemment à savoir : "L'inertie du rouleau n'a pas d'impact sur la stabilité du vélo".

Implémentation

En pratique, les rouleaux qui équipent ce type de vélo ont une hauteur (un diamètre de roulement maximum) d'une dizaine de centimètres. Afin de correspondre au mieux à la réalité, des rouleaux d'une hauteur maximum de 10 cm et de différents rayons de courbure ont été modélisés en Solidworks ; l'objectif est de déterminer tant leur inertie que leur masse. Le modèle Robotran a alors été modifié pour descendre le point d'ancrage de l'axe du rouleau, afin de conserver la géométrie de l'ensemble du vélo et d'y ajouter les inerties et masses réalistes qui diffèrent du modèle précédemment utilisé.

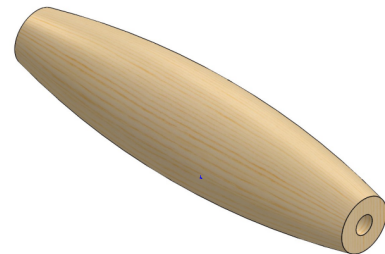


FIGURE 3.19 – Visualisation de la géométrie d'un rouleau réaliste (rayon courbure : 90cm)

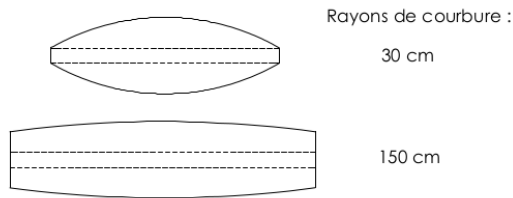


FIGURE 3.20 – Différents rouleaux considérés

Les deux rouleaux différents qui ont été modélisés sont représentés sur la figure 3.20. Ils ont un rayon de courbure respectif de 30 centimètres et 1.5 mètre. Leur rayon de roulement maximum est de 5 cm et il sont en caoutchouc plein à l'exception du logement central pour l'axe.

Comparaison en ligne droite

Comme on peut le constater sur les figures 3.21 et 3.22, lorsque le vélo se déplace en ligne droite (et donc que son inclinaison est nulle), la différence de stabilité est assez faible entre le modèle du vélo classique et celui dont l'inertie a été remplacée plus correctement. On pourra donc utiliser le modèle précédent comme référence.

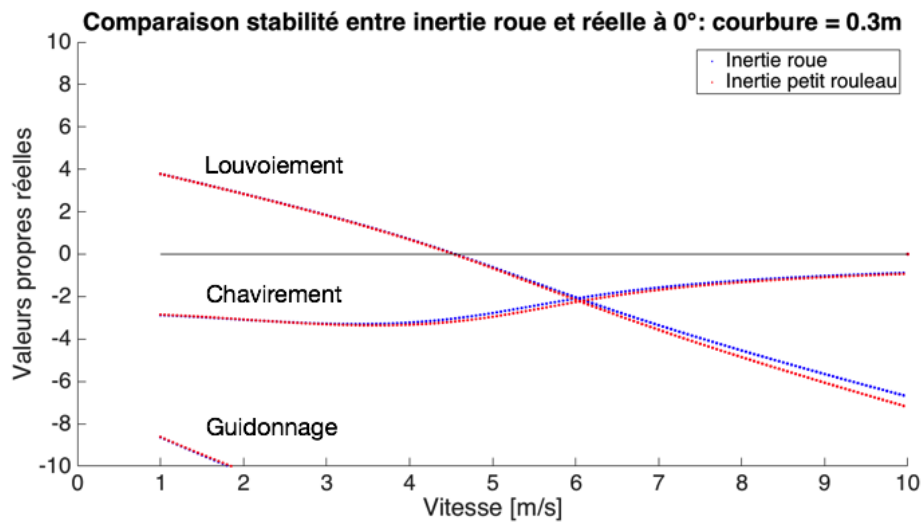


FIGURE 3.21 – Comparaison de la stabilité du modèle entre l'inertie d'une roue et l'inertie d'un petit rouleau à 0 ° d'inclinaison et pour une courbure de 0.3 mètre

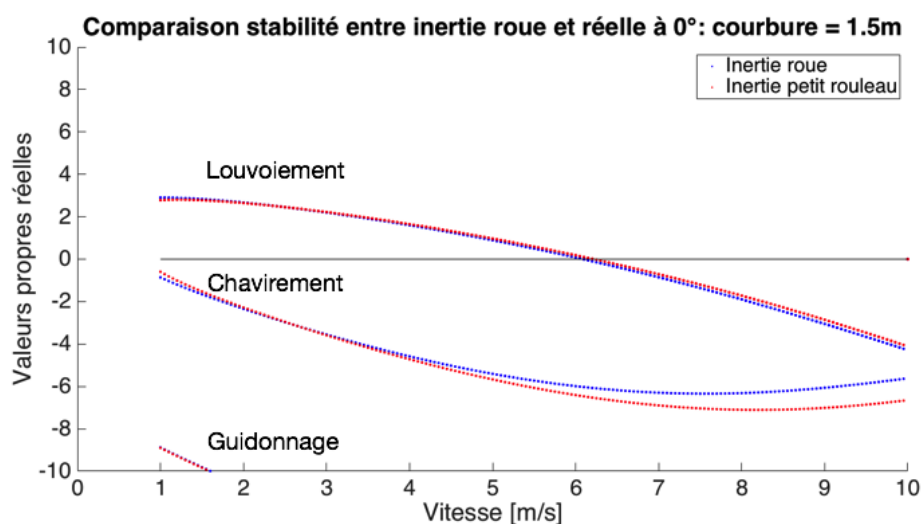


FIGURE 3.22 – Comparaison de la stabilité du modèle entre l’inertie d’une roue et l’inertie d’un petit rouleau à 0° d’inclinaison et pour une courbure de 1.5 mètre

Comparaison en courbe

Par contre, lorsque le vélo se déplace en courbe (et qu’il est donc incliné, ici à 10° d’angle), et pour des rayons de courbure plus élevés (voir figure 3.23 et 3.24), on pourra rapidement constater que le modèle dont l’inertie a été adaptée au petit rouleau diverge avec le modèle du vélo classique. Ce dernier ne sera donc pas une bonne approximation en courbe.

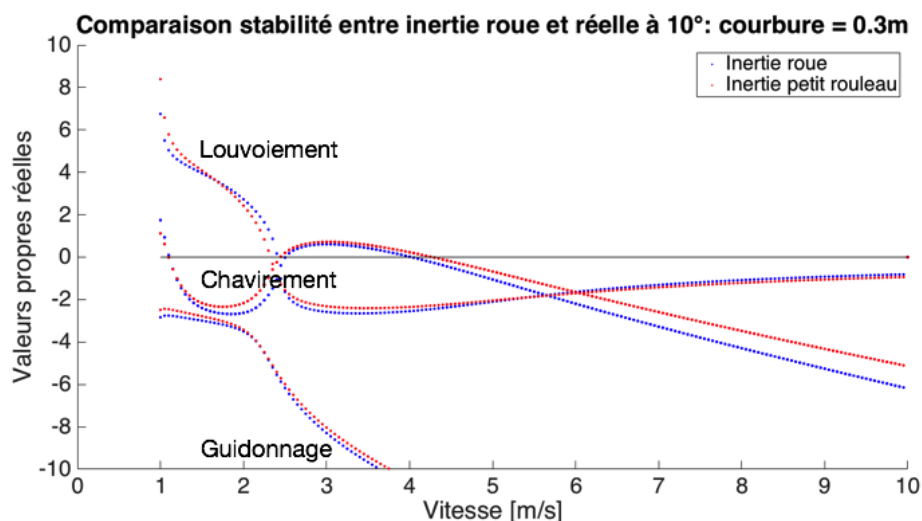


FIGURE 3.23 – Comparaison de la stabilité du modèle entre l’inertie d’une roue et l’inertie d’un petit rouleau à 10° d’inclinaison et pour une courbure de 0.3 mètre

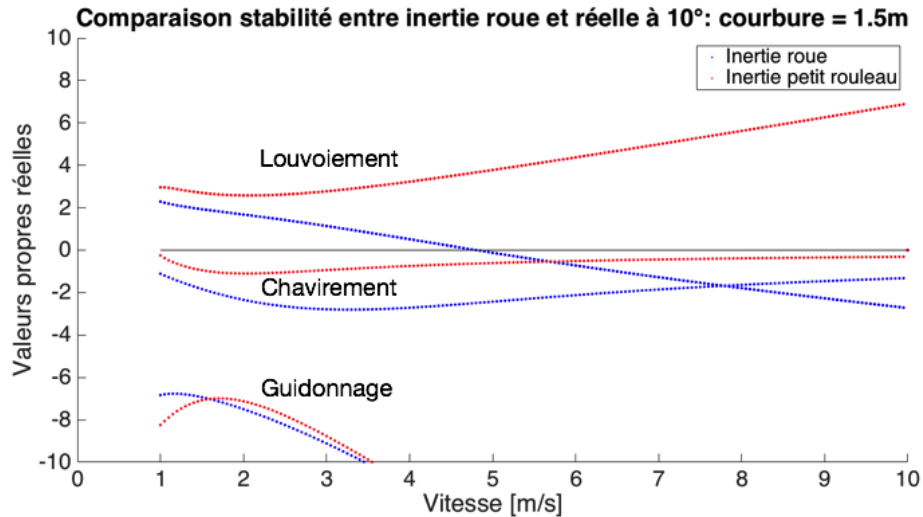


FIGURE 3.24 – Comparaison de la stabilité du modèle entre l’inertie d’une roue et l’inertie d’un petit rouleau à 10° d’inclinaison et pour une courbure de 1.5 mètre

3.6 Discussion sur l’analyse de stabilité

L’objectif final de ce projet est de faciliter l’apprentissage du vélo à des enfants en situation de handicap. Les deux principaux modes de stabilités sont le chavirement et le louvoisement. Comme on peut le constater dans l’analyse de stabilité présentée, le remplacement de la roue arrière par un rouleau augmente la stabilité du mode de chavirement à faible vitesse. Moins la courbure de celui-ci sera prononcée, plus le vélo sera stable. On remarque aussi que, moins la courbure est prononcée, moins le cycliste pourra incliner son vélo. Cette limitation peut poser des problèmes lorsque le cycliste doit s’incliner lorsqu’il tourne. Néanmoins, on peut raisonnablement faire l’hypothèse qu’un cycliste débutant se déplace à faible vitesse et qu’il ne doit donc pas fournir une inclinaison trop importante à son vélo pour pouvoir tourner. D’autre part, il sera amené à changer le rayon de courbure du rouleau au fur et à mesure de son apprentissage ce qui limitera progressivement l’aide fournie par le système et lui conférera une plus grande liberté en roulis.

Enfin, on constate que lorsque l’on introduit l’inertie réelle du rouleau dans le système, les résultats sont en général peu impactés. Il faut toutefois noter que dans la figure 3.24 les courbes s’éloignent après 2m/s. L’hypothèse sur l’inertie faite précédemment n’est donc pas vérifiée dans tous les cas et il vaut probablement mieux ne pas la faire.

4 Conclusion

Dans le cadre de la création d'un nouveau système d'aide à la stabilisation des vélos pour l'apprentissage, 3 solutions ont été envisagées. La solution retenue est un système d'entraînement au moyen de 2 roues de friction et d'un rouleau bombé. La première d'entre elles est positionnée à l'emplacement de la roue initiale du vélo et possède un diamètre 2 fois plus faible qu'une roue d'un vélo de 16 pouces à savoir 200 [mm]. La seconde est constituée de 2 roues coaxiales de rapport de diamètre 2 et est usinée en un seul bloc. Le diamètre le plus grand est à nouveau de 200 [mm]. Enfin, le rouleau bombé possède un diamètre maximal au centre de 100 [mm]. L'ensemble de ces 3 pièces étant en contact les unes avec les autres, un revêtement caoutchouteux est apposé sur les surfaces pour assurer une friction maximale entre elles. L'ensemble de ce système est maintenu en place par des bras intermédiaires qui sont assemblés entre eux à la manière d'un pantographe. Deux de ces bras sont constitués de glissières. La première permet le réglage en hauteur du système et la seconde assure le contact entre les roues de friction et le rouleau. Pour finir, un système de fixation et d'un système de freinage sont présents et tous les 2 adaptables en fonction du type de vélo utilisé.

Cette solution permet de répondre aux 2 problématiques initialement posées car il permet d'avoir une courbure sans discontinuité en son centre grâce aux roues de friction et repose sur un système simple à installer et à adapter en fonction du support. L'ensemble étant livré déjà assemblé, l'utilisateur devra simplement démonter sa roue arrière, installer le système et effectuer quelques réglages. De plus, le remplacement du rouleau s'effectue en dévissant simplement 2 écrous sur les extrémités de l'arbre. Ce prototype devait également respecter un cahier des charges (section 2.1).

L'efficacité de la fonction première, à savoir l'aide à la stabilisation, a pu être démontrée au travers de l'analyse de stabilité dynamique (section 3). Celle-ci a en effet révélé qu'à faible angle d'inclinaison du vélo latéral et à faible vitesse, le rouleau augmente significativement la stabilité en roulis du système. Ces 2 hypothèses sont cohérentes dans le cas d'un enfant qui apprend le vélo et peuvent donc être utilisées. Par ailleurs, cette étude a montré, en accord avec l'étude réalisée par monsieur Schwab, que le mode de guidonnage était toujours stable pour un vélo. Enfin, le seul mode pour lequel certains doutes peuvent subsister est le mode de louvoiment. Ce dernier représente les oscillations qu'effectuera le vélo autour de la direction suivie. Ce mode de louvoiment est instable à faible vitesse mais devient stable lorsque celle-ci se rapproche des 5 [m/s]. La subtilité de ce mode de louvoiment est qu'il applique un faible couple dans un sens ou dans l'autre sur le guidon. Il peut donc probablement être contré assez aisément par le cycliste si celui-ci évite de lâcher son guidon.

D'autres fonctions du cahier des charges ont été mises en oeuvre telles que les différents rayons de courbure (par un changement de rouleau aisé), le fait d'offrir plusieurs rapports de réduction (par la cassette de pignons) et enfin, l'amortissement vertical (géré grâce

au revêtement en caoutchouc apposé sur le rouleau ainsi que sur les différentes roues). Cependant, le système de freinage nécessite encore une étape de dimensionnement pour être opérationnel et le système d'anti-basculement doit être ajouté. Néanmoins, les requis fonctionnels spécifient que la roue doit pouvoir fonctionner sans ce dernier, il n'est donc pas essentiel dans un premier temps. Dans les requis fonctionnels, il est également mentionné que le système de freinage doit s'appuyer sur les patins de frein du vélo et la solution envisagée respecte bien ce point. Afin de limiter les réglages nécessaires pour fixer le système à une autre taille de vélo, une cassette de 3 pignons a été prévue mais elle reste amovible et est interchangeable aisément en cas de besoin.

Les contraintes ont, quant à elles, guidé les différents choix de ce travail. Par exemple, le dimensionnement des pièces a été effectué sur base des contraintes géométriques des vélos de 16 à 26 pouces. Par ailleurs, lors de l'installation, le système ne nécessite que peu d'outils courants. N'ayant pas été jusqu'à l'étape de fabrication, il n'est malheureusement pas possible d'affirmer que le système se porte à une seule main (FC5) et que l'installation dure moins de 15 minutes (FC4). Cependant, il est probable qu'il respecte ces 2 contraintes du fait de sa compacité et du peu de réglages nécessaires. Enfin, ce système a également respecté la contrainte de l'utilisation du pédalier et de la chaîne du vélo sans modification de ceux-ci. Pour finir, si l'encastrement entre les 2 fourches arrières venait à varier d'un vélo à l'autre, le système actuel saurait être adapté via des écrous de serrage. Cette adaptation a été rendue possible grâce au dimensionnement des pièces pour l'entraxe minimal présent sur le marché.

Si ce projet propose une solution technique, celle-ci n'a cependant pas pu être assemblée et testée. La suite de ce projet pourrait consister à usiner et assembler les différentes pièces puis à tester le prototype en conditions réelles. Plusieurs profils de rouleau pourraient être proposés pour confronter la stabilité du vélo en condition réelle à celle trouvée dans l'analyse de stabilité. D'abord en terme de stabilité ressentie par le cycliste (difficilement quantifiable), un banc de test pourrait ensuite être proposé pour valider les résultats par des valeurs chiffrées ou par une visualisation du comportement sous certaines contraintes.

Références

- [1] Richard E KLEIN et al. “Adapted bicycles for teaching riding skills”. In : *Teaching Exceptional Children* 37.6 (2005), p. 50–56.
- [2] Karl J ÅSTRÖM, Richard E KLEIN et Anders LENNARTSSON. “Bicycle dynamics and control”. In : *IEEE Control Systems Magazine* 25.4 (2005), p. 26–47.
- [3] Dale A ULRICH et al. “Physical activity benefits of learning to ride a two-wheel bicycle for children with Down syndrome : a randomized trial”. In : *Physical therapy* 91.10 (2011), p. 1463–1477.
- [4] Jaap P MEIJAARD et al. “Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle : a benchmark and review”. In : *Proceedings of the Royal society A : mathematical, physical and engineering sciences* 463.2084 (2007), p. 1955–1982.
- [5] *Train épicycloïdal vélo* : <https://www.amsterdamair.fr/blog/lexique/boite%E2%88%92de%E2%88%92vitesses>.
- [6] Corbet C. HAZARD C. Ricordeau A. *Méthode active de dessin technique*. Sous la dir. d’Editions CASTELLA. 2003.
- [7] *Câble Bowden* : https://www.jawashop.com/throttle-valve-bowden-cable_z2609/.
- [8] *MisumiWebIndex*. Consulté en 2019.
- [9] *Pièces Misumi*. <https://fr.misumi-ec.com>.
- [10] *Moyeu vélo* : https://www.lecyclo.com/index.php?option=com_virtuemart&Itemid=%201&page=shop.product_details&product_id=%204502.
- [11] *Pignons vélo* : https://www.lecyclo.com/index.php?option=com_virtuemart&Itemid=%201&page=shop.product_details&product_id=%204679.
- [12] Q. DOCQUIER. “On the rigid contact and pure Rolling motion on a at ground through a relative coordinates MBS formalism : Theoretical aspects and implementation in Robotran”. Robotran Documentation. Jan. 2018.
- [13] Docquier Q. FISETTE P. “Modeling Multibody Systems with ROBOTRAN”. 2019.
- [14] Fisette P. “MBS Modeling : advanced Models”. LMECA 2802 (UCLouvain).
- [15] *Vélo enfant* : https://www.decathlon.fr/vtt-6-9-ans-racingboy-320-red-id_8327591.html.

A 1ère roue de friction

6 x Ø 2,50 ∇ 7,50
M3x0.5 - 6H ∇ 6,00

COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

TITRE:

No. DE PLAN

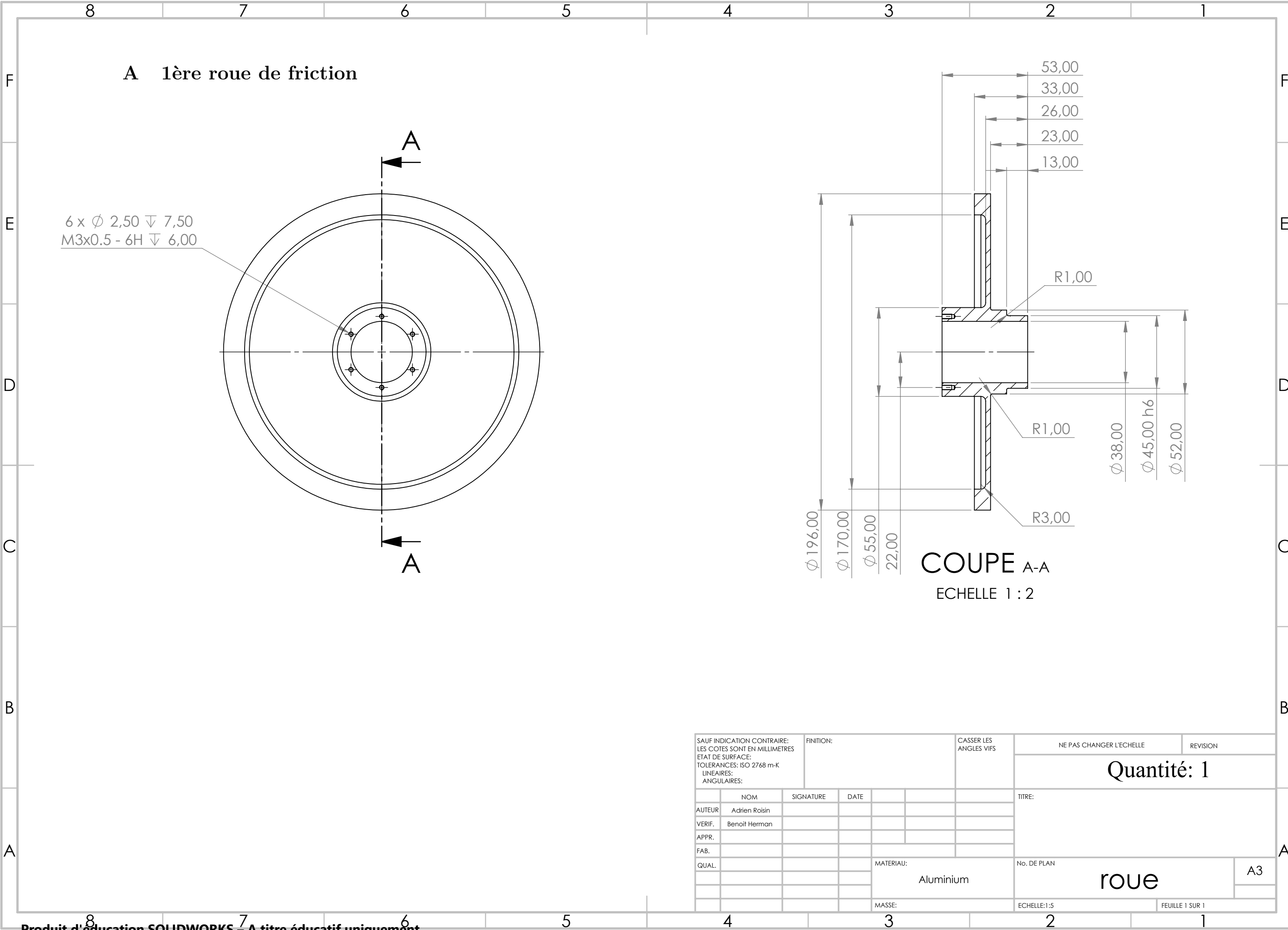
roue

A3

MATERIAU: Aluminium

ECHELLE: 1:5

FEUILLE 1 SUR 1



A 1ère roue de friction

6 x Ø 2,50 ∇ 7,50
M3x0.5 - 6H ∇ 6,00

COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

TITRE:

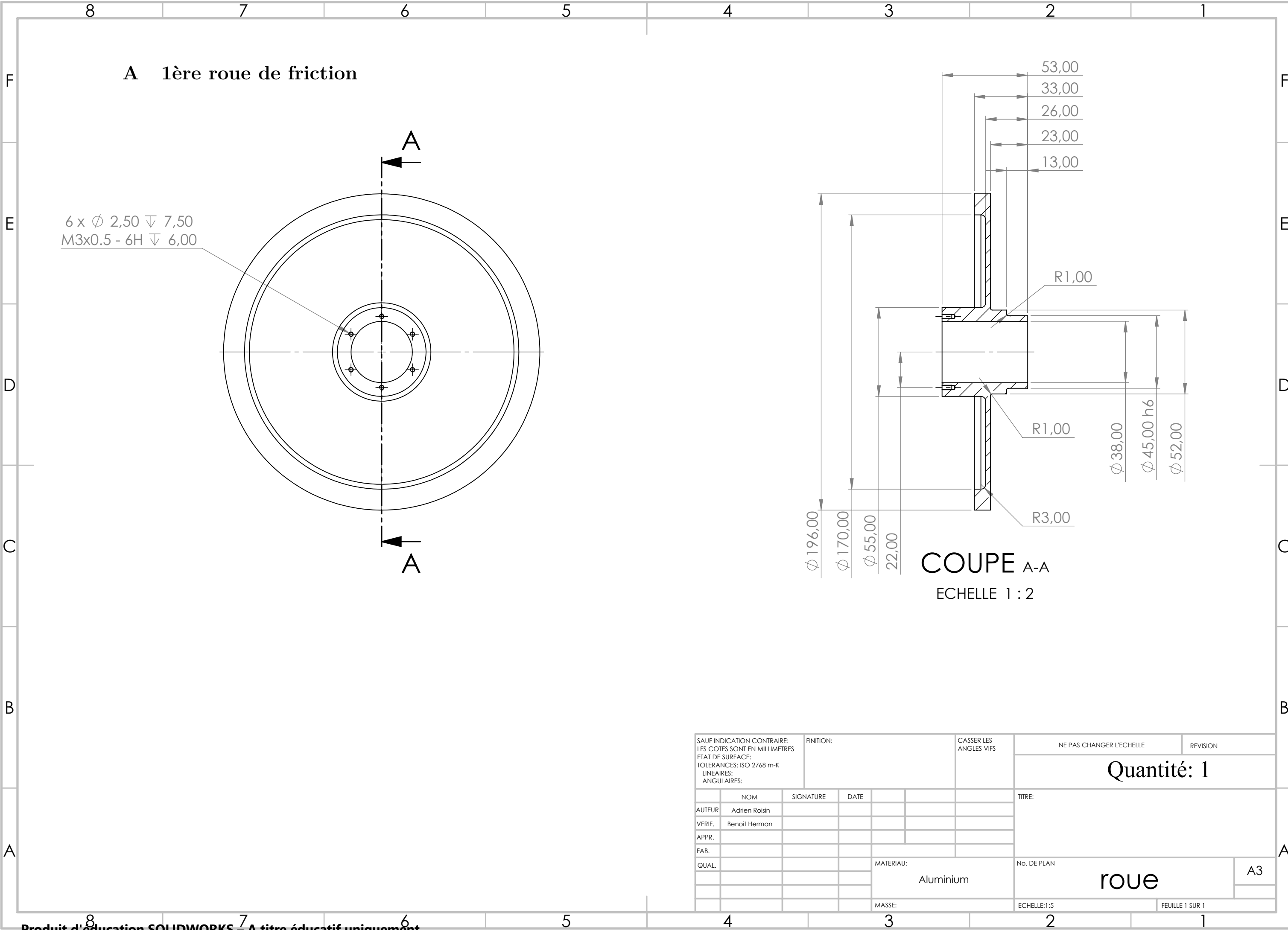
No. DE PLAN

roue

A3

FEUILLE 1 SUR 1

Produit d'éducation SOLIDWORKS – À titre éducatif uniquement



A 1ère roue de friction

6 x Ø 2,50 ∇ 7,50
M3x0.5 - 6H ∇ 6,00

COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

TITRE:

No. DE PLAN

roue

A3

FEUILLE 1 SUR 1

Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement

A 1ère roue de friction

6 x Ø 2,50 ∇ 7,50
M3x0.5 - 6H ∇ 6,00

COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

TITRE:

No. DE PLAN

roue

A3

FEUILLE 1 SUR 1

Aluminium

MASSE:

ECHELLE:1:5

NOM

SIGNATURE

DATE

AUTEUR

Adrien Roisin

VERIF.

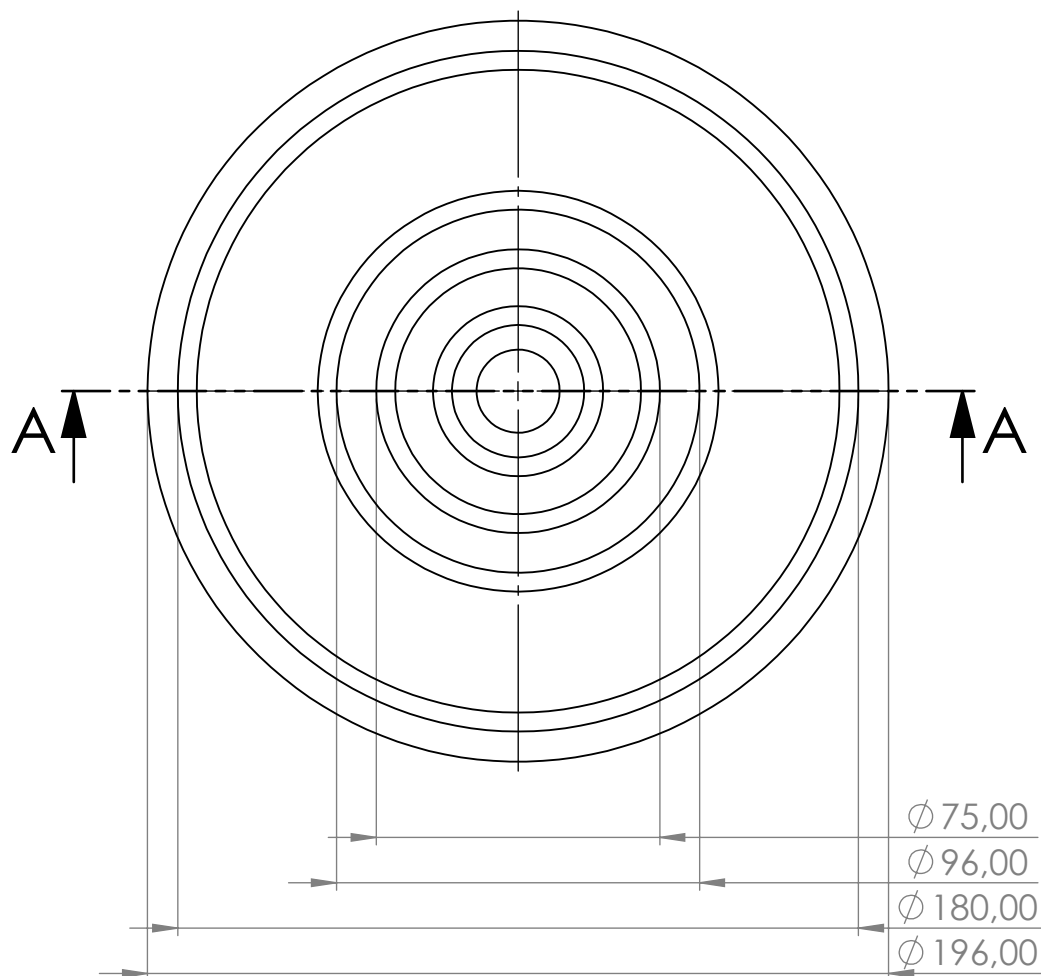
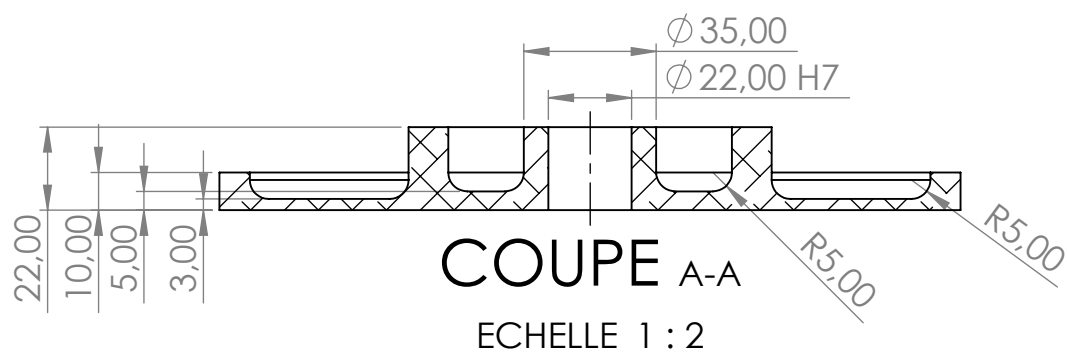
Benoit Herman

APPR.

FAB.

QUAL.

B 2ème roue de friction



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

NOM	SIGNATURE	DATE			
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

MATERIAU:

Aluminium

MASSE:

TITRE:

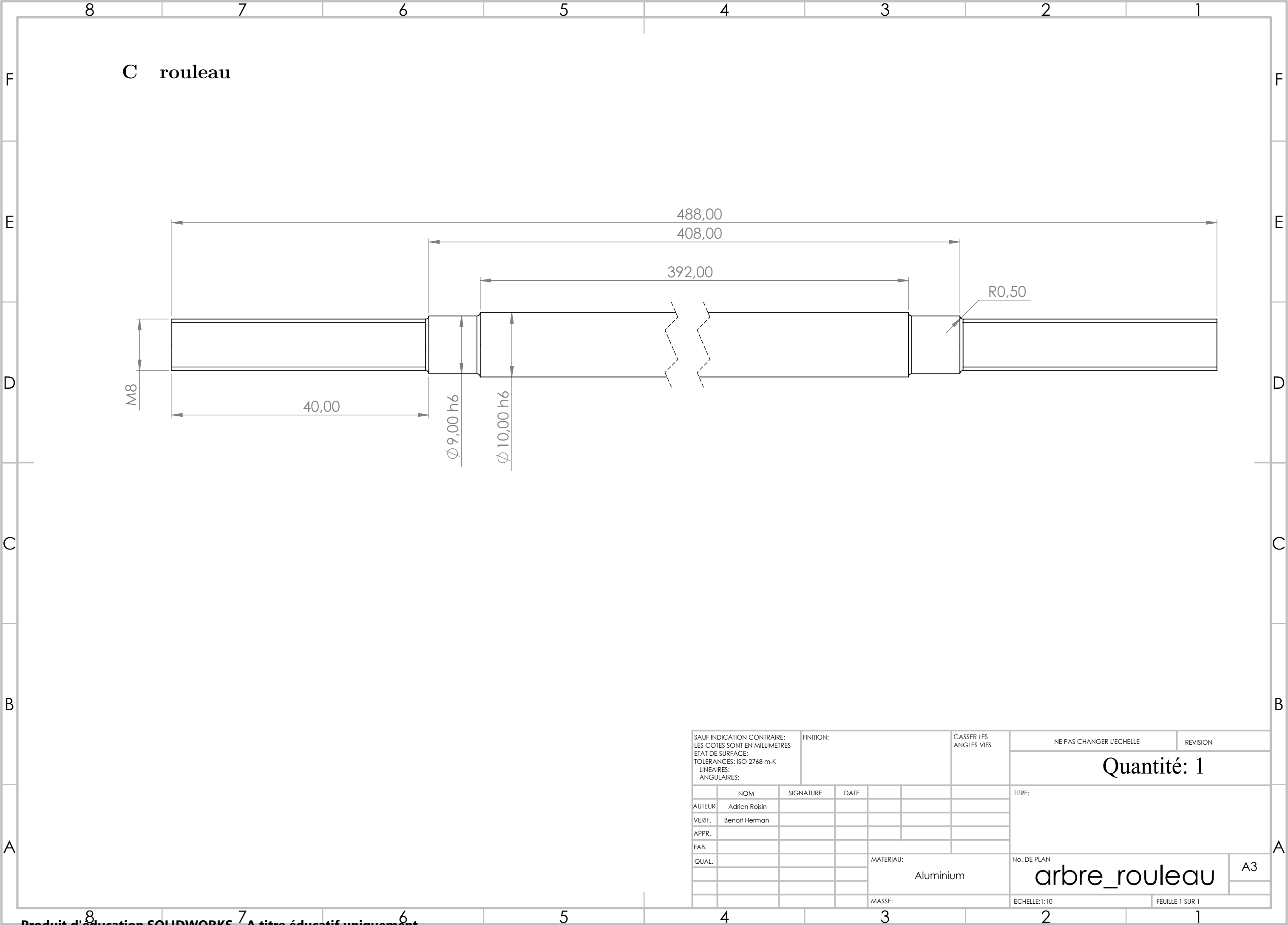
No. DE PLAN

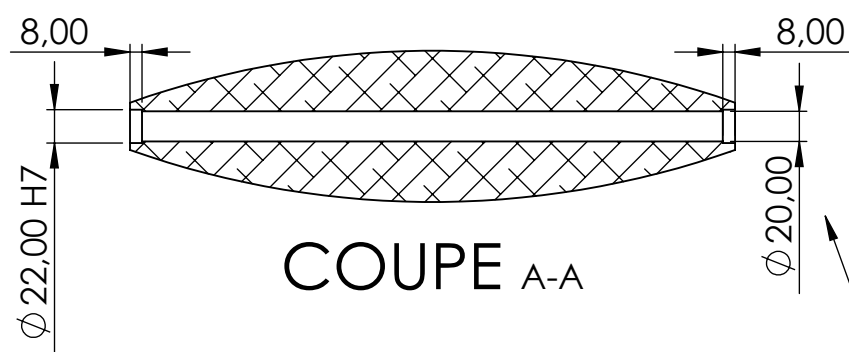
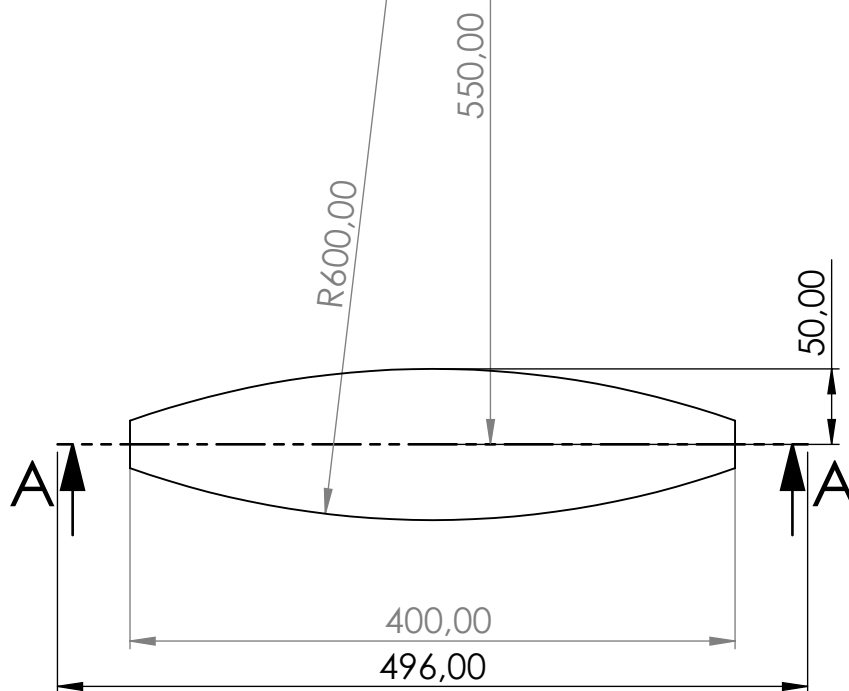
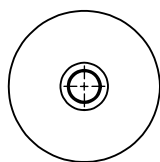
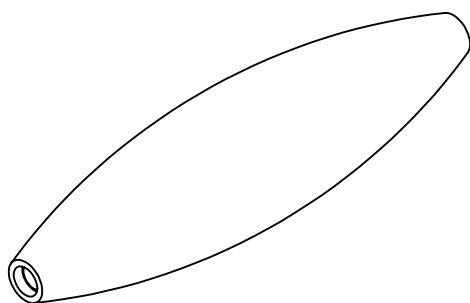
double_roue_friction

A4

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1





COUPE A-A

alésages dans lesquels viennent se placer 2 roulements

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

MATERIAU:

Caoutchouc

TITRE:

No. DE PLAN

rouleau conique

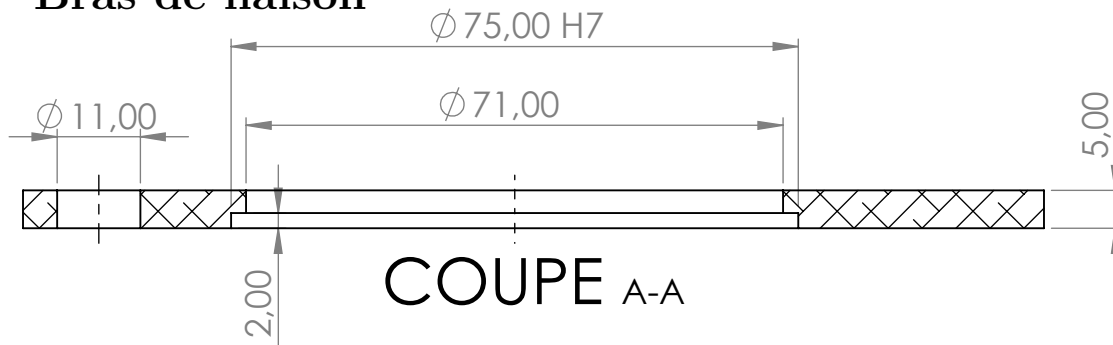
A4

MASSE:

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1

D Bras de liaison



2 x ϕ 5,00 A TRAVERS TOUT
(Trous de centrage)

R5,00

15,00 $\pm$ 0,02

A

A

110,00 $\pm$ 0,02
135,00
55,00 $\pm$ 0,02

22,50
42,50
40,00 $\pm$ 0,02
85,00

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

MATERIAU:

Acier

MASSE:

TITRE:

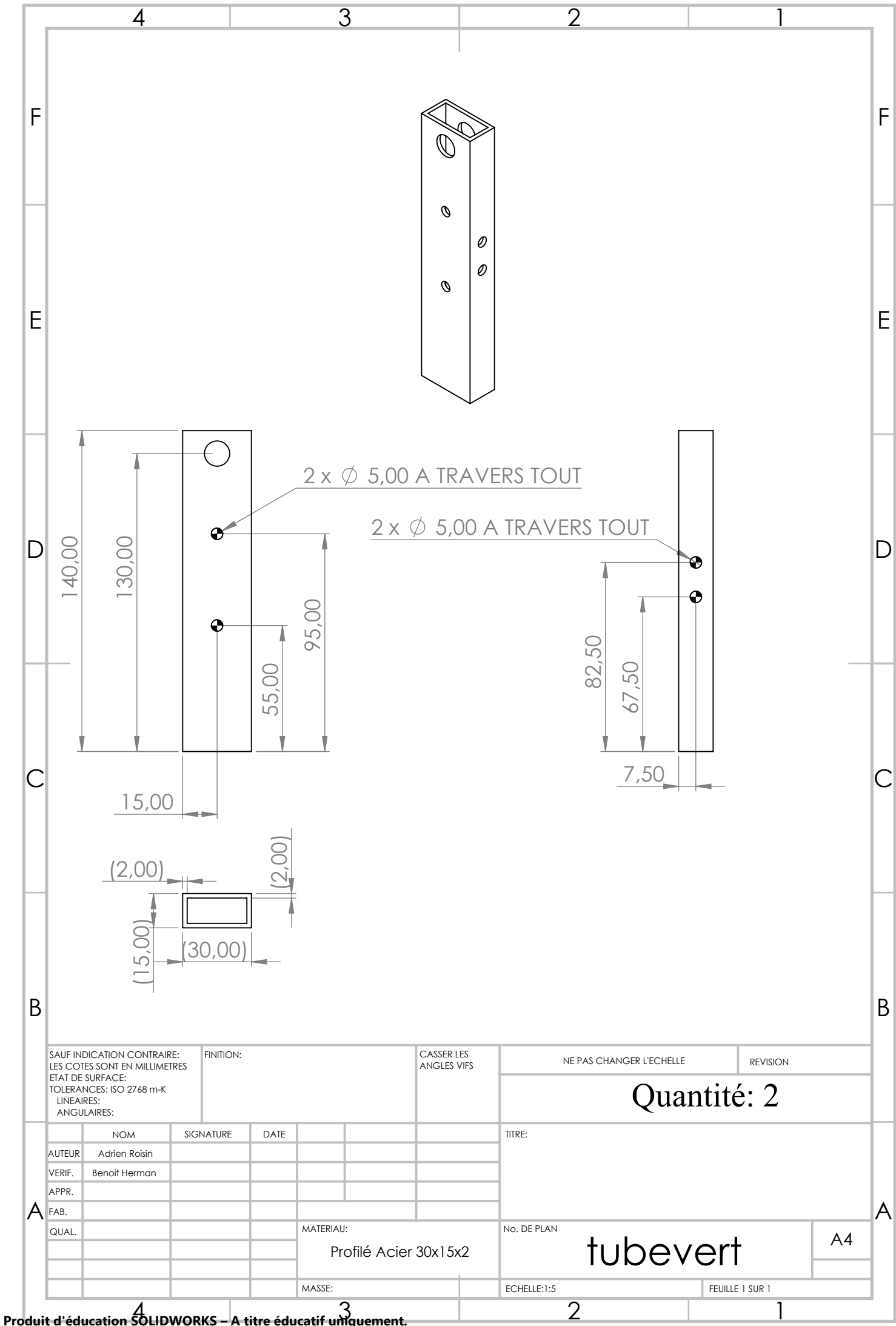
No. DE PLAN

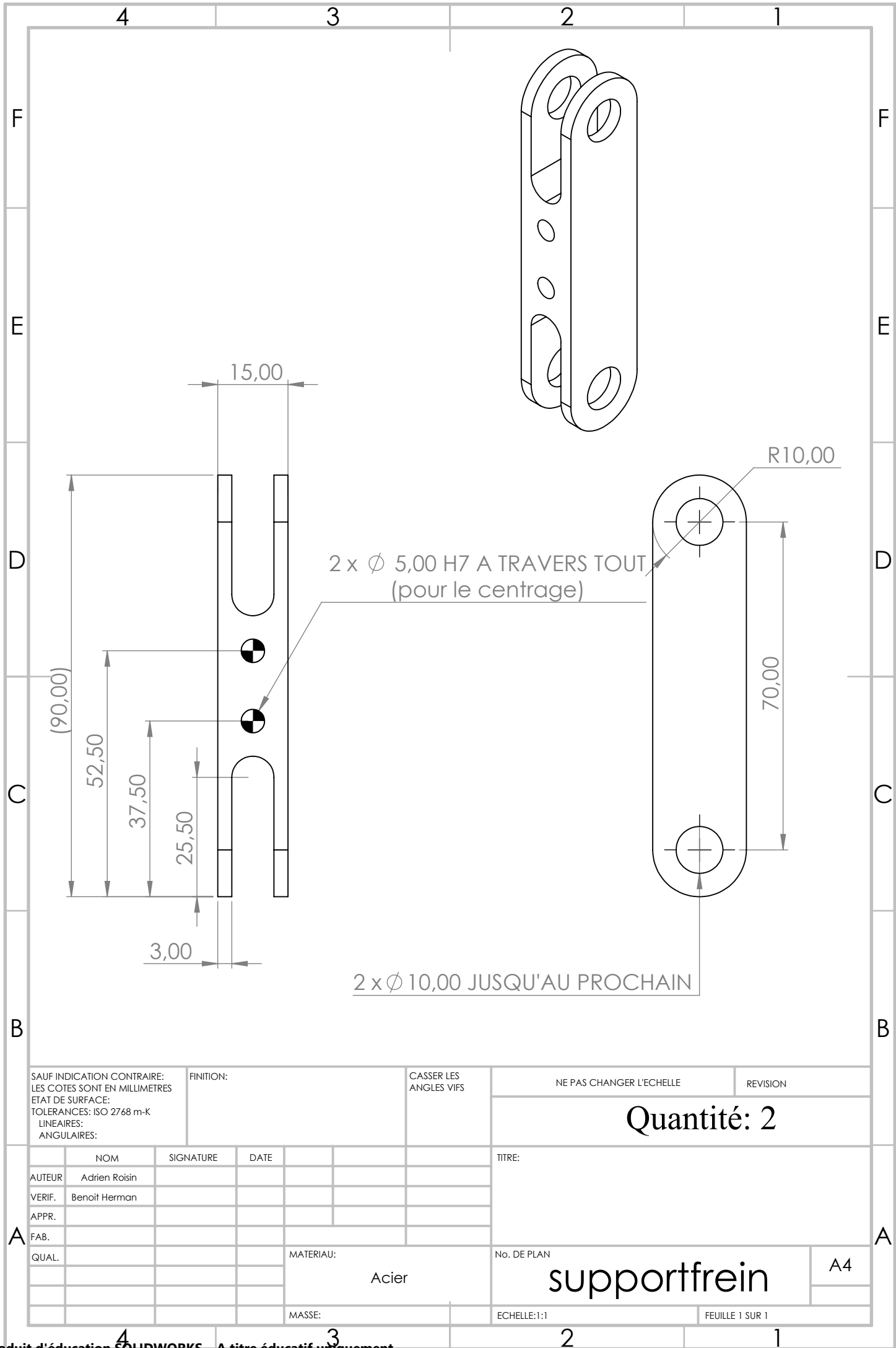
ECHELLE:1:1

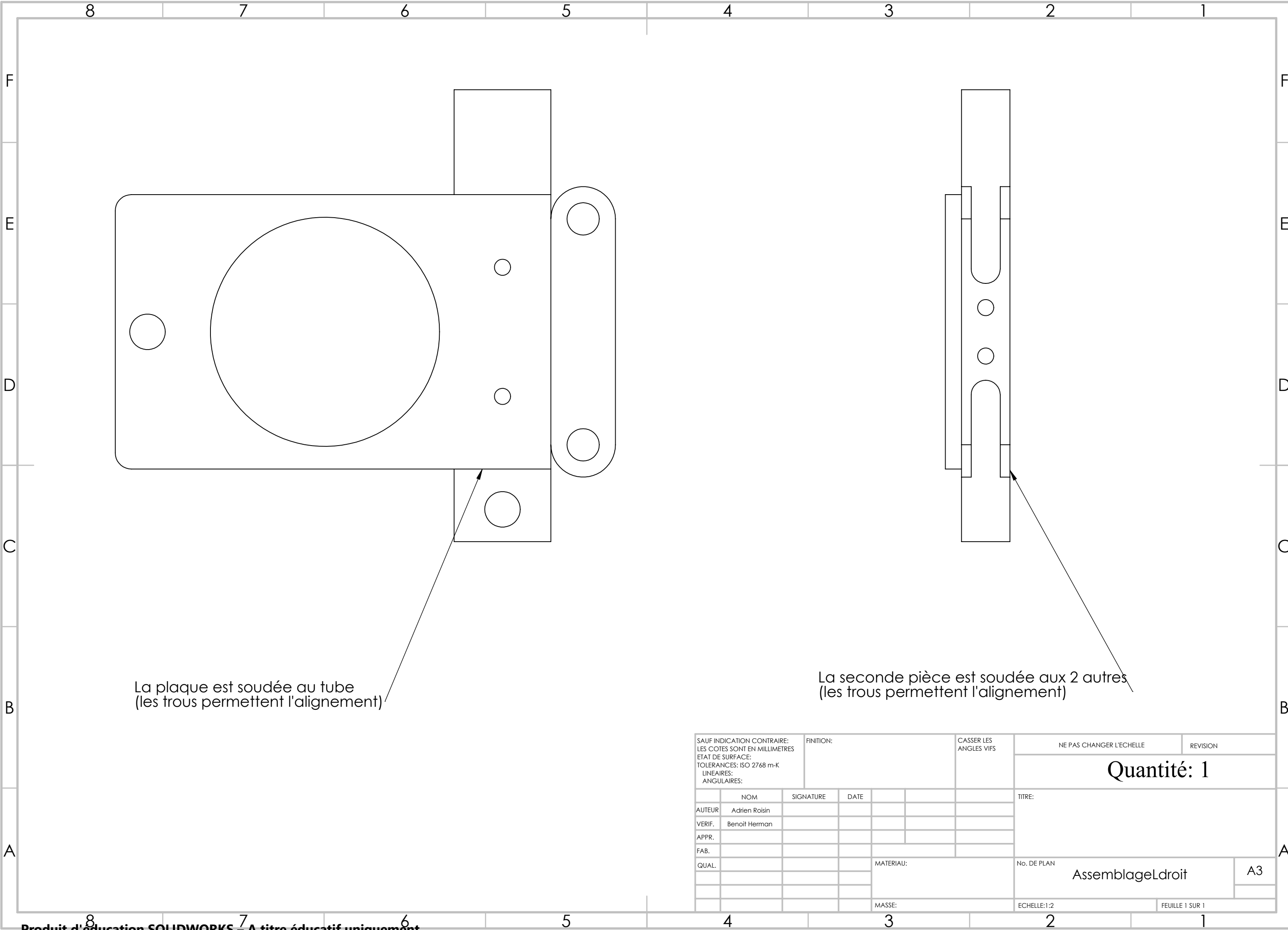
barrel

A4

FEUILLE 1 SUR 1





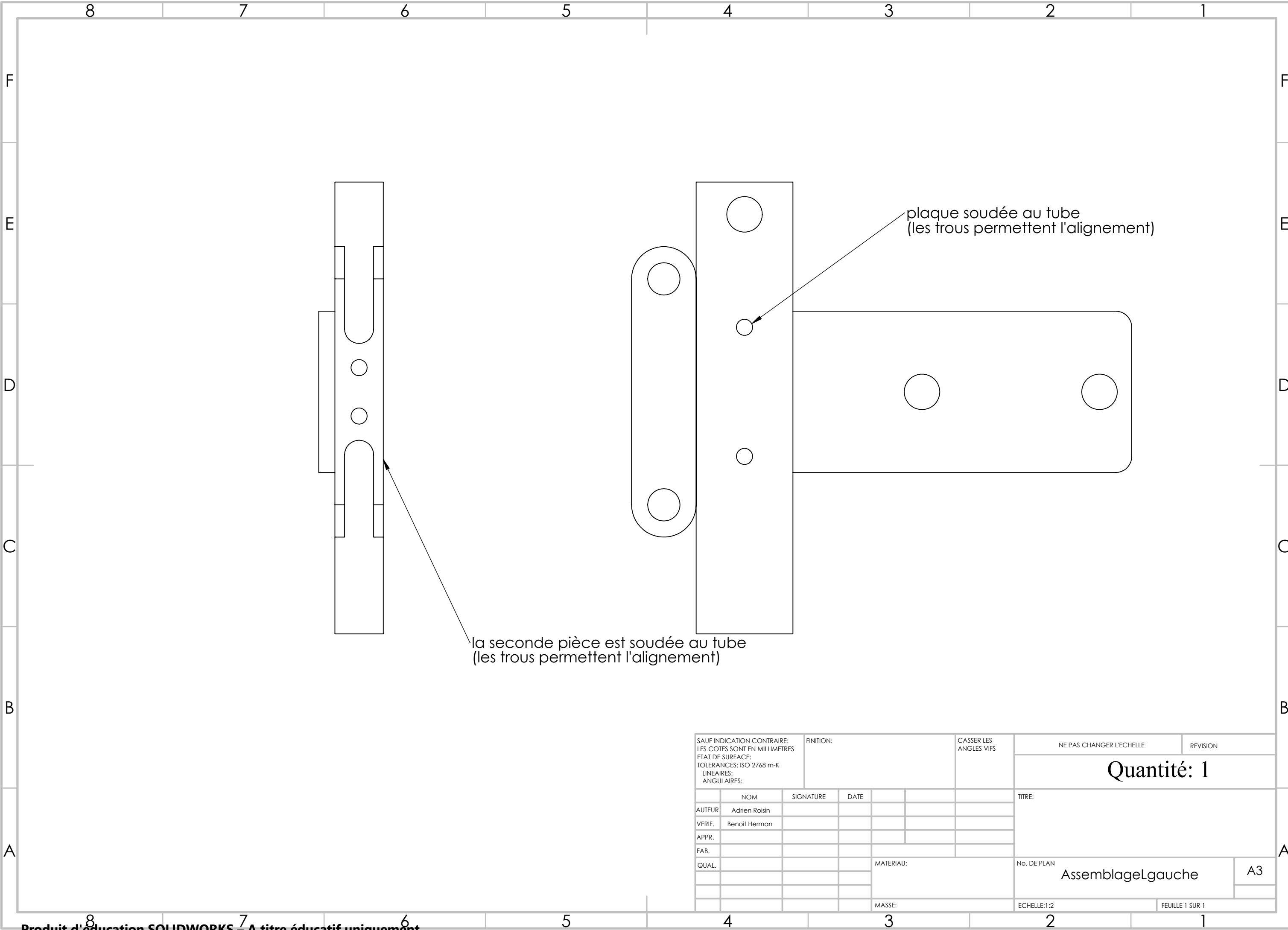


La plaque est soudée au tube
(les trous permettent l'alignement)

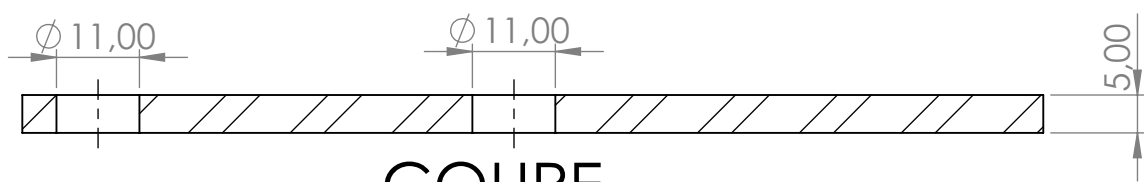
La seconde pièce est soudée aux 2 autres
(les trous permettent l'alignement)

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: ISO 2768 m-K LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
										Quantité: 1	
										TITRE:	
										No. DE PLAN	
										AssemblageLdroit	
										A3	
										FEUILLE 1 SUR 1	
										ECHELLE:1:2	
										MASSE:	

	NOM	SIGNATURE	DATE			
AUTEUR	Adrien Roisin					
VERIF.	Benoit Herman					
APPR.						
FAB.						
QUAL.						



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: ISO 2768 m-K LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
							Quantité: 1	
	NOM	SIGNATURE	DATE				TITRE:	
AUTEUR	Adrien Roisin							
VERIF.	Benoit Herman							
APPR.								
FAB.								
QUAL.				MATERIAU:			No. DE PLAN AssemblageLgauche	
				MASSE:			Echelle:1:2	
							FEUILLE 1 SUR 1	

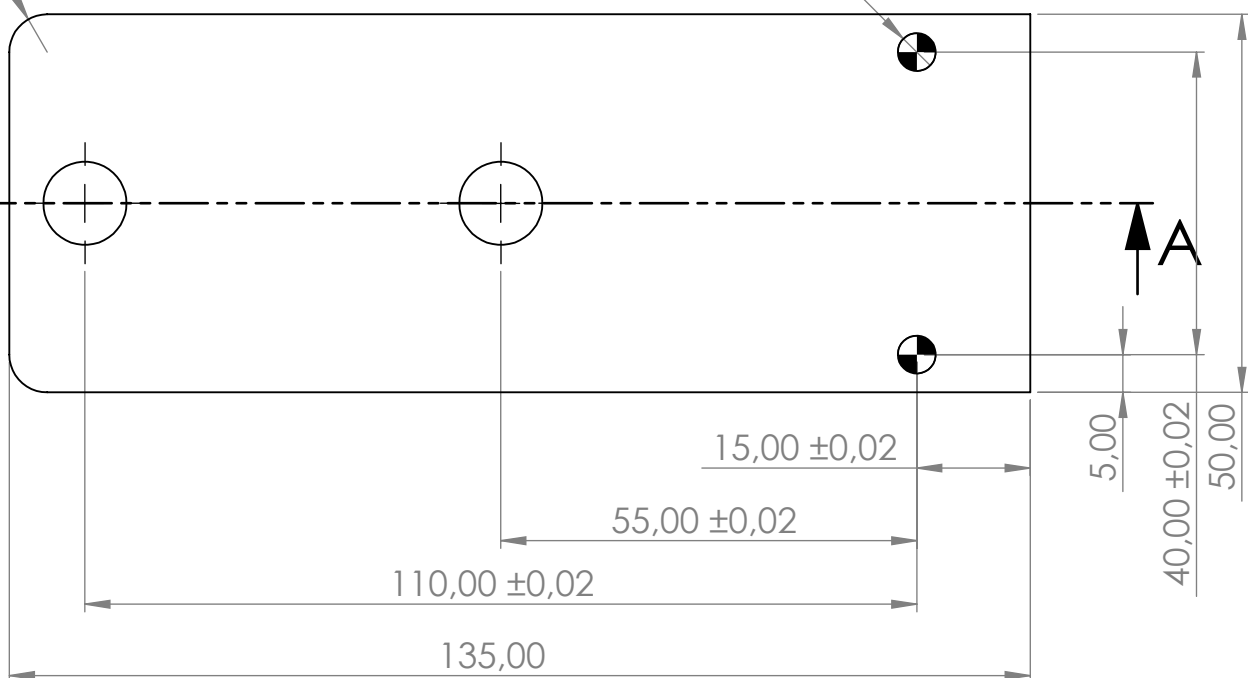
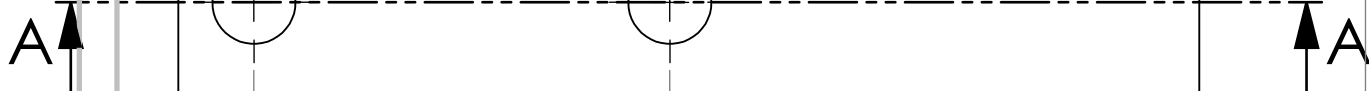


COUPE A-A

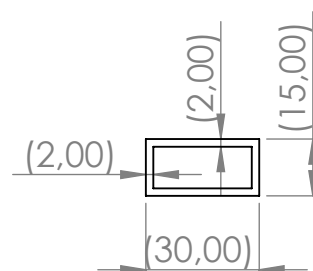
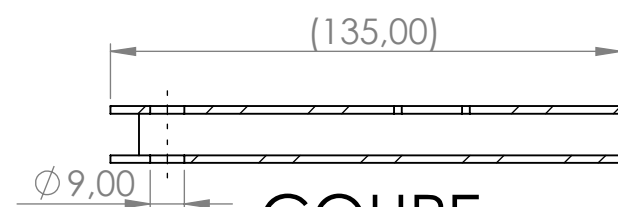
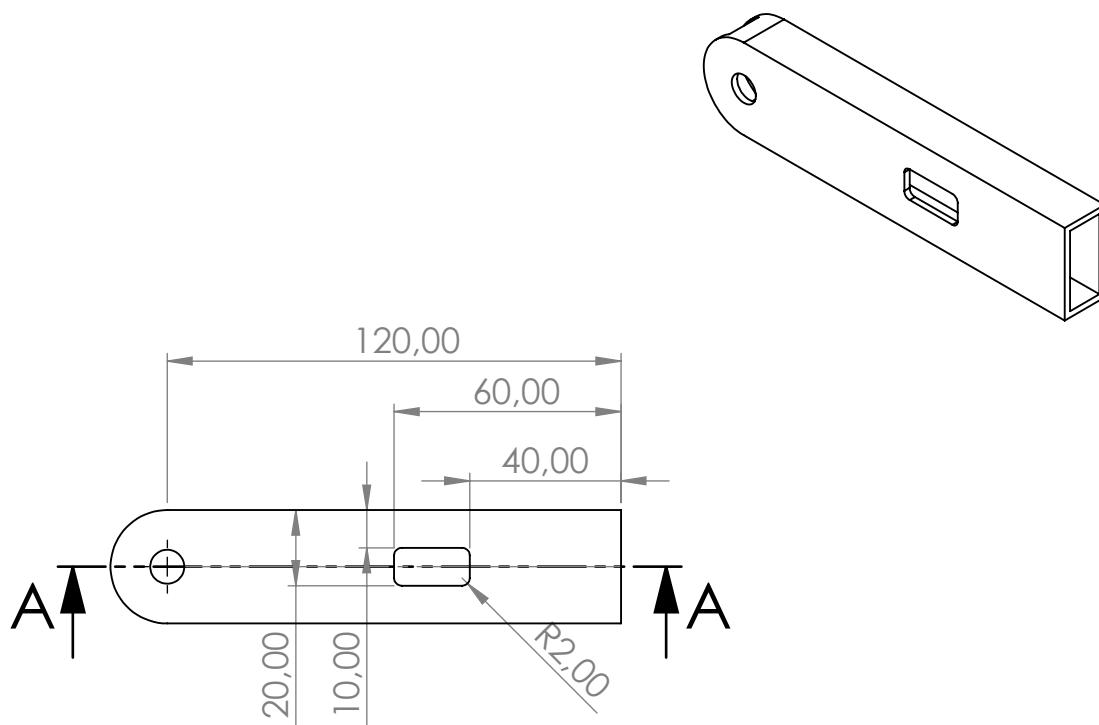
ECHELLE 1 : 1

2 x Ø 5,00 A TRAVERS TOUT
(pour le centrage)

R5,00



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: ISO 2768 m-K LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
								Quantité: 1			
NOM						SIGNATURE		DATE		TITRE:	
AUTEUR: Adrien Roisin											
VERIF. Benoit Herman											
APPR.											
FAB.											
QUAL.						MATERIAU: Acier		No. DE PLAN		A4	
								barreL2			
MASSE:						ECHELLE:1:2		FEUILLE 1 SUR 1			



COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 2

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

MATERIAU:

profilé Acier 30X15X2

MASSE:

TITRE:

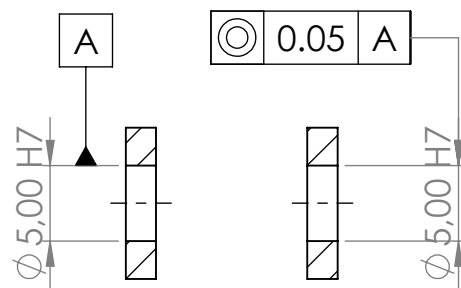
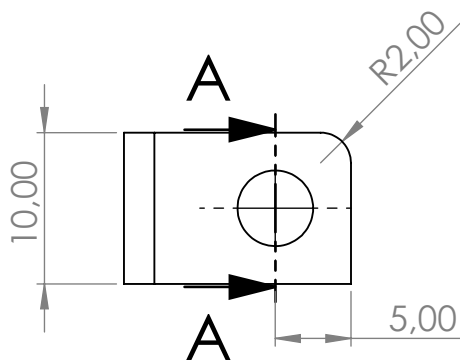
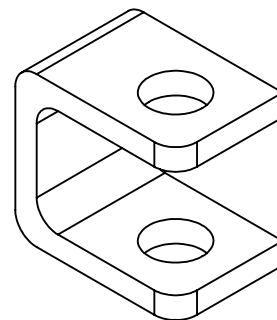
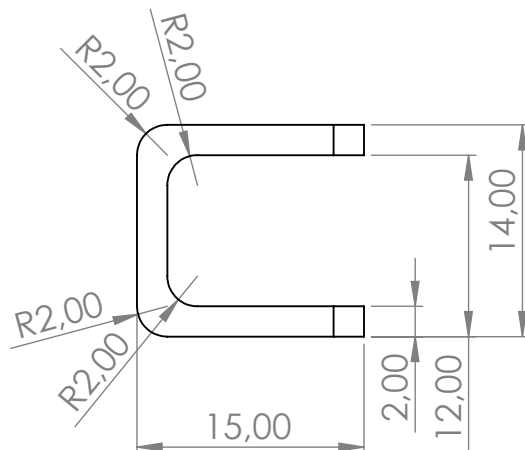
No. DE PLAN

ECHELLE:1:5

barreV4

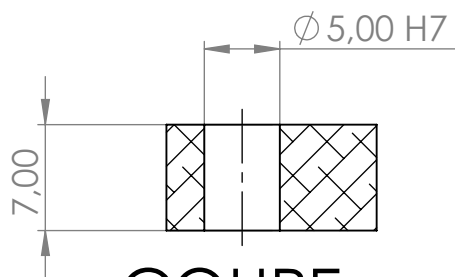
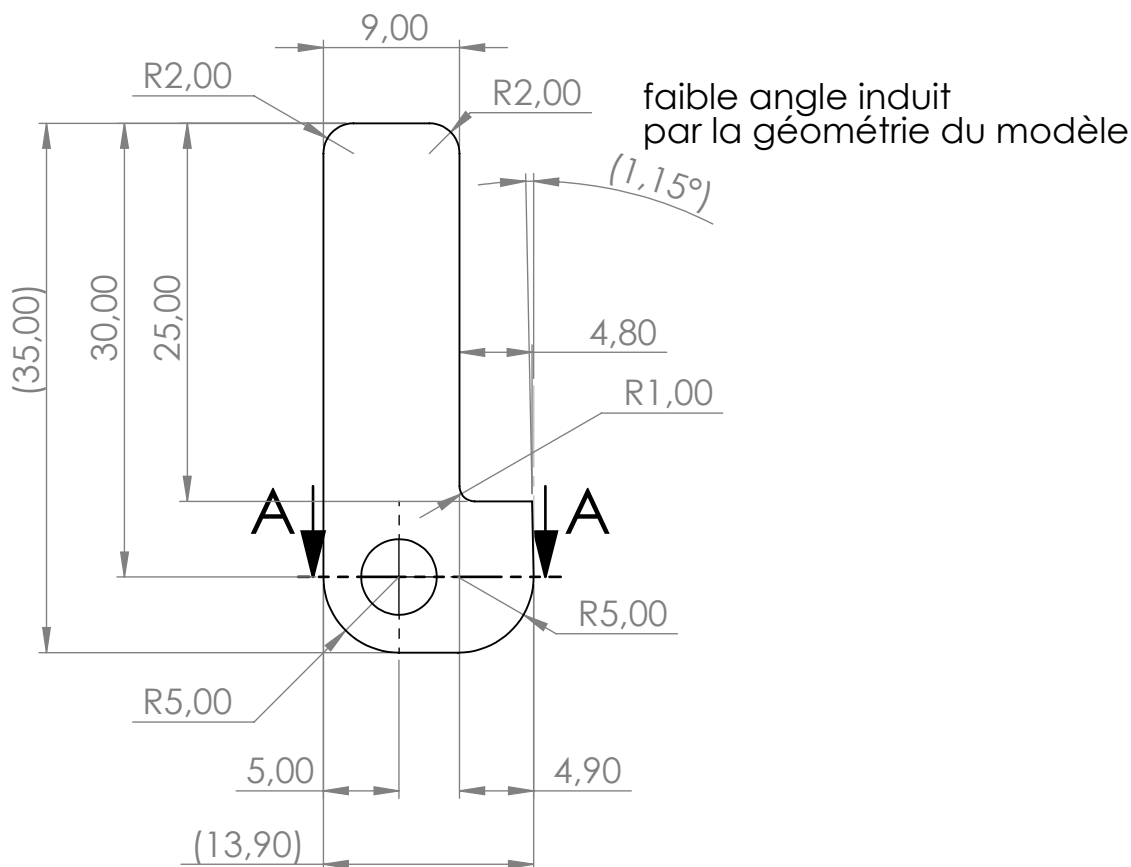
A4

FEUILLE 1 SUR 1



COUPE A-A

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: ISO 2768 m-K LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION																									
								Quantité: 2																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOM</th> <th>SIGNATURE</th> <th>DATE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AUTEUR</td> <td>Adrien Roisin</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td>Benoit Herman</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APPR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FAB.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>QUAL.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							NOM	SIGNATURE	DATE	AUTEUR	Adrien Roisin			VERIF.	Benoit Herman			APPR.				FAB.				QUAL.				TITRE:					
	NOM	SIGNATURE	DATE																																
AUTEUR	Adrien Roisin																																		
VERIF.	Benoit Herman																																		
APPR.																																			
FAB.																																			
QUAL.																																			
						MATERIAU:		No. DE PLAN		A4																									
						Acier		U																											
						MASSE:		ECHELLE:2:1		FEUILLE 1 SUR 1																									



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 2

NOM	SIGNATURE	DATE			
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

TITRE:

MATERIAU:

Aluminium

No. DE PLAN

clapet

A4

MASSE:

ECHELLE:2:1

FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

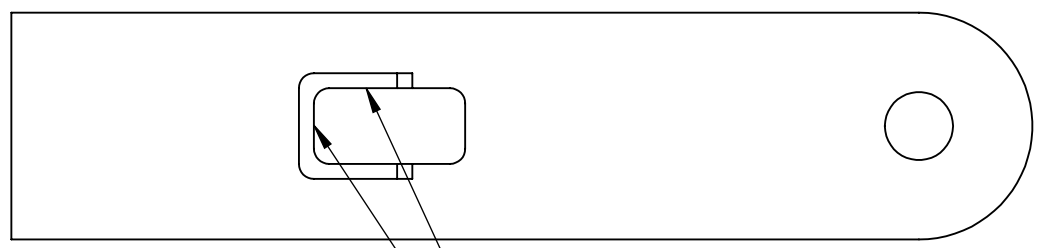
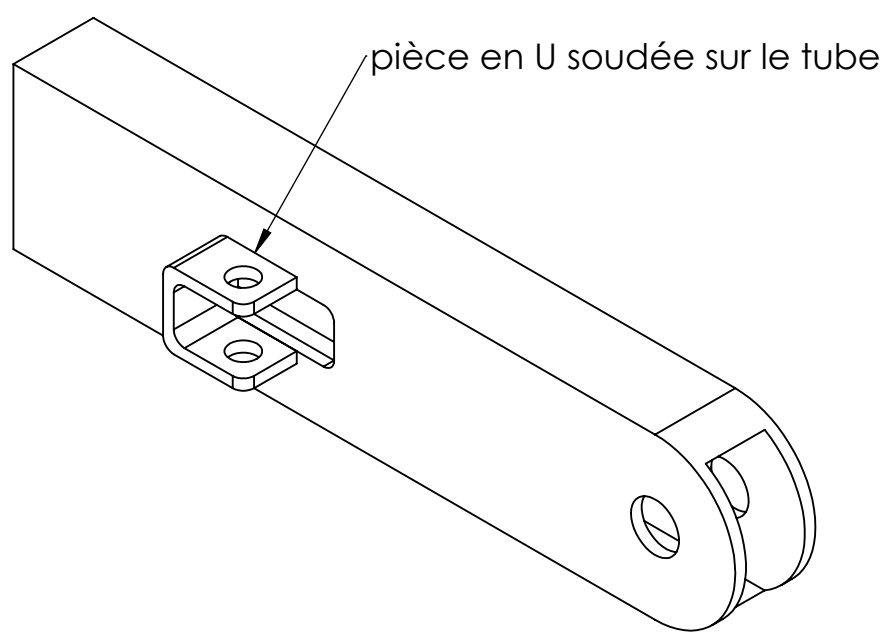
C

B

B

A

A



droites coïncidentes et parallèles

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 2

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

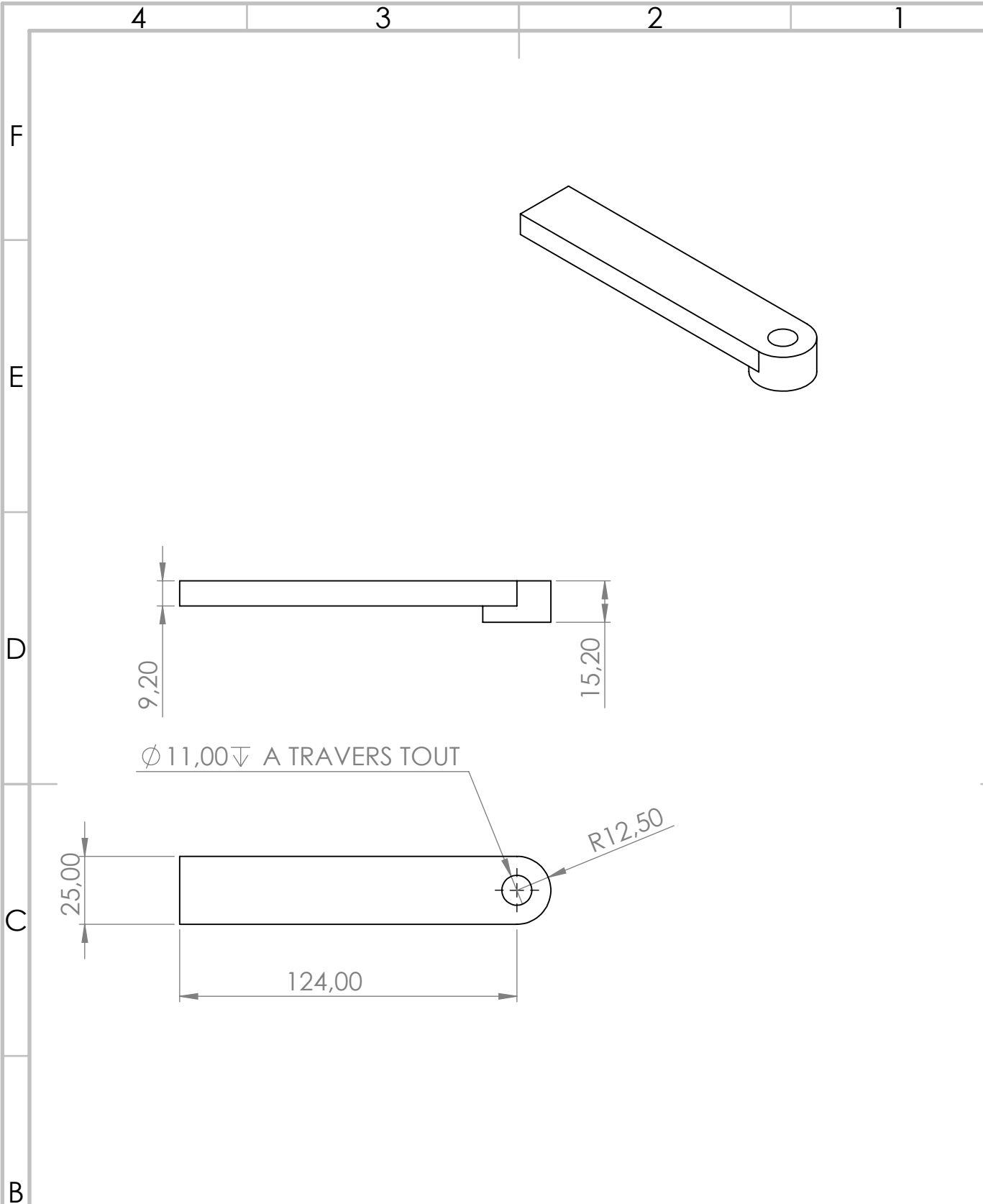
MATERIAU:

MASSE:

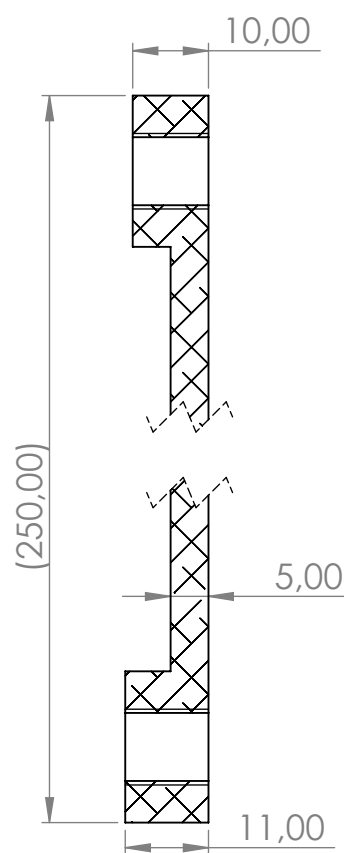
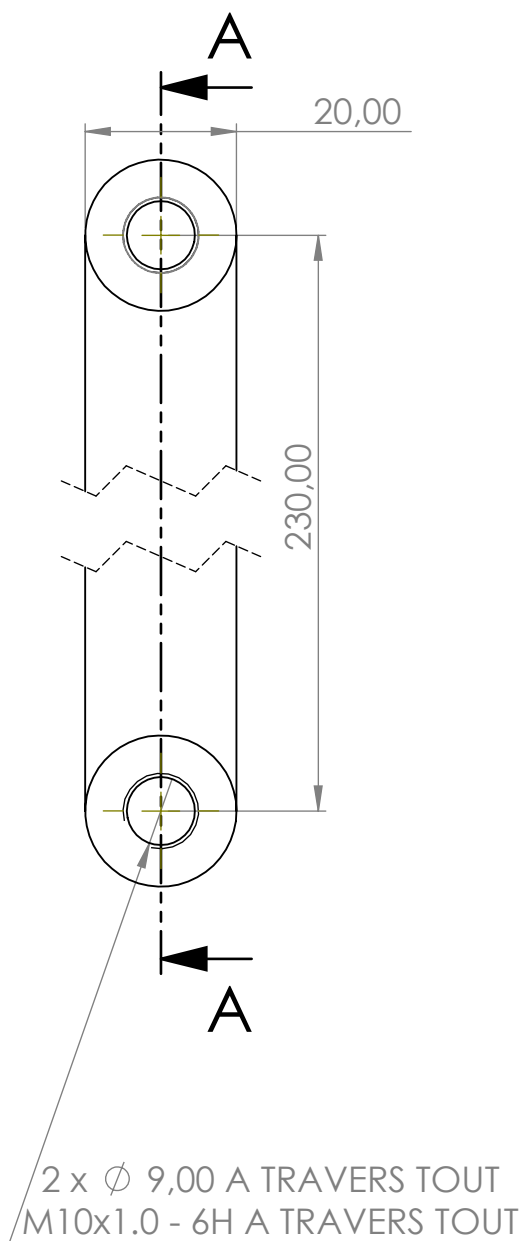
TITRE:	
No. DE PLAN	Assemblageclapet
ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1

A4

4 3 2 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: ISO 2768 m-K LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION																																					
						Quantité: 2																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOM</th> <th>SIGNATURE</th> <th>DATE</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AUTEUR</td> <td>Adrien Roisin</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td>Benoit Herman</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APPR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FAB.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>QUAL.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							NOM	SIGNATURE	DATE			AUTEUR	Adrien Roisin					VERIF.	Benoit Herman					APPR.						FAB.						QUAL.						TITRE:			
	NOM	SIGNATURE	DATE																																										
AUTEUR	Adrien Roisin																																												
VERIF.	Benoit Herman																																												
APPR.																																													
FAB.																																													
QUAL.																																													
MATERIAU: Aluminium																																													
MASSE:						No. DE PLAN																																							
						barreV2																																							
						A4																																							
ECHELLE:1:5						FEUILLE 1 SUR 1																																							



COUPE A-A
ECHELLE 1 : 1

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 2

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

MATERIAU:

Acier

TITRE:

No. DE PLAN

testliaison21

A4

MASSE:

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1

4 3 2 1

Visser 2 tiges filetées M10 de 40 mm de longueur

F

F

E

E

D

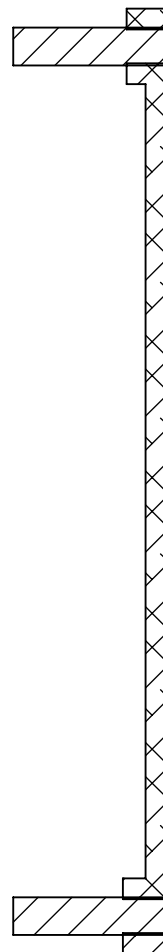
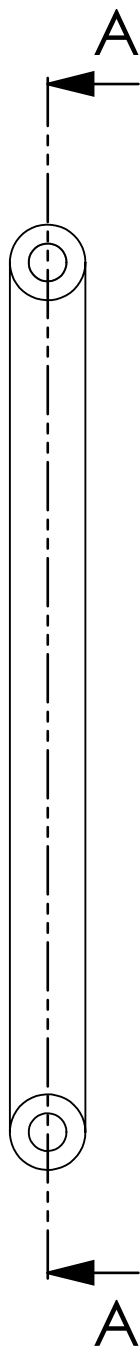
D

C

C

B

B



COUPE A-A
ECHELLE 1 : 2

Appliquer un point de soudure pour solidariser l'ensemble

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 2

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

MATERIAU:

MASSE:

TITRE:

No. DE PLAN

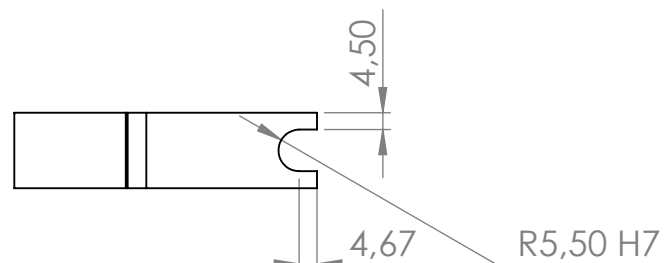
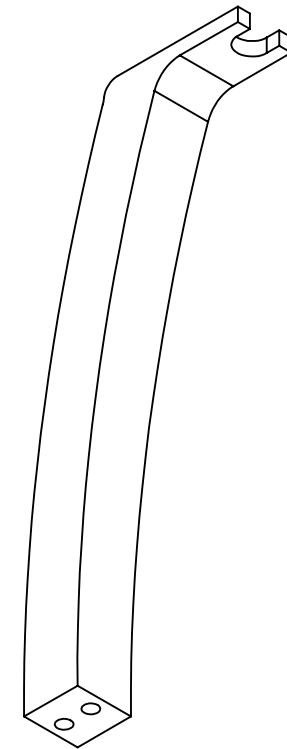
assemblagetestliaison21

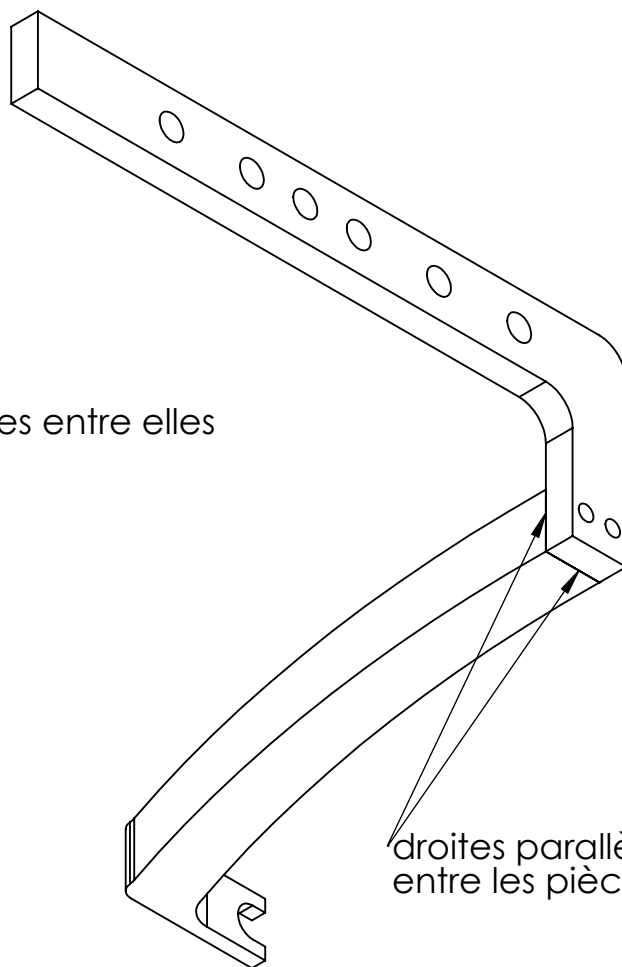
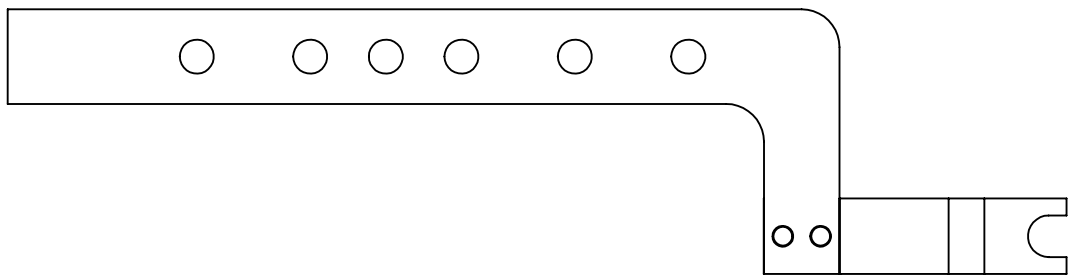
ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1

A4

4 3 2 1





Pièces soudées entre elles

droites parallèles et coïncidentes
entre les pièces

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

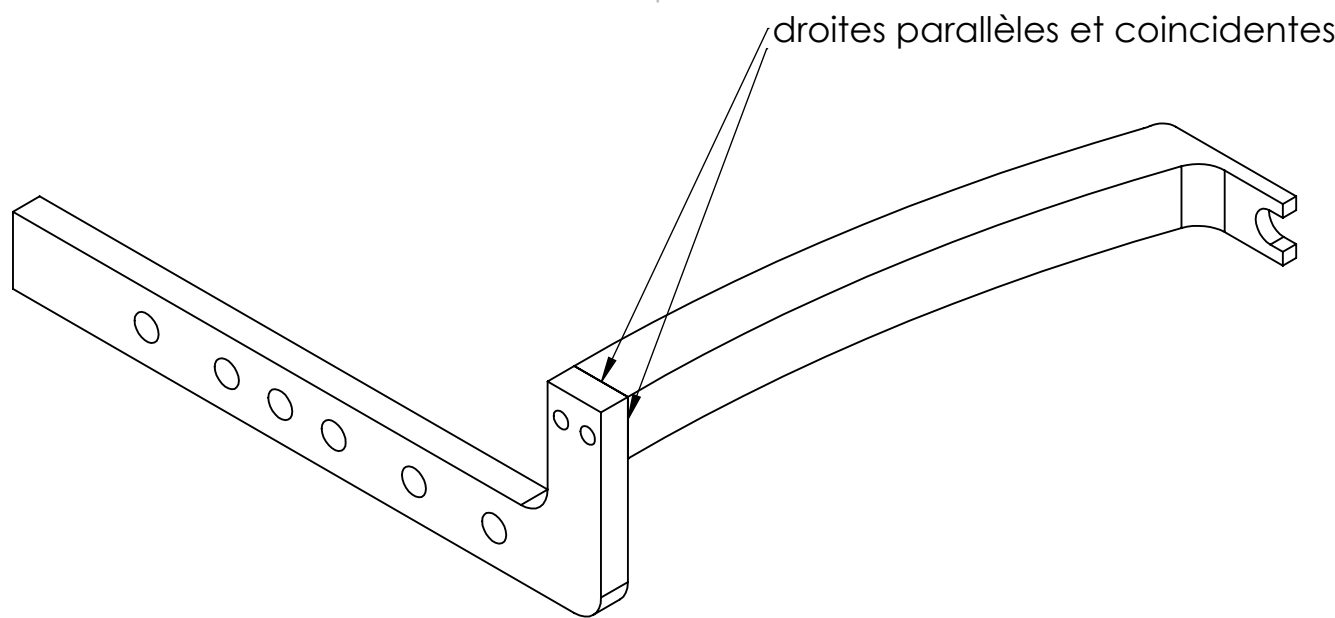
NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

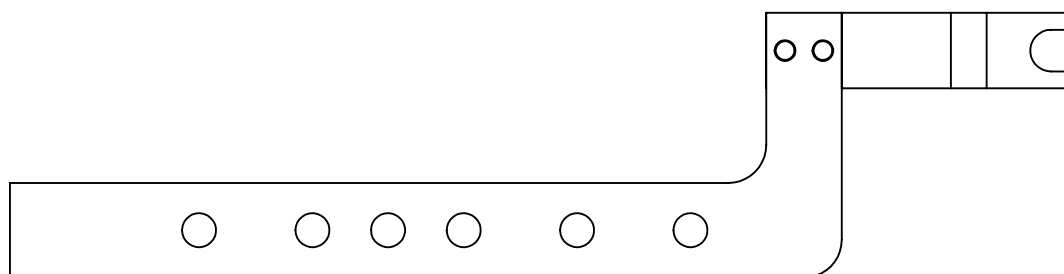
Quantité: 1

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

TITRE:	
No. DE PLAN	A4
assemblagebarreliaisongauche	
ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1



les deux pièces sont soudées ensemble



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

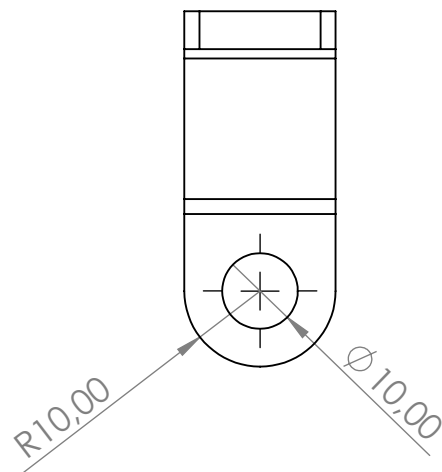
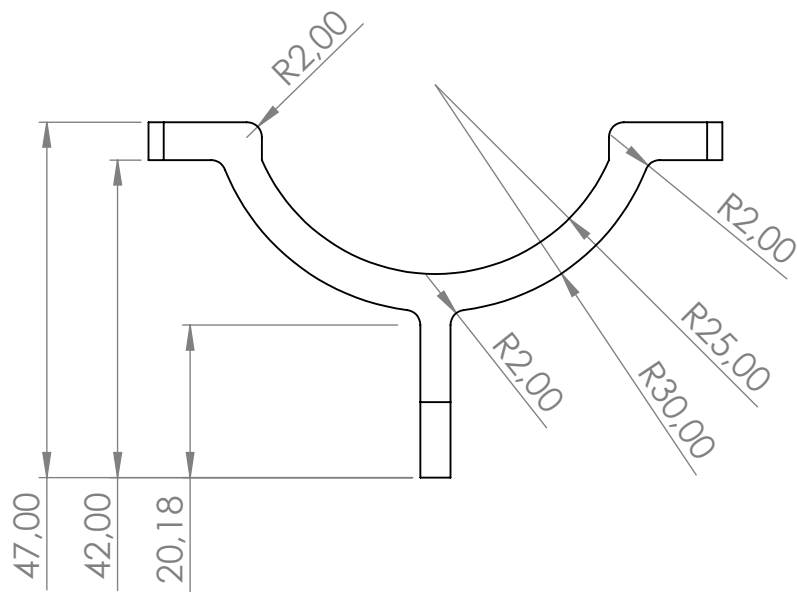
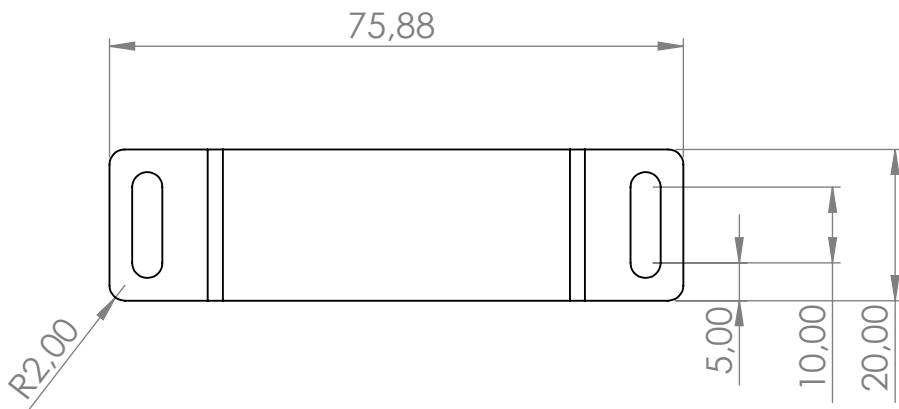
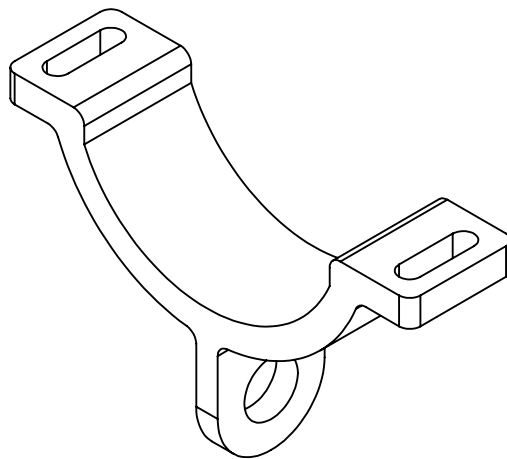
REVISION

Quantité: 1

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

TITRE:	
No. DE PLAN	
assemblagebarreliaisondroite	A4
ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1

E Bras de fixation



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

NOM	SIGNATURE	DATE			
AUTEUR: Adrien Roisin					
VERIF. Benoit Herman					
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

MATERIAU:

Aluminium

MASSE:

TITRE:

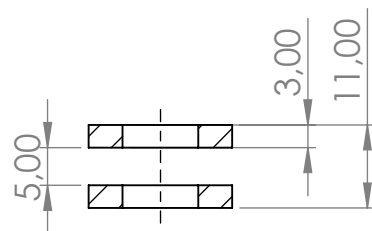
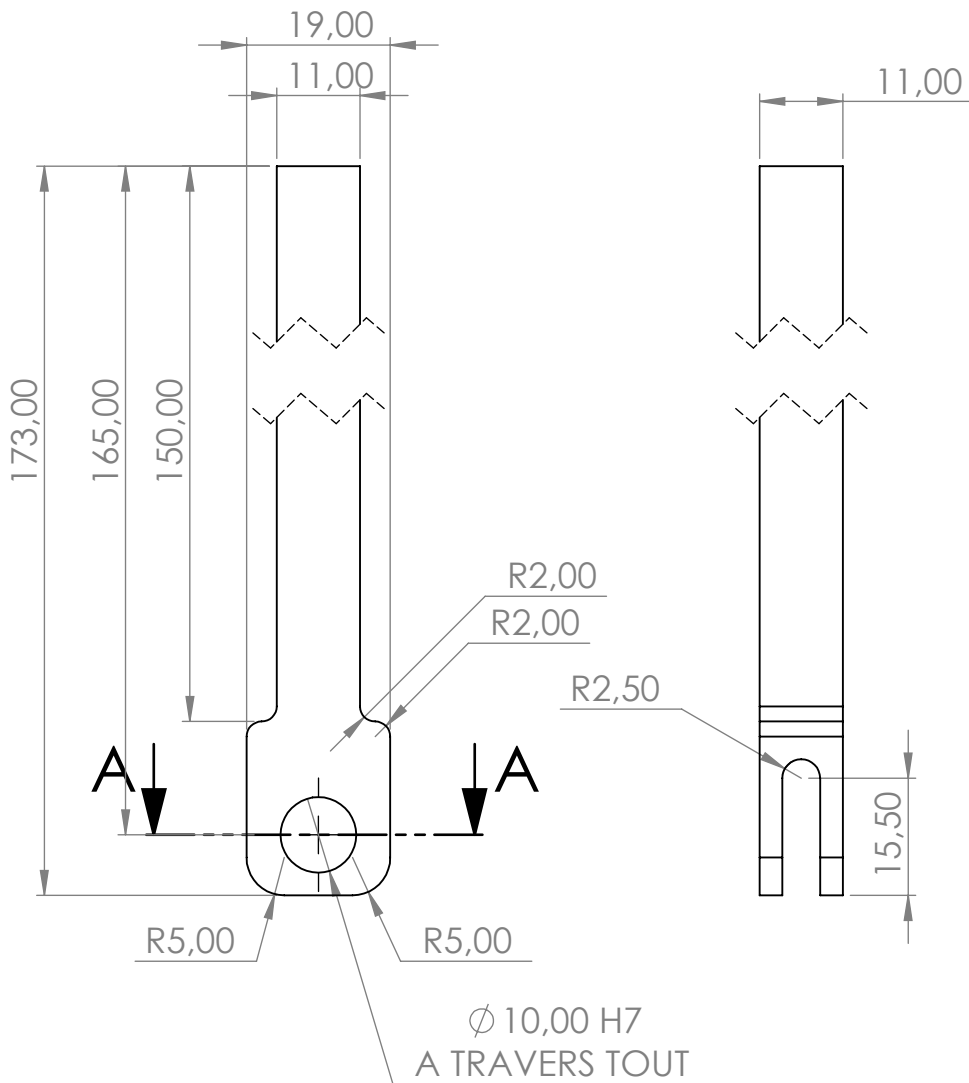
No. DE PLAN

Umaintient

A4

ECHELLE:1:2

FEUILLE 1 SUR 1



COUPE A-A

ECHELLE 1 : 1

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

NOM	SIGNATURE	DATE			
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

TITRE:

MATERIAU:

Aluminium

No. DE PLAN

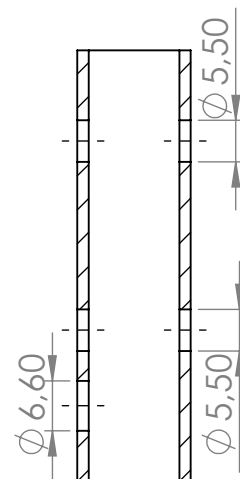
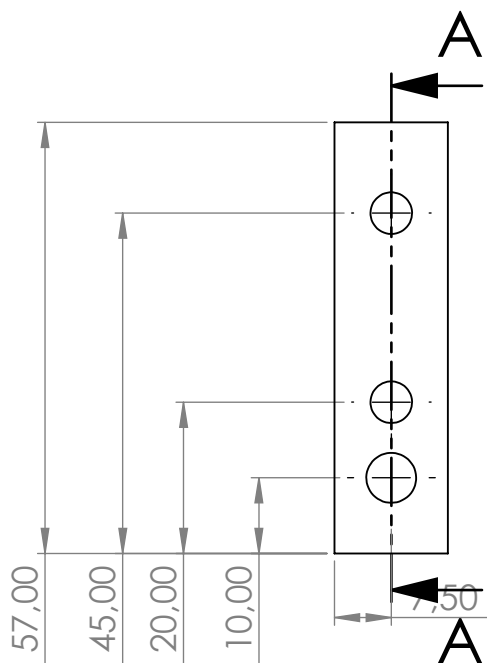
barre_maintient

A4

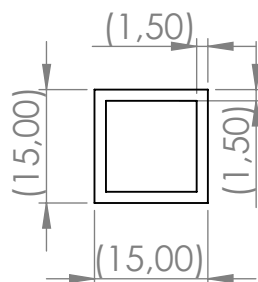
MASSE:

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1



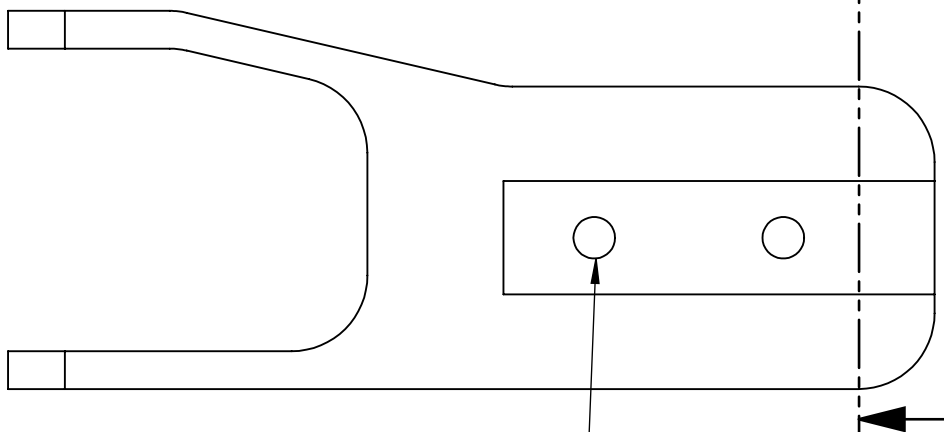
COUPE A-A



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: ISO 2768 m-K LINEAIRES: ANGULAIRES:				FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
								Quantité: 2			
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:					
AUTEUR	Adrien Roisin										
VERIF.	Benoit Herman										
APPR.											
FAB.											
QUAL.											
						MATERIAU:		No. DE PLAN			
						Profilé Acier 15x15x1,5		tubesupport			
						MASSE:		ECHELLE:1:1		FEUILLE 1 SUR 1	

Souder de part et d'autre le tuyau à la plaque

Le troisième trou (diamètre 6) est situé côté plaque



Les trous permettent l'alignement

COUPE A-A
ECHELLE 1 : 1

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES: ISO 2768 m-K
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

Quantité: 1

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR	Adrien Roisin				
VERIF.	Benoit Herman				
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

MATERIAU:

MASSE:

TITRE:

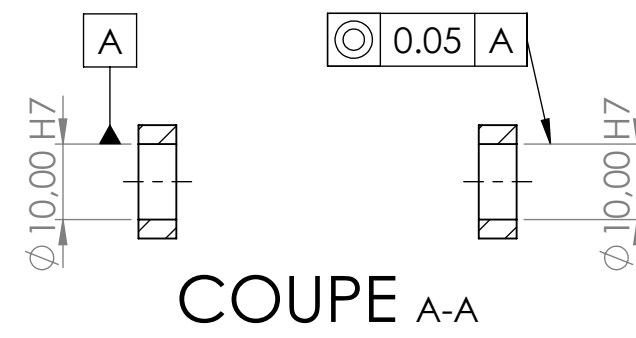
No. DE PLAN

ECHELLE:1:2

assemblagemaintien

A4

FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: ISO 2768 m-K LINEAIRES: ANGULAIRES:						FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION		
										Quantité: 1				
	NOM		SIGNATURE		DATE						TITRE:			
AUTEUR	Adrien Roisin													
VERIF.	Benoit Herman													
APPR.														
FAB.														
QUAL.							MATERIAU:				No. DE PLAN		A3	
							Acier				Plaquefixation			
							MASSE:				ECHELLE:1:1		FEUILLE 1 SUR 1	

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl