

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

En collaboration avec ETS RAHMOUNE

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique.

**Contribution à la conception d'une machine
arracheuse de pomme de terre et réalisation d'un
prototype**

Réalisé par : Hamza HEBHOUB

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2019

devant le Jury :

Président	M. Said RECHAK,	Professeur	ENP
Rapporteur/ Promoteur	M. Mohamed BOUAZIZ	Professeur	ENP
	M. Okba HAMRI	MC-A	ENP
	M. Mohamed RAHMOUNE	Ingénieur	ETS RAHMOUNE
Examineur	M. Mohamed LATRECHE	MA-A	ENP
Invité	M. Arezki SMAILI	Professeur	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

En collaboration avec ETS RAHMOUNE

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique.

**Contribution à la conception d'une machine
arracheuse de pomme de terre et réalisation d'un
prototype**

Réalisé par : Hamza HEBHOUB

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2019

devant le Jury :

Président	M. Said RECHAK,	Professeur	ENP
Rapporteur/ Promoteur	M. Mohamed BOUAZIZ	Professeur	ENP
	M. Okba HAMRI	MC-A	ENP
	M. Mohamed RAHMOUNE	Ingénieur	ETS RAHMOUNE
Examineur	M. Mohamed LATRECHE	MA-A	ENP
Invité	M. Arezki SMAILI	Professeur	ENP

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- à mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir et qui m'ont donné par leur amour la volonté d'aller toujours à l'avant. Que Dieu me les préserve.
- à mon frère Fares et mes deux sœurs Selma et Amani qui sont toujours à mes côtés.
- à ma famille et à tous mes amis en particulier Ramzi, Hamoudi et Mehdi.
- à tous mes camarades du Département de Génie Mécanique

Hamza HEBHOUB

Remerciements

Je tiens à remercier avant tout le bon Dieu, Le Tout Puissant, de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

J'adresse le grand remerciement à mon promoteur, Professeur BOUAZIZ Mohamed, pour m'avoir toujours fait confiance quant à la façon de mener mes travaux, pour ses conseils et ses directives.

Je le remercie aussi pour sa disponibilité, son aide, son soutien et ses qualités humaines. Je tiens à lui exprimer également ma gratitude pour sa bienveillance pendant mes trois années d'étude au sein du département de Génie Mécanique et pour ses enseignements.

Un grand Merci à Monsieur HAMRI Okba, mon deuxième promoteur, qui s'est toujours montré à mon écoute et pour sa disponibilité tout au long de la contribution à la conception de ce projet. Merci pour votre aide, gentillesse et encouragement.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur RAHMOUNE Mohamed, directeur de l'entreprise ETS RAHMOUNE, pour ses conseils, sa patience et pour le soutien et l'attention apportés tout au long de la réalisation de ce projet.

Comme je tiens particulièrement à remercier Monsieur le professeur RECHAK Saïd de m'avoir fait l'honneur de présider la soutenance, ainsi que Monsieur LATRECHE Mohamed qui a consacré une partie importante de son temps à la lecture et à l'évaluation de ce rapport.

Enfin, je remercie vivement Monsieur AMMICHE Ali de m'avoir aidé et encouragé.

ملخص:

تعتبر البطاطا منتج غذائي ذو استهلاك كبير، و هذا ما يستوجب اعطائه الاهمية الكاملة. لتحقيق ذلك، فالزراعة باستعمال وسائل ميكانيكية يمكنها الزيادة من انتاجه. هذا المشروع هو جزئ من هذه الفكرة من اجل توفير للمزارعين الصناعيين دراسة لآلة متخصصة في حصاد هذا المنتج. هذه الدراسة قائمة على الة حصاد البطاطا مستوحاة من نموذج صناعي قائم. من اجل تشكيل ذلك قمنا بصناعة نموذج مصغر.

الكلمات الدالة: البطاطا، الة حصاد البطاطا، وسائل زراعية ميكانيكية، الحصاد الميكانيكي للبطاطا.

Abstract:

Potato is a food of great consumption, hence the need to give it all importance. To achieve this, a culture with mechanical means that can increase its production is essential. This PFE is part of this idea in order to make available to industrial farmers a study on a machine specialized in the harvest of this food. The study is based on a potato harvester machine, inspired by an existing industrial model. It is concretized by the realization of a prototype.

Key words: Potato, Potato harvester machine, Agricultural mechanical means, Mechanical harvest of the potato.

Résumé :

La pomme de terre est un produit alimentaire d'une grande consommation, d'où la nécessité de lui accorder toute l'importance. Pour y arriver, une culture avec des moyens mécaniques pouvant augmenter sa production s'avère indispensable. Ce PFE s'inscrit dans cette idée dans le but de mettre à la disposition des industriels agriculteurs une étude sur une machine spécialisée dans la récolte de cet aliment. L'étude porte sur une machine arracheuse de pomme de terre, inspirée d'un modèle industriel existant. Elle est concrétisée par la réalisation d'un prototype.

Mots clés : Pomme de terre, Arracheuse de pomme de terre, Moyens mécaniques agricoles, Récolte mécanique de la pomme de terre.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Introduction générale.....	9
Chapitre 1 Généralités sur la récolte de la pomme de terre.....	8
1.1 Historique.....	12
1.1.1 Introduction en Algérie.....	12
1.2 Production mondiale.....	13
1.3 Evolution de la production de la pomme de terre en Algérie.....	15
1.4 Méthode de récolte de la pomme de terre.....	17
1.4.1 Récolte manuelle.....	17
1.4.2 Récolte mécanique.....	17
1.5 L'idée de notre projet et le choix de la machine.....	20
Chapitre 2 Calcul et dimensionnement de la machine arracheuse de pomme de terre.....	21
2.1 Chaîne cinématique.....	22
Remarques et interprétation.....	36
2.2 Détermination de l'angle optimum d'inclinaison du soc.....	38
2.3 Dimensionnement du renvoi d'angle (engrenages).....	43
2.3.1 Calcul du module moyen.....	43
2.3.2 Calcul du module au gros bout.....	44
2.3.3 Calcul des angles primitifs :.....	44
2.3.4 Calcul des diamètres primitifs :.....	45
2.3.5 Calcul numérique :.....	45
Chapitre 3 Conception de la machine sur un logiciel de CAO et réalisation d'un prototype ..	46
3.1 Introduction.....	47
3.2 Le châssis.....	49
3.3 Le soc.....	51
3.4 Les disques.....	53
3.5 Le mécanisme de renvoi d'angle.....	54
3.6 Le système bielle-manivelle.....	56
3.7 Le tamis.....	58
3.8 La machine assemblée.....	59
3.9 Validation du soc.....	60
Conclusion générale.....	64
Références Bibliographiques.....	65
Sitographie.....	66
Annexes.....	69

Liste des tableaux

1.1	Principaux pays producteurs de pomme de terre.....	13
1.2	Production de la pomme de terre par continent.....	14
1.3	Evolution de la production de la pomme de terre de consommation 2000-2017.....	15
2.1	Les données nécessaires pour le calcul d'engrenage.....	45
2.2	Le calcul des différents paramètres d'engrenage.....	46
3.1	Les principales caractéristiques de l'arracheuse.....	48
3.2	Les principaux composants de l'arracheuse.....	49
3.3	Désignations des différents composants du châssis.....	50
3.4	La composition chimique de l'acier au bore TBL.....	53
3.5	Désignations des différents composants du disque.....	54
3.6	Désignations des différents composants du système bielle manivelle.....	57
3.7	Résultats de l'étude statistique appliquée au soc.....	64

Table des figures

1.1	Evolution de la production de la pomme de terre des pays développés et en voie de développement (1991-2017).....	14
1.2	Production de la pomme de terre en Algérie de 2000 à 2017.....	16
1.3	Rendement de la production de la pomme de terre en Algérie de 2000 à 2017.....	16
1.4	La récolte manuelle de la pomme de terre en utilisant une fourche crochue et une fourche bêche.....	17
1.5	L'arracheuse à fourches.....	17
1.6	Machines à récoltes mécanique partielle.....	18
1.7	Arracheuse ramasseuse de pomme de terre de type UNIA.....	19
1.8	Arracheuse ramasseuse de pomme de terre de type Spedo Junior.....	19
1.9	Arracheuse ramasseuse de pomme de terre de type SPRING ALX-RH.....	20
2.1	Schéma de la chaîne cinématique de la machine.....	22
2.2	La variation de Δ_1 en fonction de θ_1	27
2.3	La variation de θ_{21} en fonction de θ_1	27
2.4	La variation de θ_{22} en fonction de θ_1	28
2.5	La variation de α_1 en fonction de θ_1	29
2.6	La variation de Δ_2 en fonction de θ_1	31
2.7	La variation de θ_{31} en fonction de θ_1	32
2.8	La variation de θ_{32} en fonction de θ_1	33
2.9	La variation de α_2 en fonction de θ_1	34
2.10	La variation de θ_{21} en fonction de θ_1 pour un pas de 10^{-4}°	36
2.11	La variation de α_1 en fonction de θ_1 pour un pas de 10^{-4}°	36
2.12	Vérification des valeurs particulières de θ_2 et θ_3 quand $\theta_1 = 90^\circ$ sur SolidWorks..	37
2.13	Schéma du système de forces agissant sur le soc de la machine.....	38

2.14	Schéma du système de forces agissant sur le soc de la machine, en tenant compte de la force dynamique F_3 et de la vitesse de la machine V_M	39
2.15	La variation de la force d'appui P en fonction de l'angle d'inclinaison α	41
2.16	La variation de la force d'appui P en fonction de l'angle d'inclinaison α dans l'intervalle $]0^\circ; \alpha_{critique}[$	42
2.17	La variation de la dérivée P' en fonction de l'angle d'inclinaison α	42
2.18	Diamètre moyen, Diamètre primitif d'une roue conique droite.....	44
3.1	Vue en perspective de la machine en illustrant ses différents composants.....	48
3.2	Vue en perspective du châssis sur SolidWorks.....	50
3.3	La réalisation du châssis pour le prototype.....	52
3.4	Vue en perspective du soc sur SolidWorks.....	53
3.5	La réalisation du soc pour le prototype.....	53
3.6	Vue en perspective du disque avec son support sur SolidWorks.....	54
3.7	La réalisation du disque avec son support pour le prototype.....	55
3.8	Vue en perspective du renvoi d'angle sur SolidWorks.....	56
3.9	Le moteur électrique et l'arbre excentrique pour le prototype.....	56
3.10	Vue en perspective du système bielle-manivelle lié au châssis sur SolidWorks.....	57
3.11	Le système bielle-manivelle pour le prototype.....	58
3.12	Vue en perspective du tamis sur SolidWorks.....	59
3.13	Le tamis du prototype.....	59
3.14	Comparaison entre la conception de la machine sur SolidWorks et le prototype.....	60
3.15	Applications des conditions aux limites et les chargements sur le soc.....	61
3.16	Création du maillage sur le soc.....	62
3.17	Distribution de contraintes sur le soc.....	62
3.18	Déplacement du soc.....	63
3.19	La déformation du soc après l'application des forces.....	63
3.20	La distribution du coefficient de sécurité de Von Mises.....	64

Introduction générale

Avec une superficie de 2 381 741 km², l'Algérie est le plus grand pays dans l'Afrique. Sa surface des terres agricoles couvre 18.2 % de la superficie totale, soit environ 43 396 164 ha (2015/2016), de plus, elle a des terres agricoles fertiles qui peuvent donner une meilleure production de plusieurs types de fruits et légumes et avec meilleure qualité [1].

Le secteur de l'agriculture occupe une place importante dans l'économie nationale puisqu'il emploie près de 26.8% de la population active totale et participe pour 12.3% au PIB (Produit Intérieur Brut) dans les quatre dernières années selon le ministère d'agriculture et développement rurale [Int1].

La culture de la pomme de terre est une culture prometteuse qui offre de nombreux atouts. D'un point de vue agronomique, sa culture est aisée et son potentiel de rendement est important (20 à 30 t/ha). D'un point de vue nutritionnel, elle se classe parmi les plantes à tubercule les plus nutritives avec une teneur énergétique élevée (100g de pomme de terre cuites à l'eau représente 85 calories). D'un point de vue commercial, elle est très appréciée par les populations et elle constitue une culture de rente pour de nombreux agriculteurs.

La place qu'elle occupe comme aliment de base pour la population mondiale a conduit l'Organisation des Nations Unies à déclarer l'année 2008 « Année internationale de la pomme de terre ». D'après Jacques Diouf (directeur générale de la FAO – 2008), la pomme de terre est en première ligne dans la lutte contre la faim et la pauvreté dans le monde.

Par conséquent, on peut présumer que l'extension de sa culture débouchera sur un accroissement de la sécurité alimentaire des pays producteurs.

L'Algérie est placée parmi les plus gros consommateurs de pomme de terre à l'échelle mondiale. Les disponibilités alimentaires à la consommation de ce produit sont de 111 kg par habitant annuellement, contre une consommation mondiale moyenne annuelle de 31 kg par habitant. À titre comparatif, la Bélarusse occupe la première place avec une consommation de

181 kg/habitant/an, alors que celle du Royaume-Uni est de 102 kg et la Tunisie avec 30 kg. À l'échelle africaine, la consommation moyenne est de 4 kg/habitant par an [Int2].

Par contre la production de pomme de terre en Algérie ne satisfait pas les besoins du consommateur, ce qui fait d'elle un pays dépendant de l'étranger surtout en matière de semence. Les statistiques de l'union européenne indiquent que l'Algérie verse 64 millions d'euros à l'UE pour la semence de pomme de terre. Ces semences importées ne présentent pas souvent les qualités requises et leur génotype n'est pas toujours conforme aux conditions édapho-climatique. De même la semence peut présenter quelques contaminations vu que celle-ci est très connue par sa sensibilité à de nombreuses infections qui lui sont transmises à chaque génération par le tubercule et pour lequel aucune lutte chimique n'est possible.

Au fil du temps, la culture des fruits et légumes et, en particulier, la pomme de terre, en Algérie a connu, malheureusement, un manque énorme en termes de main d'œuvre qui s'intéresse beaucoup plus ces dernières années aux usines industrielles et aux travaux de bureautique. L'agriculteur est donc souvent en manque de main d'œuvre. Par conséquent, il trouve des difficultés en termes de récolte et ramassage manuelle de pomme de terre.

Pour des besoins industriels dans notre pays, l'entreprise ETS RAHMOUNE nous a sollicité afin d'établir le dimensionnement et la conception du modèle industriel, dont l'objectif est de réaliser une série de machines.

Dans le but d'apporter une contribution significative, nous avons jugé intéressant de contribuer à la conception, le dimensionnement et la réalisation d'un prototype d'une machine arracheuse de pomme de terre tractée en se basant sur un modèle industriel déjà existant.

Pour parvenir à cet objectif, le mémoire est organisé comme suit:

- Chapitre 1 : Généralités sur la récolte de la pomme de terre.
- Chapitre 2 : Calcul et dimensionnement d'une machine arracheuse de pomme de terre.
- Chapitre 3 : Conception de la machine sur un logiciel de CAO et réalisation d'un prototype.

Chapitre 1

Généralités sur la récolte de la pomme de terre

1.1 Historique

La pomme de terre est l'une des cultures les plus importantes tant sur le plan mondial qu'en Algérie, où elle occupe la première place parmi les plantes potagères. Les pays d'origine de la pomme de terre est le Chili, où elle est cultivée dans les régions montagneuses des Andes.

Pendant l'occupation de l'Amérique par les Espagnoles (1526-1543), la culture de la pomme de terre était répandue depuis longtemps dans le Chili, le Pérou et la Colombie, ce qui attestent les peintures de cette plante sur les anciens vases funémirs et les tubercules trouvés dans les cimetières du II^{ème} siècle. En Europe, la pomme de terre a été introduite premièrement en Espagne en 1565. Ensuite, elle s'est répandue en Italie, en Pays Bas, en Autriche et en Suisse jusqu'à la fin du XVI^{ème} siècle.

La culture de la pomme de terre en France est dûe à Parmentier et a été mentionnée pour la première fois par Olivier De Serres, sous le nom de Tartoufle.

L'extension de la culture de pomme de terre en Europe se fit très lentement et rencontra souvent des vives oppositions car elle était considérée comme une plante dangereuse.

La pomme de terre une fois acceptée comme une plante alimentaire est devenue rapidement une culture de base en remplaçant le pain dans beaucoup de pays de l'Europe central et du nord.

Il est intéressant de mentionner qu'à présent l'Europe détient 90% de superficie cultivée de pomme de terre tandis que l'Amérique du Sud 20% [2].

1.1.1 Introduction en Algérie

Selon les historiens, l'entrée de la pomme de terre en Algérie remonte au milieu de la première décennie du XIX^{ème} siècle, elle a été cultivée principalement pour l'exporter vers le marché Français. Après l'indépendance, elle est devenue un produit important pour la consommation locale, et de plus en plus importante, dans le régime alimentaire. La demande en cette culture s'est alors accrue. Elle représente la première culture maraichère du point de vue superficie et production, avec 47 581 milliers de quintaux en 2015/2016, selon le Ministère de l'Agriculture.

En Algérie, la culture de la pomme de terre dans tous ses volets, semences et consommation, occupe aujourd'hui une place stratégique dans la nouvelle politique du renouveau agricole et rural où sa culture reste parmi les espèces maraichères. Celle-ci occupe une place primordiale tant par l'importance qu'elle procure que par les volumes financiers mobilisés annuellement pour sa production locale et/ou son importation (consommation et semence).

A l'inverse de la production de pomme de terre de consommation qui a connu une augmentation remarquable ces dernières années, la production de semences de cette culture connaît depuis longtemps une stagnation avec une production médiocre. Cette production est destinée essentiellement à l'arrière-saison, ce qui a conduit au recours à l'importation pour couvrir presque la moitié des besoins nationaux estimés à 220 000 t/an, soit un coût d'importation variant entre 65 et 70 millions d'euros selon les années.

1.2 Production mondiale

Le secteur de la pomme de terre est en pleine évolution. Ainsi, jusqu'au début des années 90, la plupart de la production était cultivée et consommée essentiellement en Europe, en Amérique du nord et dans les pays de l'ex-union soviétique. Depuis, la production et la demande ont enregistré une forte croissance en Asie, en Afrique et en Amérique latine où la production est passée de moins de 30 millions de tonnes au début des années 60, à plus de 238 millions de tonnes entre 2016 et 2017 (**figure 1.1**) [3].

La production mondiale de la pomme de terre peut être estimée à environ 388 190 674 tonnes par année, pour une superficie de 19 302 642 ha [3].

Le tableau 1.1 montre les grands pays producteurs qui sont la Chine et l'Inde.

Tableau. 1.1 – Principaux pays producteurs de pomme de terre [3]

Pays	Production (tonnes)
Chine	99 205 580
Inde	48 605 000
Féd. De Russie	29 589 976
Ukraine	22 208 220
Etats-Unis	20 017 350
Allemagne	11 720 000
Pologne	9 171 733
Belarus	6 414 755
Pays-Bas	7 391 881
France	7 342 203

Les pays en voie de développement tel que l'Inde, connaissent depuis le début des années 90, une évolution significative de la production (**figure 1.1**).

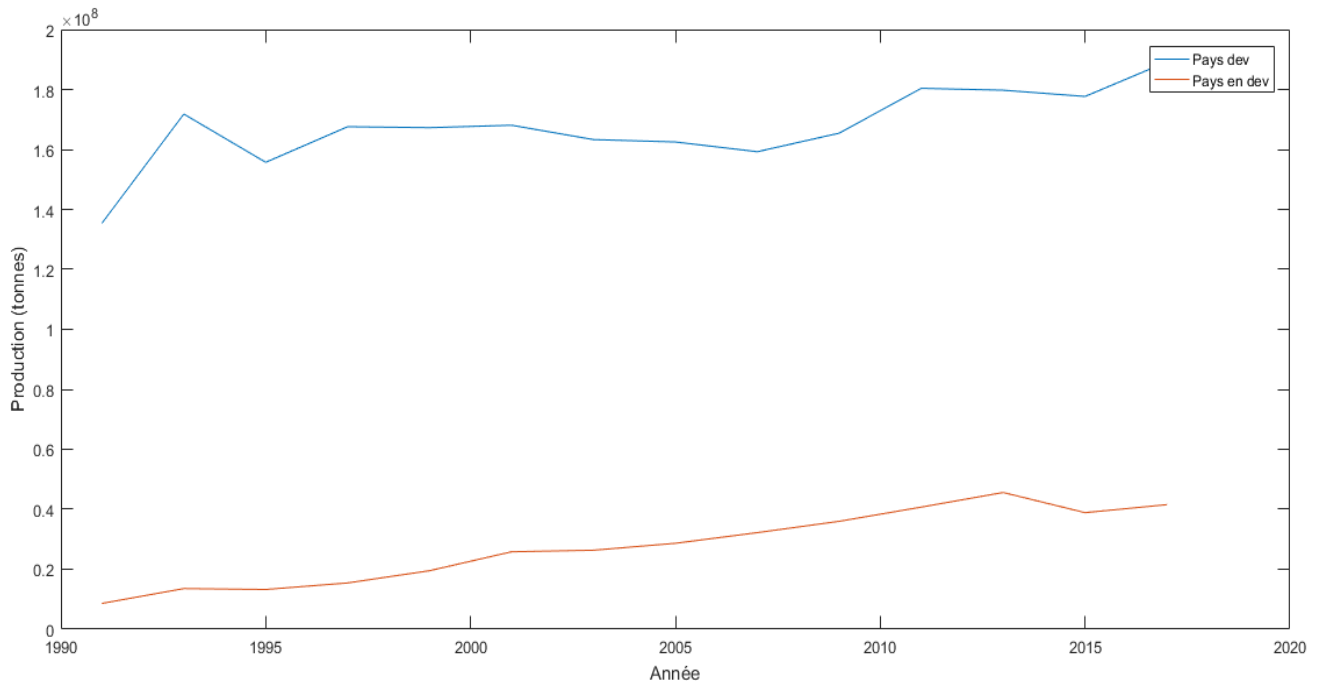


Fig. 1.1 – Evolution de la production de la pomme de terre des pays développés et en voie de développement (1991-2017) [3]

La production mondiale de la pomme de terre connaît une grande importance aux niveaux des continents (**Tableau 1.2**).

Tableau. 1.2 – Production de la pomme de terre par continent [3]

Continent	Production (tonnes)	Surface récoltée (ha)	Rendement (t/ha)
Asie et Océanie	197 243 829	10 247 484	19.25
Europe	121 761 565	5 365 045	22.69
Afrique	25 011 823	1 892 633	13.21
Amérique du Nord	24 429 179	757 269	32.26
Amérique latine	16 979 165	935 598	18.15
Totale	385 425 561	19 198 029	20.08

L'Asie et l'Europe sont les deux principaux continents producteurs de la pomme de terre. Ils ont fourni plus de 51% de la production mondiale en 2017. Le tableau 2.2 montre que la production de l'Amérique latine est la plus faible. Quand à l'Amérique du Nord, sa production est faible mais sa surface récoltée est exploitée au maximum d'où un rendement le plus élevé avec plus de 32 tonnes/ha.

1.3 Evolution de la production de la pomme de terre en Algérie

Depuis le lancement du programme national de production (2003) et jusqu'à nos jours, la culture de la pomme de terre en Algérie a connu un développement spectaculaire. Ceci est dû à l'accroissement des superficies cultivées accompagné d'une importante augmentation du rendement.

En 2017, l'Algérie occupe la première place dans la production de la pomme de terre en Afrique selon un rapport de la FAO [3].

Les chiffres présentés dans le rapport indiquent que la production nationale a dépassé le seuil de quatre millions de tonnes durant l'année 2017 cultivés sur une superficie estimée à 149 milles hectares. Le rendement a atteint 31 tonnes/ha.

Tableau. 1.3 – Evolution de la production de la pomme de terre de consommation 2000-2017 [3]

Année	Production (tonnes)	Surface cultivée (ha)	Rendement (t/ha)
2000	1 207 690	72 690	16.61
2001	967 232	65 790	14.70
2002	1 333 465	72 560	18.38
2003	1 879 918	88 660	21.20
2004	1 896 270	93 144	20.36
2005	2 156 550	99 717	21.63
2006	2 180 961	98 825	22.07
2007	1 506 859	79 339	18.99
2008	2 171 058	91 841	23.64
2009	2 636 057	105 121	25.08
2010	3 300 312	121 996	27.05
2011	3 862 194	131 903	29.28
2012	4 219 476	138 666	30.43
2013	4 886 538	161 156	30.32
2014	4 673 516	156 176	29.92
2015	4 539 577	153 313	29.61
2016	4 758 137	156 296	30.44
2017	4 606 403	148 692	30.98

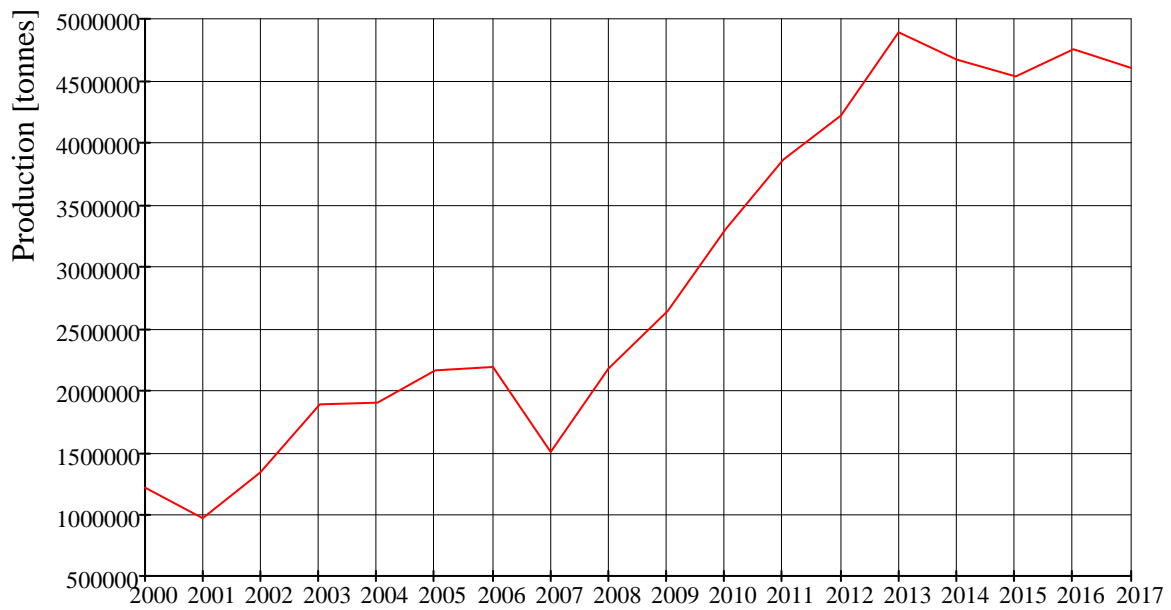


Fig. 1.2 - Production de la pomme de terre en Algérie de 2000 à 2017

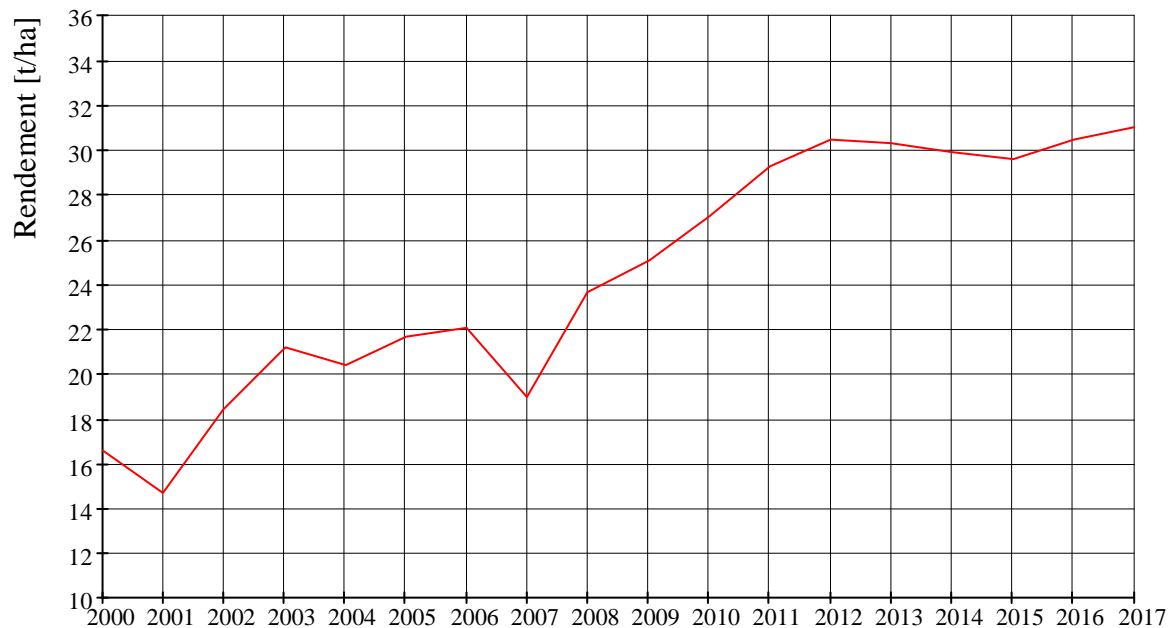


Fig. 1.3 - Rendement de la production de la pomme de terre en Algérie de 2000 à 2017

Malgré cette nette augmentation des rendements, la production nationale n'arrive pas à satisfaire les besoins nationaux en semence de pomme de terre. Rappelons que 80% des besoins en semences proviennent de l'importation (d'un montant de 60 millions d'Euros). Signalons également que l'auto-approvisionnement en semence représenterait un taux variant entre 10% et 20% de la production locale ; ce volet ne concernant que la tranche d'arrière-saison et une partie de la tranche primeur.

1.4 Méthode de récolte de la pomme de terre

Pour la récolte de la pomme de terre, on peut distinguer essentiellement deux méthodes :

1.4.1 Récolte manuelle

C'est une méthode traditionnelle souvent utilisée par les petits producteurs dans des petites surfaces de terre dont la récolte s'effectue par temps sec, les tubercules s'arrachent facilement avec une houe, une fourche crochue ou une fourche bêche (les outils à dents non pointues sont préférés pour ne pas abîmer la pomme de terre).



Fig. 1.4 – La récolte manuelle de la pomme de terre en utilisant une fourche crochue (à droite [Int3]) et une fourche bêche (à gauche [Int4])

1.4.2 Récolte mécanique

L'arracheuse de pommes de terre, apparue dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, fut la première étape de la mécanisation de la culture des pommes de terre, précédée par l'apparition de charrues spécialisées, dépourvues de coutre et dont le soc-buttoir est équipé de versoirs à grille pour séparer les tubercules de la terre.

1.4.2.1 Arracheuses à fourches

C'est une arracheuse à traction animale ou portée sur tracteur de faible puissance dont le soc est triangulaire et le terrage par levier. La traction nécessaire est 2 chevaux ou tracteur de 12 CV.



Fig. 1.5 – L'arracheuse à fourches [Int5]

1.4.2.2 Récolte mécanique partielle

Ce sont des arracheuses de pomme de terre portées à éjection latérale (**figure 1.6-a**) ou arrière (**figure 1.6-b**), applicable sur les petits tracteurs munis d'attelage à 3 points. Elles ont été conçues pour la récolte de pomme de terre sur des parcelles de terre de petites et moyennes tailles. Ces machines sont composées d'un soc excavateur et de 2 grilles à oscillation transversale et alternée, dont le mouvement est assuré par un arbre muni d'excentriques à ses extrémités. Les pommes de terre séparées de la terre sont déposées sur le sol en un seul andain, permettant au tracteur d'arracher rang sur rang. Des silentblochs antivibratoires sont montés sur tous les points sujets à vibration, lesquels permettent de garantir la stabilité de la machine pendant le travail. La production de ces arracheuses est estimée par 0.25 ha/heure alors que la production manuelle est estimée par 0.0042 ha/heure (pour 10 personnes).

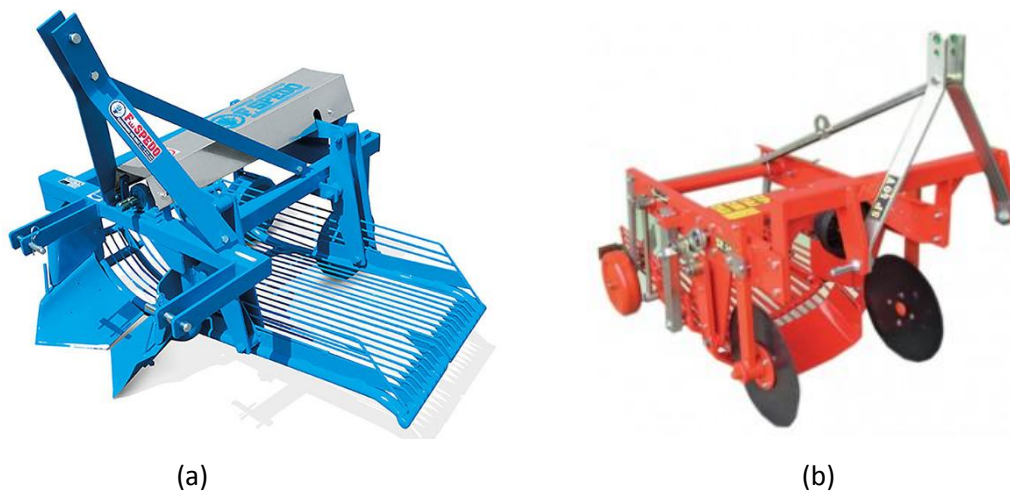


Fig. 1.6 – Machines à récolte mécanique partielle
(a) à éjection latérale [Int6]
(b) à éjection arrière [Int7]

1.4.2.3 Récolte mécanique complète

Dans ce cas, toutes les phases d'arrachage et de ramassage sont opérées en même temps en utilisant une seule machine multifonctions. La machine passe par les lignes de pomme de terre en écrasant les fanes et la plante de pomme de terre. Après, avec un soc excavateur elle creuse la terre et arrache les tubercules, les racines et les tiges. Le tas de pomme de terre est ensuite transporté vers des éléments de nettoyage, par l'intermédiaire d'un convoyeur à barres à secousses actives, où il est dispersé et partiellement nettoyé du sol et des résidus de récolte. Au premier stade du nettoyage, une grande quantité de terre et de plante-racines sont mélangées à la pomme de terre, pour cette raison, il faut que l'intensité du processus de

séparation doit être à son niveau maximal. Au fur et à mesure que la pomme de terre s'éloigne de l'excavateur, la quantité de terre dans le tas de pomme de terre diminue, c'est pourquoi le contact avec choc entre les éléments de la machine et la pomme de terre doit être réduit au maximum pour éviter d'endommager la pomme de terre. Ensuite, le tas composé de racines et de pomme de terre est acheminé en douceur vers des puits de battage et des rouleaux de nettoyage pour éliminer une grande quantité de fanes. Enfin, les tubercules sont dirigés avec un convoyeur vers le dernier convoyeur de chargement. Cette phase s'accompagne d'une dernière opération mécanique. Ainsi, l'opération de récolte dans ce cas consiste parfois simplement à soulever le sol, charger la récolte dans une remorque si nécessaire, et la nettoyer au champ ou sur un site de stockage [Int8].

Il existe plusieurs types d'arracheuse-ramasseuses de pomme de terre parmi lesquelles UNIA (**figure 1.7**), Spedo Junior (**figure 1.8**) et SPRING ALX-RH (**figure 1.9**)



Fig. 1.7 – Arracheuse ramasseuse de pomme de terre de type UNIA [Int9]



Fig. 1.8 – Arracheuse ramasseuse de pomme de terre de type Spedo Junior [Int10]



Fig. 1.9 – Arracheuse ramasseuse de pomme de terre de type SPRING ALX-RH [Int11]

1.5 L'idée de notre projet et le choix de la machine

Comme nous l'avons cité dans l'introduction générale, l'entreprise RAHMOUNE s'intéresse à la conception et à la réalisation des machines agricoles dans le but de les fabriquer en Algérie et d'éviter de les importer de l'étranger. C'est dans cette optique que cette entreprise voit la nécessité d'une convention de coopération avec le département de Génie Mécanique sous forme de Projets de Fin d'Etudes dans ce domaine.

Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à la conception et la réalisation d'un prototype de machine arracheuse de pomme de terre à récolte mécanique partielle sur la base d'une démarche technique.

La démarche proposée est organisée comme suit :

- Schéma cinématique de la machine.
- Etude théorique des différents éléments fonctionnels de la machine.
- Choix des matériaux pour chaque composant.
- Conception en 3D des différentes pièces et la réalisation de l'assemblage des éléments.
- Validation de la conception par la simulation.
- Réalisation de plans de fabrication du prototype.

Chapitre 2

**Calcul et dimensionnement de la
machine arracheuse de pomme de
terre**

2.1 Chaîne cinématique

Dans notre cas, la chaîne cinématique de la machine est représentée dans la figure ci-dessous :

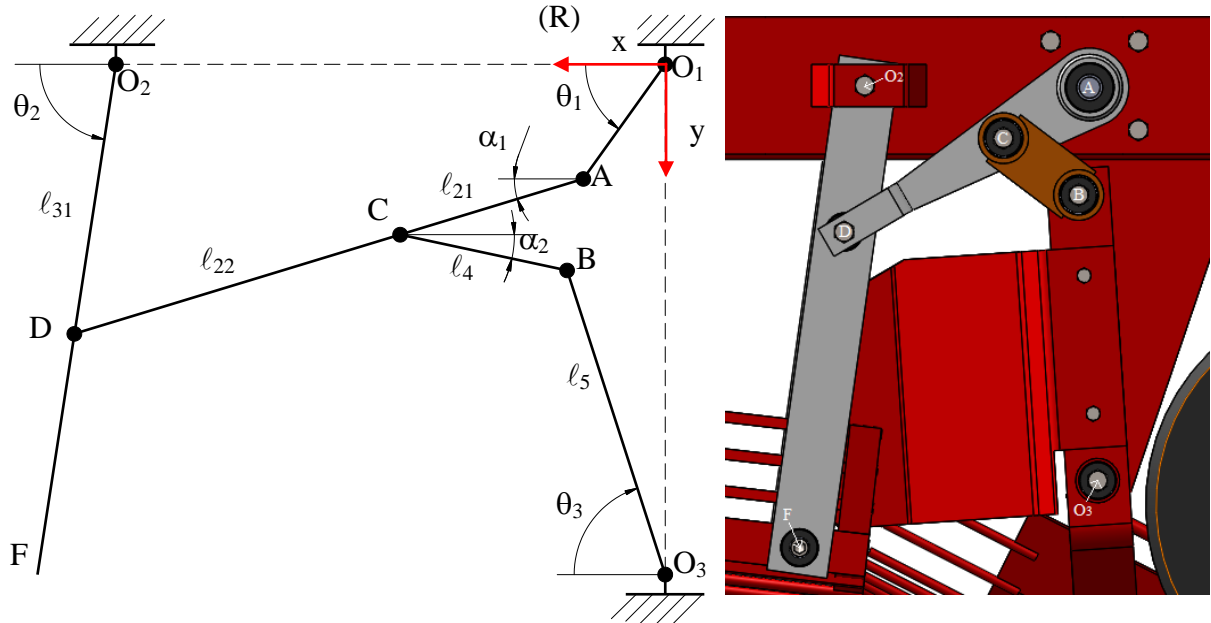


Fig. 2.1 – Schéma de la chaîne cinématique de la machine

Avec :

- Les points O_1 , O_2 et O_3 sont fixes.
- O_1A est l'excentricité de l'arbre récepteur.
- AD représente la bielle 1.
- O_2F est la barre de transmission de mouvement au tamis.
- BC représente la bielle 2.
- O_3B est le support du soc.

Dans cette configuration, $\theta_1(t)$ est connue, avec :

$$\theta_1(t) = \omega_1 t \quad (2.1)$$

Notre objectif est de déterminer les expressions des vitesses de rotation de sortie ω_{O_2D} et ω_{O_3B} en fonction de ω_{O_1A} qui est connue (400 tr/min).

Dans la configuration la plus générale, on note :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\Omega(O_1A/R)} &= \overrightarrow{\Omega_1} \\ \overrightarrow{\Omega(AD/R)} &= \overrightarrow{\Omega(AC/R)} = \overrightarrow{\Omega_2} \\ \overrightarrow{\Omega(O_2D/R)} &= \overrightarrow{\Omega_3} \end{aligned}$$

$$\overline{\Omega(CB/R)} = \overline{\Omega_4}$$

$$\overline{\Omega(O_3B/R)} = \overline{\Omega_5}$$

Nous avons la relation entre les vitesses en deux points du solide:

$$\overline{V(D/R)} = \overline{V(A/R)} + \overline{\Omega(AD/R)} \wedge \overline{AD} \quad (2.2)$$

Tel que :

$$A \in O_1A \rightarrow \overline{V(A/R)} = \overline{\Omega(O_1A/R)} \wedge \overline{O_1A} \quad (2.3)$$

Avec :

$$\overline{\Omega(O_1A/R)} = \omega_1 \vec{k} \quad (2.4)$$

$$\overline{O_1A} = l_1 \cos \theta_1 \vec{i} + l_1 \sin \theta_1 \vec{j} \quad (2.5)$$

En remplaçant dans l'équation (2.3) on aura :

$$\overline{V(A/R)} = -\omega_1 l_1 \sin \theta_1 \vec{i} + \omega_1 l_1 \cos \theta_1 \vec{j} \quad (2.6)$$

On a aussi :

$$D \in O_2D \rightarrow \overline{V(D/R)} = \overline{\Omega(O_2D/R)} \wedge \overline{O_2D} \quad (2.7)$$

Avec :

$$\overline{\Omega(O_2D/R)} = \omega_3 \vec{k} \quad (2.8)$$

$$\overline{O_2D} = l_{31} \cos \theta_2 \vec{i} + l_{31} \sin \theta_2 \vec{j} \quad (2.9)$$

En remplaçant dans l'équation (2.7) on aura :

$$\overline{V(D/R)} = -\omega_3 l_{31} \sin \theta_2 \vec{i} + \omega_3 l_{31} \cos \theta_2 \vec{j} \quad (2.10)$$

D'autre part, on a :

$$\overline{\Omega(AD/R)} \wedge \overline{AD} = (\omega_2 \vec{k}) \wedge (l_2 \cos \alpha_1 \vec{i} + l_2 \sin \alpha_1 \vec{j}) = -\omega_2 l_2 \sin \alpha_1 \vec{i} + \omega_2 l_2 \cos \alpha_1 \vec{j} \quad (2.11)$$

En utilisant les deux équations (2.2) et (2.10) on aura :

$$\begin{aligned} & (-\omega_1 l_1 \sin \theta_1 \vec{i} + \omega_1 l_1 \cos \theta_1 \vec{j}) + (-\omega_2 l_2 \sin \alpha_1 \vec{i} + \omega_2 l_2 \cos \alpha_1 \vec{j}) \\ & = -\omega_3 l_{31} \sin \theta_2 \vec{i} + \omega_3 l_{31} \cos \theta_2 \vec{j} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Ainsi :

$$\begin{aligned} & (-\omega_1 l_1 \sin \theta_1 - \omega_2 l_2 \sin \alpha_1) \vec{i} + (\omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_2 \cos \alpha_1) \vec{j} \\ & = -\omega_3 l_{31} \sin \theta_2 \vec{i} + \omega_3 l_{31} \cos \theta_2 \vec{j} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Ce qui permet d'avoir les deux équations suivantes :

$$\omega_1 l_1 \sin \theta_1 + \omega_2 l_2 \sin \alpha_1 = \omega_3 l_{31} \sin \theta_2 \quad (2.14)$$

$$\omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_2 \cos \alpha_1 = \omega_3 l_{31} \cos \theta_2 \quad (2.15)$$

On a aussi :

$$B \in O_3 B \rightarrow \overrightarrow{V(B/R)} = \overrightarrow{\Omega(O_3 B/R)}_{\Delta} \overrightarrow{O_3 B} \quad (2.16)$$

Avec :

$$\overrightarrow{\Omega(O_3 B/R)} = \omega_5 \vec{k} \quad (2.17)$$

$$\overrightarrow{O_3 B} = l_5 \cos \theta_3 \vec{i} - l_5 \sin \theta_3 \vec{j} \quad (2.18)$$

Ce qui donne :

$$\overrightarrow{V(B/R)} = \omega_5 l_5 \sin \theta_3 \vec{i} + \omega_5 l_5 \cos \theta_3 \vec{j} \quad (2.19)$$

D'autre part, on a aussi :

$$\overrightarrow{V(B/R)} = \overrightarrow{V(C/R)} + \overrightarrow{\Omega(CB/R)}_{\Delta} \overrightarrow{CB} \quad (2.20)$$

Avec :

$$\overrightarrow{V(C/R)} = \overrightarrow{V(A/R)} + \overrightarrow{\Omega(AC/R)}_{\Delta} \overrightarrow{AC} \quad (2.21)$$

$$\overrightarrow{V(C/R)} = (-\omega_1 l_1 \sin \theta_1 \vec{i} + \omega_1 l_1 \cos \theta_1 \vec{j}) + (-\omega_2 l_{21} \sin \alpha_1 \vec{i} + \omega_2 l_{21} \cos \alpha_1 \vec{j}) \quad (2.22)$$

Autrement :

$$\overrightarrow{V(C/R)} = (-\omega_1 l_1 \sin \theta_1 - \omega_2 l_{21} \sin \alpha_1) \vec{i} + (\omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_{21} \cos \alpha_1) \vec{j} \quad (2.23)$$

On a aussi :

$$\overrightarrow{\Omega(CB/R)} = \omega_4 \vec{k} \quad (2.24)$$

$$\overrightarrow{CB} = -l_4 \cos \alpha_2 \vec{i} + l_4 \sin \alpha_2 \vec{j} \quad (2.25)$$

Alors :

$$\overrightarrow{\Omega(CB/R)}_{\Delta} \overrightarrow{CB} = -\omega_4 l_4 \sin \alpha_2 \vec{i} - \omega_4 l_4 \cos \alpha_2 \vec{j} \quad (2.26)$$

Et on aura pour $\overrightarrow{V(B/R)}$:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{V(B/R)} &= (-\omega_1 l_1 \sin \theta_1 - \omega_2 l_{21} \sin \alpha_1 - \omega_4 l_4 \sin \alpha_2) \vec{i} \\ &+ (\omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_{21} \cos \alpha_1 - \omega_4 l_4 \cos \alpha_2) \vec{j} \end{aligned} \quad (2.27)$$

En utilisant les deux équations (2.19) et (2.27) on aura les deux équations suivantes:

$$\omega_5 l_5 \sin \theta_3 = -\omega_1 l_1 \sin \theta_1 - \omega_2 l_{21} \sin \alpha_1 - \omega_4 l_4 \sin \alpha_2 \quad (2.28)$$

$$\omega_5 l_5 \cos \theta_3 = \omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_{21} \cos \alpha_1 - \omega_4 l_4 \cos \alpha_2 \quad (2.29)$$

De la **figure 2.1** nous avons :

$$\overrightarrow{O_1 O_2} = \overrightarrow{O_1 A} + \overrightarrow{AD} + \overrightarrow{D O_2} \quad (2.30)$$

La projection suivant x donne :

$$O_1 O_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \alpha_1 - l_{31} \cos \theta_2 \quad (2.31)$$

Et la projection suivant y donne :

$$0 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \alpha_1 - l_{31} \sin \theta_2 \quad (2.32)$$

D'autre part nous avons :

$$\overrightarrow{O_1 O_3} = \overrightarrow{O_1 A} + \overrightarrow{AC} + \overrightarrow{CB} + \overrightarrow{B O_3} \quad (2.33)$$

La projection suivant y donne :

$$O_1 O_3 = l_1 \sin \theta_1 + l_{21} \sin \alpha_1 + l_4 \sin \alpha_2 + l_5 \sin \theta_3 \quad (2.34)$$

Et la projection suivant x donne :

$$0 = l_1 \cos \theta_1 + l_{21} \cos \alpha_1 - l_4 \cos \alpha_2 - l_5 \cos \theta_3 \quad (2.35)$$

Après ce développement on aura le système d'équations suivant :

$$\omega_1 l_1 \sin \theta_1 + \omega_2 l_2 \sin \alpha_1 = \omega_3 l_{31} \sin \theta_2 \quad (2.14)$$

$$\omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_2 \cos \alpha_1 = \omega_3 l_{31} \cos \theta_2 \quad (2.15)$$

$$\omega_5 l_5 \sin \theta_3 = -\omega_1 l_1 \sin \theta_1 - \omega_2 l_{21} \sin \alpha_1 - \omega_4 l_4 \sin \alpha_2 \quad (2.28)$$

$$\omega_5 l_5 \cos \theta_3 = \omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_{21} \cos \alpha_1 - \omega_4 l_4 \cos \alpha_2 \quad (2.29)$$

$$O_1 O_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \alpha_1 - l_{31} \cos \theta_2 \quad (2.31)$$

$$0 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \alpha_1 - l_{31} \sin \theta_2 \quad (2.32)$$

$$O_1 O_3 = l_1 \sin \theta_1 + l_{21} \sin \alpha_1 + l_4 \sin \alpha_2 + l_5 \sin \theta_3 \quad (2.34)$$

$$0 = l_1 \cos \theta_1 + l_{21} \cos \alpha_1 - l_4 \cos \alpha_2 - l_5 \cos \theta_3 \quad (2.35)$$

- Détermination des expressions de $\cos \theta_2$ et $\cos \alpha_1$:

Pour cela on combine les deux équations (2.31) et (2.32) :

$$(l_2 \cos \alpha_1 = O_1 O_2 - l_1 \cos \theta_1 + l_{31} \cos \theta_2)^2 \quad (2.36)$$

$$(l_2 \sin \alpha_1 = -l_1 \sin \theta_1 + l_{31} \sin \theta_2)^2 \quad (2.37)$$

Ce qui donne :

$$l_2^2 = O_1 O_2^2 + l_1^2 - 2O_1 O_2 l_1 \cos \theta_1 + l_{31}^2 + 2l_{31} \cos \theta_2 (O_1 O_2 - l_1 \cos \theta_1) - 2l_1 l_{31} \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (2.38)$$

On note :

$$O_1 O_2^2 + l_1^2 + l_{31}^2 - l_2^2 = L_1$$

Ainsi :

$$[L_1 - 2O_1 O_2 l_1 \cos \theta_1 + 2l_{31} \cos \theta_2 (O_1 O_2 - l_1 \cos \theta_1)]^2 = 4l_1^2 l_{31}^2 \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 \quad (2.39)$$

En développant cette équation en mettant $\sin^2 \theta_2 = 1 - \cos^2 \theta_2$ et après simplification on aura :

$$\begin{aligned} & (4l_{31}^2 O_1 O_2^2 + 4l_1^2 l_{31}^2 - 8O_1 O_2 l_1 l_{31}^2 \cos \theta_1) \cos^2 \theta_2 \\ & + 4l_{31} [2O_1 O_2 l_1^2 \cos^2 \theta_1 - l_1 (2O_1 O_2^2 + L_1) \cos \theta_1 + L_1 O_1 O_2] \cos \theta_2 \\ & + (L_1^2 + 4O_1 O_2^2 l_1^2 \cos^2 \theta_1 - 4L_1 O_1 O_2 l_1 \cos \theta_1 - 4l_1^2 l_{31}^2 \sin^2 \theta_1) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Cette dernière équation est sous la forme :

$$A_1 X^2 + B_1 X + C_1 = 0$$

Avec :

$$A_1 = 4l_{31}^2 (O_1 O_2^2 + l_1^2 - 2O_1 O_2 l_1 \cos \theta_1) \quad (2.41)$$

$$B_1 = 4l_{31} [2O_1 O_2 l_1^2 \cos^2 \theta_1 - l_1 (2O_1 O_2^2 + L_1) \cos \theta_1 + L_1 O_1 O_2] \quad (2.42)$$

$$C_1 = 4l_1 [l_1 (O_1 O_2^2 + l_{31}^2) \cos^2 \theta_1 - L_1 O_1 O_2 \cos \theta_1 - l_1 l_{31}^2] + L_1^2 \quad (2.43)$$

$$X = \cos \theta_2 \quad (2.44)$$

Sous la forme canonique on aura :

$$\left(X + \frac{B_1}{2A_1} \right)^2 - \frac{B_1^2}{4A_1^2} + \frac{C_1}{A_1} = 0 \quad (2.45)$$

Ou bien :

$$\left(X + \frac{B_1}{2A_1} \right)^2 = \frac{B_1^2 - 4A_1 C_1}{4A_1^2} \quad (2.46)$$

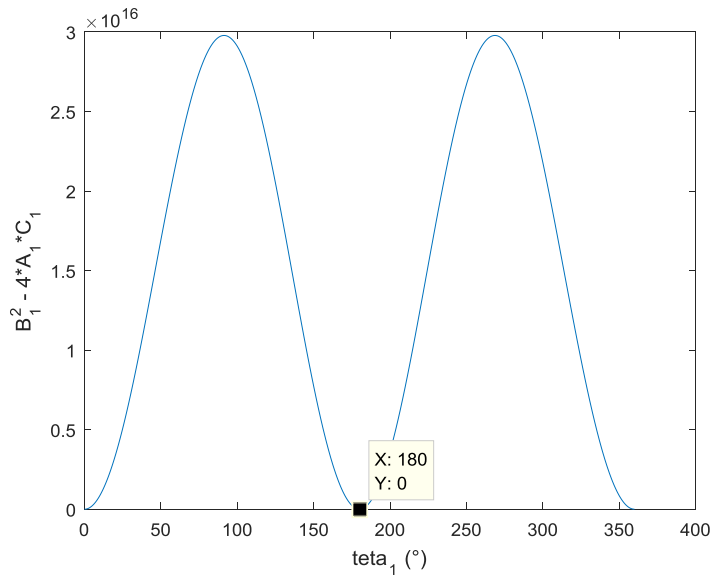


Fig. 2.2 – La variation de Δ_1 en fonction de θ_1

D'après cette dernière figure nous avons $\Delta_1 \geq 0$ ce qui permet d'avoir :

$$X = \pm \sqrt{\frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{C_1}{A_1} - \frac{B_1}{2A_1}} \tag{2.47}$$

Ou bien :

$$\cos\theta_2 = \pm \sqrt{\frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{C_1}{A_1} - \frac{B_1}{2A_1}} \tag{2.48}$$

Dans le cas où :

$$\cos\theta_{21} = \sqrt{\frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{C_1}{A_1} - \frac{B_1}{2A_1}} \tag{2.49}$$

On peut tracer la variation de θ_{21} en fonction de θ_1 , ce qui donne le graphe suivant :

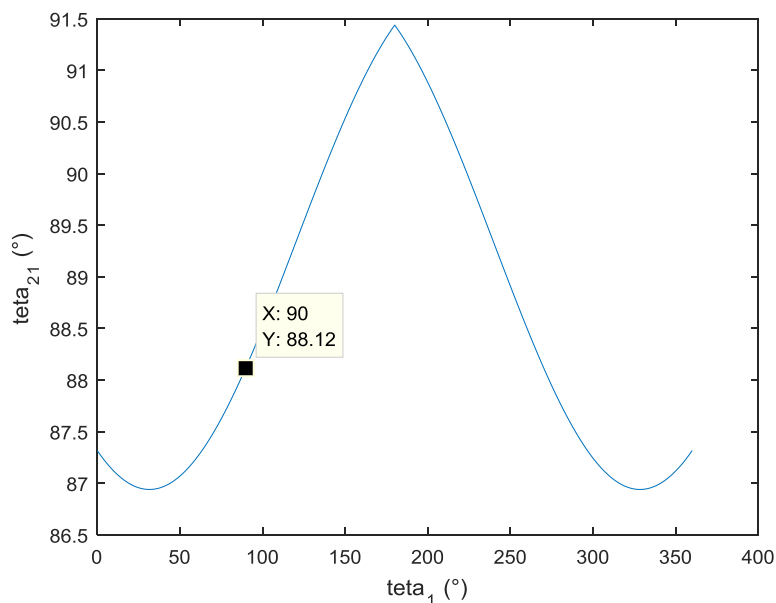


Fig. 2.3 – La variation de θ_{21} en fonction de θ_1

Et dans le cas où :

$$\cos\theta_{22} = -\sqrt{\frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{C_1}{A_1} - \frac{B_1}{2A_1}} \quad (2.50)$$

On peut aussi tracer la variation de θ_{22} en fonction de θ_1 dans ce cas, ce qui donne le graphe suivant :

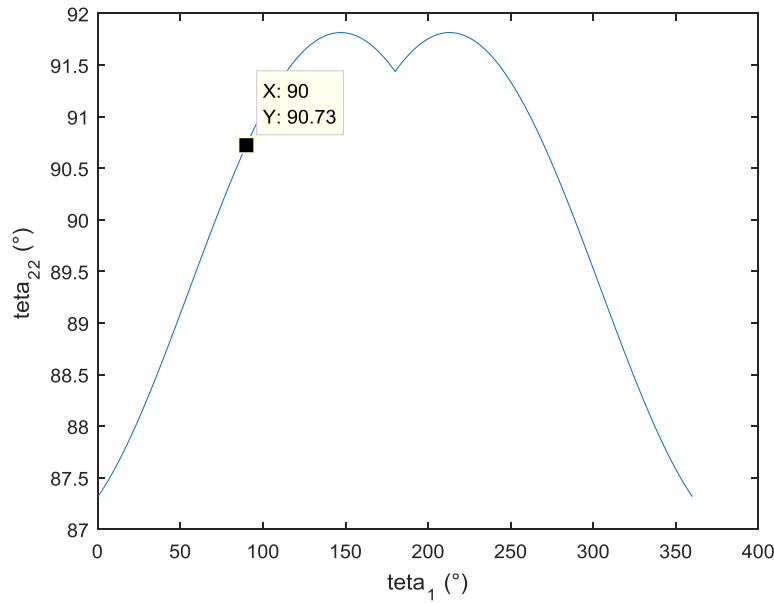


Fig. 2.4 – La variation de θ_{22} en fonction de θ_1

Pour $\theta_1 = 90^\circ$, nous avons $\theta_{21} = 88.12^\circ$ (**figure 2.3**) et $\theta_{22} = 90.73^\circ$ (**figure 2.4**) mais en utilisant la **figure 2.1** sur SolidWorks, l'angle θ_2 prend la valeur de 88.12° . Donc c'est le 1^{er} cas qui est valable où :

$$\cos\theta_2 = \sqrt{\frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{C_1}{A_1} - \frac{B_1}{2A_1}} \quad (2.51)$$

Et d'après la **figure 2.3** nous avons :

$$86.94^\circ \leq \theta_2 \leq 91.44^\circ \quad (2.52)$$

Où :

$$-0.02509 \leq \cos\theta_2 \leq 0.05339 \quad (2.53)$$

Donc les valeurs de $\sin\theta_2$ sont toujours positives, ainsi :

$$\sin\theta_2 = \sqrt{1 - \cos^2\theta_2} \quad (2.54)$$

De l'équation (2.31) on aura :

$$O_1 O_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \alpha_1 - l_{31} \left[\sqrt{\frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{C_1}{A_1} - \frac{B_1}{2A_1}} \right] \quad (2.55)$$

Ce qui permet d'avoir pour $\cos \alpha_1$:

$$\cos \alpha_1 = \frac{O_1 O_2 - l_1 \cos \theta_1}{l_2} + \frac{l_{31}}{l_2} \left[\sqrt{\frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{C_1}{A_1} - \frac{B_1}{2A_1}} \right] \quad (2.56)$$

La variation de α_1 en fonction de θ_1 donne le graphe suivant :

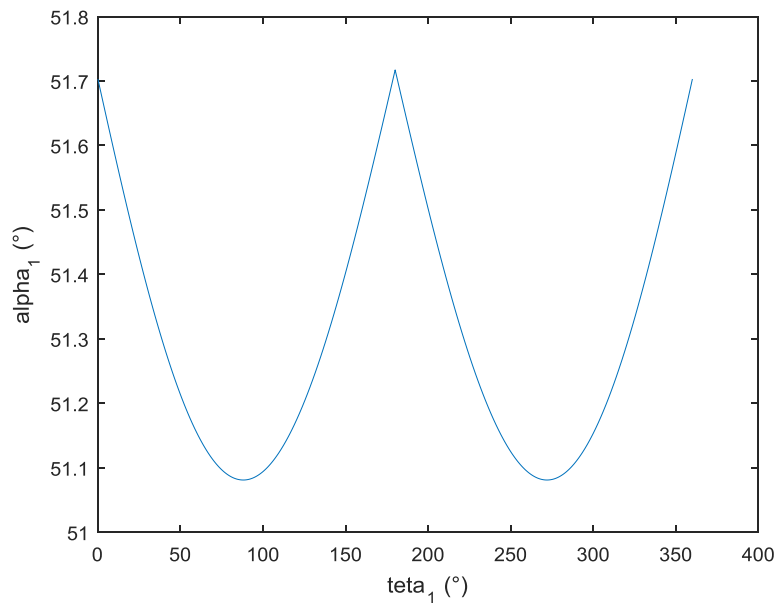


Fig. 2.5 – La variation de α_1 en fonction de θ_1

De cette dernière figure, nous avons :

$$51.08^\circ \leq \alpha_1 \leq 51.72^\circ \quad (2.57)$$

Où:

$$0.61950 \leq \cos \alpha_1 \leq 0.62823 \quad (2.58)$$

Donc les valeurs de $\sin \alpha_1$ sont toujours positives, ainsi :

$$\sin \alpha_1 = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_1} \quad (2.59)$$

- Détermination des expressions de $\cos \theta_3$ et $\cos \alpha_2$:

Pour cela on combine les deux équations (2.34) et (2.35) :

$$(l_4 \sin \alpha_2 = O_1 O_3 - l_1 \sin \theta_1 - l_{21} \sin \alpha_1 - l_5 \sin \theta_3)^2 \quad (2.60)$$

$$(l_4 \cos \alpha_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_{21} \cos \alpha_1 - l_5 \cos \theta_3)^2 \quad (2.61)$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} l_4^2 = O_1 O_3^2 + l_1^2 + l_{21}^2 + l_5^2 + 2l_{21} l_5 \sin \alpha_1 \sin \theta_3 + 2l_1 l_{21} \sin \alpha_1 \sin \theta_1 \\ + 2l_1 l_5 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - 2l_1 O_1 O_3 \sin \theta_1 - 2l_{21} O_1 O_3 \sin \alpha_1 \\ - 2l_5 O_1 O_3 \sin \theta_3 + 2l_1 l_{21} \cos \theta_1 \cos \alpha_1 - 2l_1 l_5 \cos \theta_1 \cos \theta_3 \\ - 2l_{21} l_5 \cos \alpha_1 \cos \theta_3 \end{aligned} \quad (2.62)$$

On note :

$$l_4^2 - O_1 O_3^2 - l_1^2 - l_{21}^2 - l_5^2 = L_2$$

Ainsi :

$$\begin{aligned} [L_2 + 2l_1 O_1 O_3 \sin \theta_1 - 2l_1 l_{21} \sin \alpha_1 \sin \theta_1 + 2l_{21} O_1 O_3 \sin \alpha_1 - 2l_1 l_{21} \cos \theta_1 \cos \alpha_1 \\ + 2l_1 l_5 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + 2l_{21} l_5 \cos \alpha_1 \cos \theta_3]^2 \\ = [2l_{21} l_5 \sin \alpha_1 \sin \theta_3 + 2l_1 l_5 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - 2l_5 O_1 O_3 \sin \theta_3]^2 \end{aligned} \quad (2.63)$$

En développant cette équation en mettant $\sin^2 \theta_3 = 1 - \cos^2 \theta_3$ et après simplification on aura une équation de second degré sous la forme :

$$A_2 X^2 + B_2 X + C_2 = 0$$

Avec :

$$\begin{aligned} A_2 = 4l_5^2 [l_1^2 + l_{21}^2 + O_1 O_3^2 + 2l_1 l_{21} (\cos \theta_1 \cos \alpha_1 + \sin \theta_1 \sin \alpha_1) \\ - 2O_1 O_3 (l_{21} \sin \alpha_1 + l_1 \sin \theta_1)] \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} B_2 = 8l_1 l_{21} l_5 \left[-l_1 \cos \alpha_1 \cos^2 \theta_1 + \frac{l_1}{l_{21}} (O_1 O_3 - l_{21} \sin \alpha_1) \cos \theta_1 \sin \theta_1 \right. \\ \left. + \left(\frac{L_2}{2l_{21}} + O_1 O_3 \sin \alpha_1 - l_{21} \cos^2 \alpha_1 \right) \cos \theta_1 \right. \\ \left. + (O_1 O_3 - l_{21} \sin \alpha_1) \cos \alpha_1 \sin \theta_1 + (L_2 + 2l_{21} O_1 O_3 \sin \alpha_1) \frac{\cos \alpha_1}{2l_1} \right] \end{aligned} \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned}
C_2 = 4 \left\{ & l_1^2 l_{21}^2 \cos^2 \theta_1 - l_1 l_{21} (L_2 + 2l_{21} O_1 O_3 \sin \alpha_1) \cos \alpha_1 \cos \theta_1 \right. \\
& + l_1^2 (O_1 O_3^2 - l_5^2 - 2l_{21} O_1 O_3 \sin \alpha_1 + l_{21}^2 \sin^2 \alpha_1) \sin^2 \theta_1 \\
& + l_1 \left[-2l_{21}^2 O_1 O_3 \sin^2 \alpha_1 + 2l_{21} \left(-\frac{L_2}{2} + O_1 O_3^2 - l_5^2 \right) \sin \alpha_1 \right. \\
& + L_2 O_1 O_3 + 2l_5^2 O_1 O_3 \left. \right] \sin \theta_1 \\
& + 2l_1^2 l_{21} (l_{21} \sin \alpha_1 - O_1 O_3) \cos \alpha_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \\
& + l_{21}^2 (O_1 O_3^2 - l_5^2) \sin^2 \alpha_1 + l_{21} O_1 O_3 (L_2 + 2l_5^2) \sin \alpha_1 + \frac{L_2^2}{4} \\
& \left. - l_5^2 O_1 O_3^2 \right\}
\end{aligned} \tag{2.66}$$

$$X = \cos \theta_3 \tag{2.67}$$

Sous la forme canonique on aura :

$$\left(X + \frac{B_2}{2A_2} \right)^2 - \frac{B_2^2}{4A_2^2} + \frac{C_2}{A_2} = 0 \tag{2.68}$$

Ou :

$$\left(X + \frac{B_2}{2A_2} \right)^2 = \frac{B_2^2 - 4A_2 C_2}{4A_2^2} \tag{2.69}$$

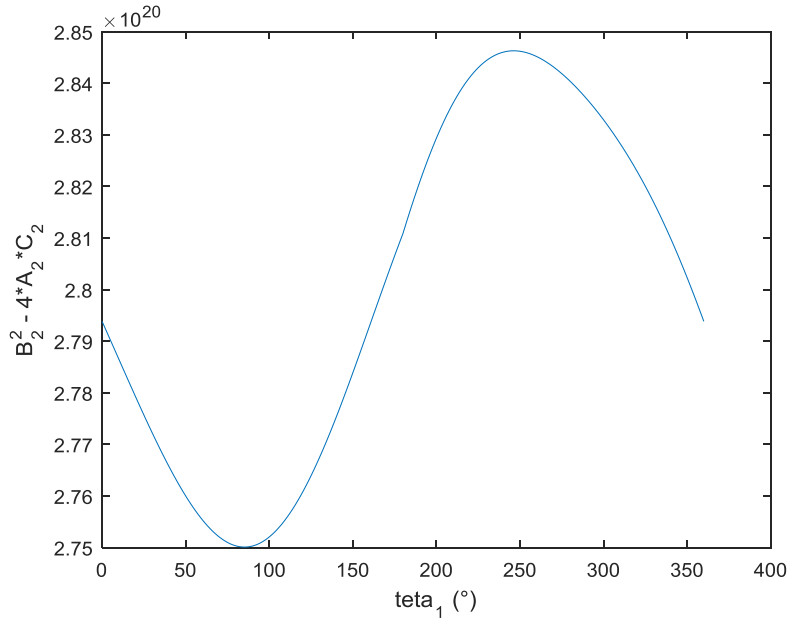


Fig. 2.6 – La variation de Δ_2 en fonction de θ_1

D'après cette dernière figure nous avons $\Delta_2 \geq 0$ ce qui permet d'avoir :

$$X = \pm \sqrt{\frac{B_2^2}{4A_2^2} - \frac{C_2}{A_2}} - \frac{B_2}{2A_2} \tag{2.70}$$

Ou bien :

$$\cos\theta_3 = \pm \sqrt{\frac{B_2^2}{4A_2^2} - \frac{C_2}{A_2} - \frac{B_2}{2A_2}} \quad (2.71)$$

Dans le cas où :

$$\cos\theta_{31} = \sqrt{\frac{B_2^2}{4A_2^2} - \frac{C_2}{A_2} - \frac{B_2}{2A_2}} \quad (2.72)$$

On peut tracer la variation de θ_{31} en fonction de θ_1 , ce qui donne le graphe suivant :

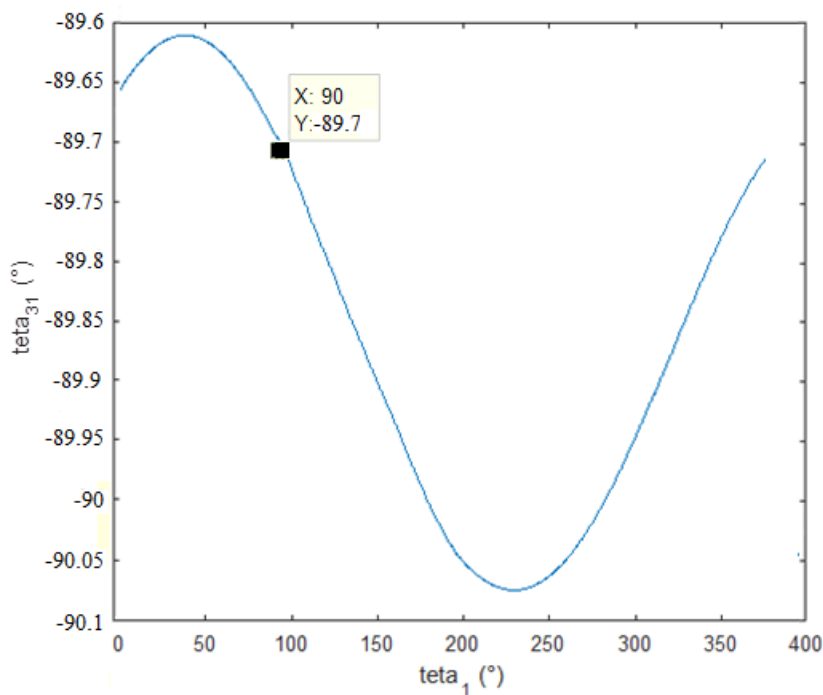
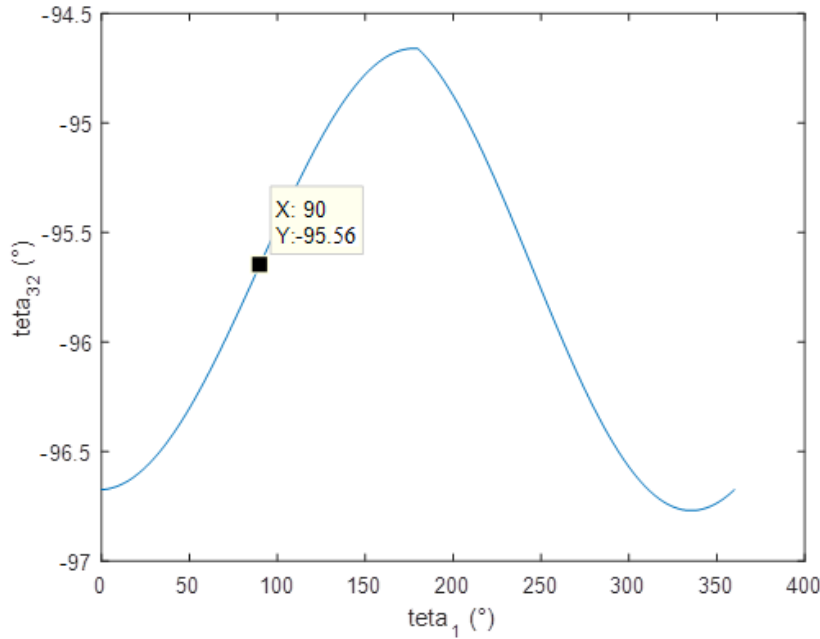


Fig. 2.7 – La variation de θ_{31} en fonction de θ_1

Et dans le cas où :

$$\cos\theta_{32} = -\sqrt{\frac{B_2^2}{4A_2^2} - \frac{C_2}{A_2} - \frac{B_2}{2A_2}} \quad (2.73)$$

On peut aussi tracer la variation de $\cos\theta_{32}$ en fonction de θ_1 dans ce cas, ce qui donne le graphe suivant :

Fig. 2.8 – La variation de θ_{32} en fonction de θ_1

Pour $\theta_1 = 90^\circ$, nous avons $\theta_{31} = -89.70^\circ$ (**figure 2.7**) et $\theta_{32} = -95.56^\circ$ (**figure 2.8**) mais en utilisant la **figure 2.1** sur SolidWorks, l'angle θ_3 prend la valeur de -89.76° . Donc c'est le 1^{er} cas qui est valable où :

$$\cos\theta_3 = \sqrt{\frac{B_2^2}{4A_2^2} - \frac{C_2}{A_2} - \frac{B_2}{2A_2}} \quad (2.74)$$

Et d'après la **figure 2.7** nous avons :

$$-90.08^\circ \leq \theta_3 \leq -89.61^\circ \quad (2.75)$$

Ce qui permet d'avoir pour θ_3 :

$$-0.00149 \leq \cos\theta_3 \leq 0.00681 \quad (2.76)$$

Donc les valeurs de $\sin\theta_3$ sont toujours négatives, ainsi :

$$\sin\theta_3 = -\sqrt{1 - \cos^2\theta_3} \quad (2.77)$$

De l'équation (2.35) on aura :

$$\cos\alpha_2 = \frac{l_1}{l_4} \cos\theta_1 + \frac{l_{21}}{l_4} \left\{ \frac{O_1 O_2 - l_1 \cos\theta_1}{l_2} + \frac{l_{31}}{l_2} \left[\sqrt{\frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{C_1}{A_1} - \frac{B_1}{2A_1}} \right] \right\} - \frac{l_5}{l_4} \left[\sqrt{\frac{B_2^2}{4A_2^2} - \frac{C_2}{A_2} - \frac{B_2}{2A_2}} \right] \quad (2.78)$$

La variation de α_2 en fonction de θ_1 donne le graphe suivant :

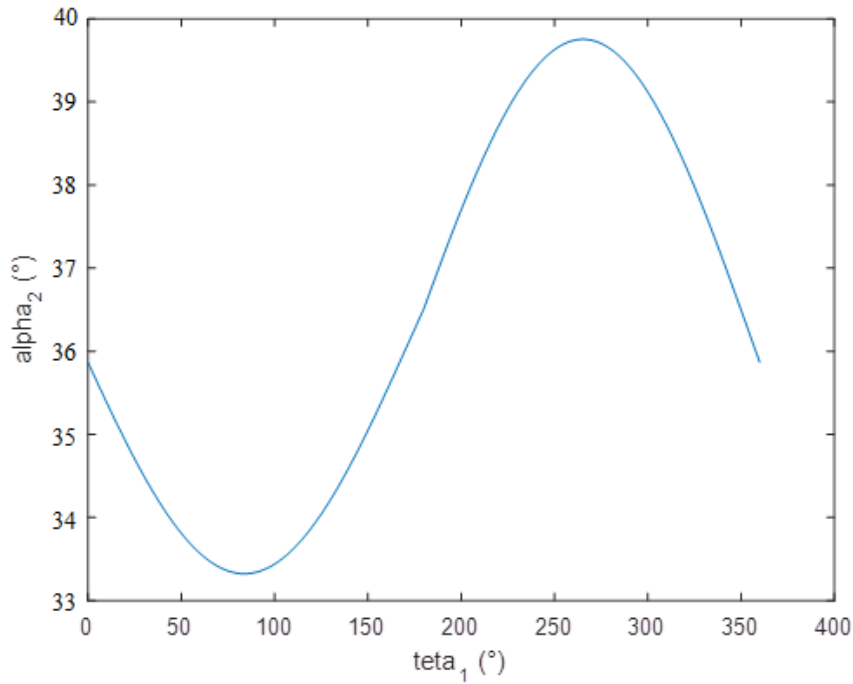


Fig. 2.9 – La variation de α_2 en fonction de θ_1

De cette figure, nous avons :

$$0.7731 \leq \cos \alpha_2 \leq 0.8354 \quad (2.79)$$

Ce qui donne :

$$33.34^\circ \leq \alpha_2 \leq 39.37^\circ \quad (2.80)$$

Donc les valeurs de $\sin \alpha_2$ sont toujours positives, ainsi :

$$\sin \alpha_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_2} \quad (2.81)$$

- Détermination des expressions de ω_2 et ω_3 :

Pour cela on utilise les deux équations (2.14) et (2.15), ainsi :

$$\omega_1 l_1 \sin \theta_1 + \omega_2 l_2 \sin \alpha_1 = \omega_3 l_{31} \sin \theta_2 \quad X \cos \alpha_1 \quad (2.14)$$

$$\omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_2 \cos \alpha_1 = \omega_3 l_{31} \cos \theta_2 \quad X \sin \alpha_1 \quad (2.15)$$

Ce qui donne :

$$\omega_1 l_1 (\sin \theta_1 \cos \alpha_1 - \cos \theta_1 \sin \alpha_1) = \omega_3 l_{31} (\sin \theta_2 \cos \alpha_1 - \cos \theta_2 \sin \alpha_1) \quad (2.82)$$

Et ce qui permet d'avoir pour ω_3 :

$$\omega_3 = \frac{l_1}{l_{31}} \cdot \frac{\sin \theta_1 \cos \alpha_1 - \cos \theta_1 \sin \alpha_1}{\sin \theta_2 \cos \alpha_1 - \cos \theta_2 \sin \alpha_1} \omega_1 \quad (2.83)$$

Et de (2.14) on aura pour ω_2 l'expression suivante :

$$\omega_2 = \omega_3 \frac{l_{31} \sin \theta_2}{l_2 \sin \alpha_1} - \omega_1 \frac{l_1 \sin \theta_1}{l_2 \sin \alpha_1} \quad (2.84)$$

En remplaçant (2.83) dans (2.84) on aura :

$$\omega_2 = \left[\frac{l_1}{l_{31}} \cdot \frac{\sin \theta_1 \cos \alpha_1 - \cos \theta_1 \sin \alpha_1}{\sin \theta_2 \cos \alpha_1 - \cos \theta_2 \sin \alpha_1} - \frac{l_1 \sin \theta_1}{l_2 \sin \alpha_1} \right] \omega_1 \quad (2.85)$$

- Détermination des expressions de ω_4 et ω_5 :

Pour cela on utilise les deux équations (2.28) et (2.29), ainsi :

$$\omega_5 l_5 \sin \theta_3 = -\omega_1 l_1 \sin \theta_1 - \omega_2 l_{21} \sin \alpha_1 - \omega_4 l_4 \sin \alpha_2 \quad X \cos \alpha_2 \quad (2.28)$$

$$\omega_5 l_5 \cos \theta_3 = \omega_1 l_1 \cos \theta_1 + \omega_2 l_{21} \cos \alpha_1 - \omega_4 l_4 \cos \alpha_2 \quad X - \sin \alpha_2 \quad (2.29)$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \omega_5 l_5 (\sin \theta_3 \cos \alpha_2 - \cos \theta_3 \sin \alpha_2) \\ = -\omega_1 l_1 (\sin \theta_1 \cos \alpha_2 - \cos \theta_1 \sin \alpha_2) - \omega_2 l_{21} (\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ + \cos \alpha_1 \sin \alpha_2) \end{aligned} \quad (2.86)$$

Et ce qui permet d'avoir pour ω_5 :

$$\omega_5 = \frac{-\omega_1 l_1 (\sin \theta_1 \cos \alpha_2 - \cos \theta_1 \sin \alpha_2) - \omega_2 l_{21} (\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \alpha_1 \sin \alpha_2)}{l_5 (\sin \theta_3 \cos \alpha_2 - \cos \theta_3 \sin \alpha_2)} \quad (2.87)$$

En remplaçant (2.85) dans (2.87) on aura l'expression (2.88) suivante :

$$\begin{aligned} \omega_5 \\ = - \frac{l_1 (\sin \theta_1 \cos \alpha_2 - \cos \theta_1 \sin \alpha_2) + \left[\frac{l_1}{l_{31}} \cdot \frac{\sin \theta_1 \cos \alpha_1 - \cos \theta_1 \sin \alpha_1}{\sin \theta_2 \cos \alpha_1 - \cos \theta_2 \sin \alpha_1} - \frac{l_1 \sin \theta_1}{l_2 \sin \alpha_1} \right] l_{21} (\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \alpha_1 \sin \alpha_2)}{l_5 (\sin \theta_3 \cos \alpha_2 - \cos \theta_3 \sin \alpha_2)} \omega_1 \end{aligned}$$

De (3.28) on aura pour ω_4 l'expression suivante :

$$\omega_4 = \frac{1}{l_4 \sin \alpha_2} [-\omega_1 l_1 \sin \theta_1 - \omega_2 l_{21} \sin \alpha_1 - \omega_5 l_5 \sin \theta_3] \quad (2.89)$$

Remarques et interprétation

- On voit sur les figures 2.3 et 2.5, qu'il existe éventuellement un point de singularité pour $\theta_1 = 180^\circ$. En prenant un pas de variation de 10^{-4}° et on trace les deux variations quand $179.9995^\circ \leq \theta_1 \leq 180.0005^\circ$ (**figure 2.10 et 2.11**) on trouve qu'il y a une asymptote horizontale à $\theta_1 = 180^\circ$ ce qui permet d'éliminer l'existence du point de singularité. Malgré ça, à $\theta_1 = 180^\circ$ la variation est brusque, ce qui pourra provoquer des chocs et par conséquent le bruit, ce qui explique l'utilisation des silentblochs au niveau des articulations pour le système bielle-manivelle.

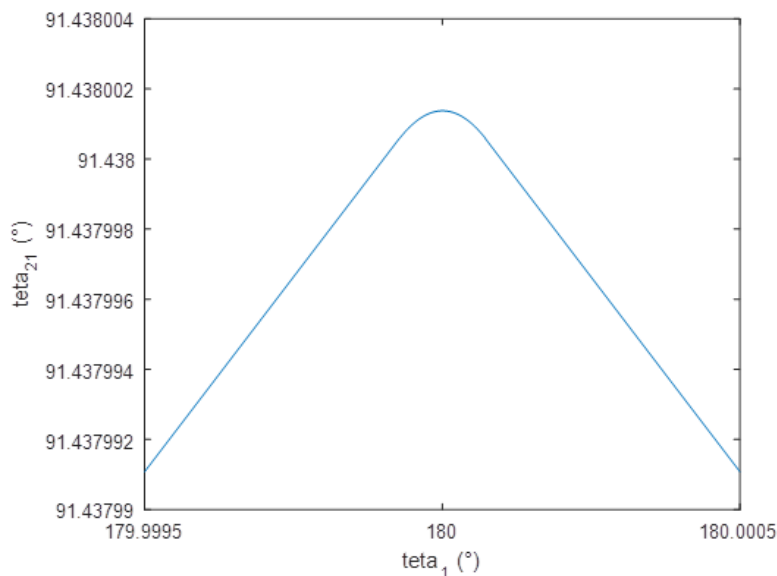


Fig. 2.10 – La variation de θ_{21} en fonction de θ_1 pour un pas de 10^{-4}°

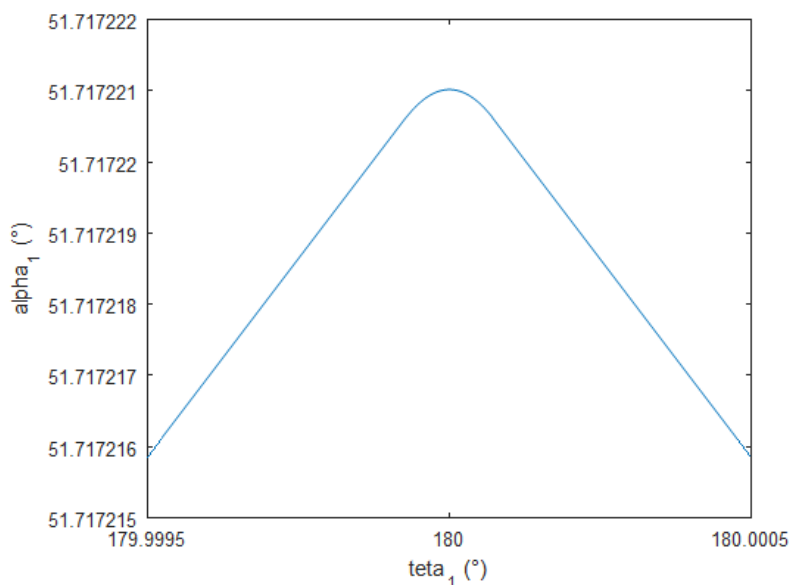


Fig. 2.11 – La variation de α_1 en fonction de θ_1 pour un pas de 10^{-4}°

- Notre étude semble correcte et on peut utiliser le logiciel SolidWorks pour vérifier les valeurs particulières de θ_2 et θ_3 quand $\theta_1 = 90^\circ$, ce qui illustre la figure suivante :

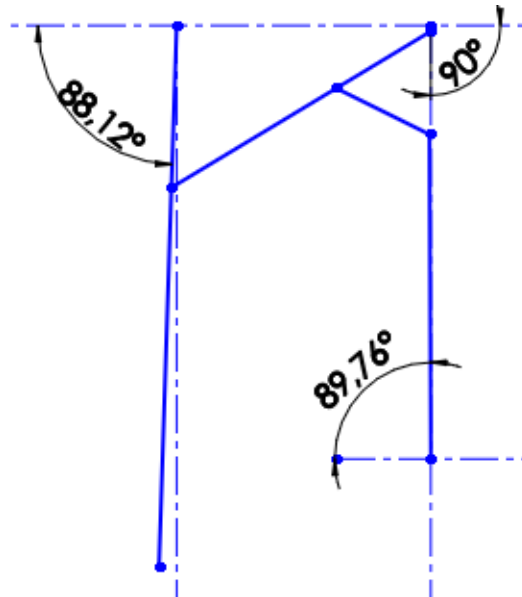


Fig. 2.12 – Vérification des valeurs particulières de θ_2 et θ_3 quand $\theta_1 = 90^\circ$ sur SolidWorks

On remarque bien que lorsque $\theta_1 = 90^\circ$, nous avons $\theta_2 = 88.12^\circ$ et $\theta_3 = -89.76^\circ$.

- Les expressions obtenues pour ω_3 et ω_5 en fonction de ω_1 sont très complexes en incluant des relations implicites.

2.2 Détermination de l'angle optimum d'inclinaison du soc

La qualité du processus technologique dans les machines de récolte de pomme de terre est en grande partie déterminée par le travail des socs, dont le paramètre fondamental est leur angle d'inclinaison α (figure 2.13).

L'arrachage dépend des forces de résistance opposées au mouvement du sol le long du soc de la machine.

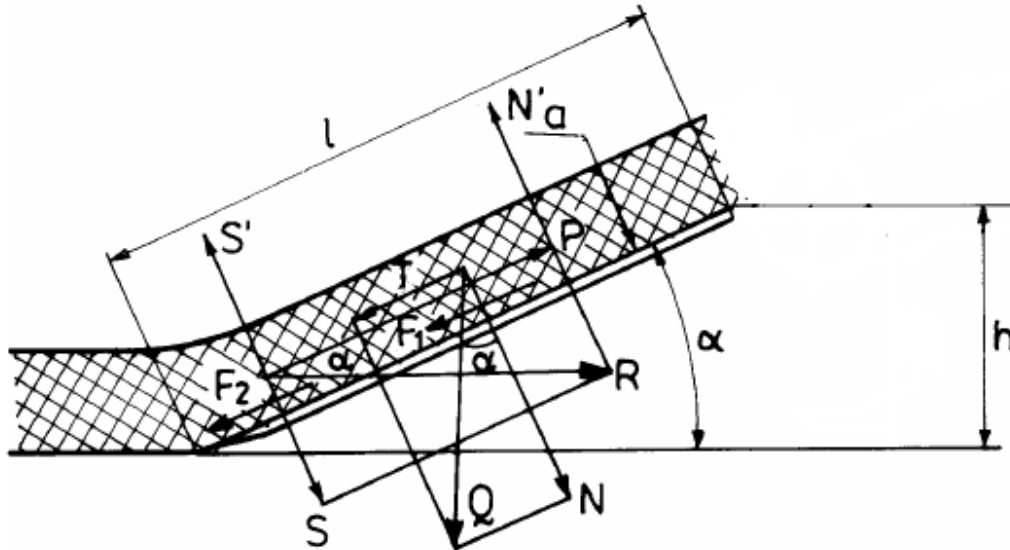


Fig. 2.13 – Schéma du système de forces agissant sur le soc de la machine [4]

La couche du sol se déplace sur le soc à une vitesse constante donnée par :

$$V_s = \frac{V_M}{\cos \alpha} \quad (2.90)$$

Où V_M est la vitesse de la machine (soc).

Pour un mouvement uniforme de la machine, les forces qui agissent sur le soc sont (figure 2.13) :

- Q : le poids de la couche du sol, avec $\vec{Q} = \vec{N} + \vec{T}$.
- R : la force d'appui du côté du sol, avec $\vec{R} = \vec{S} + \vec{P}$.

Les composantes S et N provoquent des forces de friction entre la couche du sol dégagée et le soc, données par :

$$F_1 = N \cdot f \quad , \quad F_2 = S \cdot f \quad (2.91)$$

Où f est le coefficient de frottement du sol avec le soc. Dans le cas du frottement du sol avec une surface métallique le coefficient f est compris entre **0.3** et **1.0** [4].

Si on considère que la hauteur du soc h est constante, la diminution de l'angle d'inclinaison α engendre l'augmentation de la longueur du soc est par conséquent l'augmentation du

pois du sol Q et les forces T et F_1 . Par contre l'augmentation de l'angle α engendre l'augmentation de la force de frottement F_2 , c'est-à-dire qu'il a une valeur optimale de cet angle pour laquelle la force d'appui P de la couche du sol dégagée qui agit le long du soc a une valeur minimale.

Pour la détermination de l'angle optimal α_{opt} , on applique l'équation d'équilibre des forces agissant sur le soc :

$$\vec{Q} + \vec{R} + \vec{F}_3 = 0 \quad (2.92)$$

Après décomposition des forces Q et R on aura :

$$(\vec{T} + \vec{N}) + (\vec{P} + \vec{S}) + \vec{F}_3 = 0 \quad (2.93)$$

La projection sur le plan du soc donne :

$$-T - f \cdot N - f \cdot S + P - F_3 = 0 \quad (2.94)$$

Où :

$$S = P \cdot \tan \alpha, \quad N = Q \cdot \cos \alpha, \quad T = Q \cdot \sin \alpha \quad (2.95)$$

Et F_3 est la force de friction dynamique donnée par [4]:

$$F_3 = a \cdot B \cdot V_M^2 \cdot \rho \cdot f \cdot \cos \alpha \quad (2.96)$$

Où :

- a : l'épaisseur de la couche du sol sur le soc.
- B : largeur de la couche du sol (largeur du soc).
- ρ : masse volumique du sol,

$$\rho = 1200 \div 1700 \text{ kg/m}^3$$

La somme des forces de résistance doit être inférieure à la force P pour assurer l'arrachage du sol (pomme de terre+terre) (**figure 2.14**).

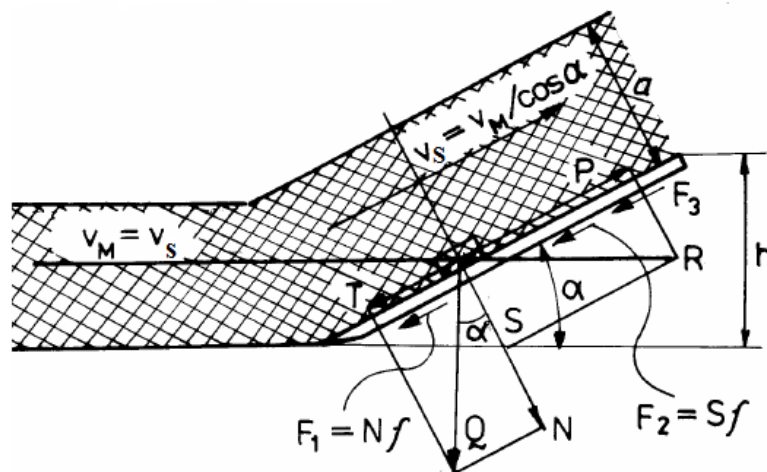


Fig. 2.14 – Schéma du système de forces agissant sur le soc de la machine, en tenant compte de la force de friction dynamique F_3 et de la vitesse de la machine V_M [4]

En substituant l'équation (2.95) dans (2.94) on aura :

$$P = \frac{Q (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + F_3}{1 - f \cdot \tan \alpha} \quad (2.97)$$

Trouvons maintenant l'expression du poids du sol. D'après la **figure 2.12** nous avons :

$$l \cdot \sin \alpha = h \quad (2.98)$$

Ainsi :

$$l = \frac{h}{\sin \alpha} \quad (2.99)$$

Pour une masse M , Le poids du sol Q est donné par :

$$Q = M \cdot g \quad (2.100)$$

Avec :

$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot (l \cdot a \cdot B) \quad (2.101)$$

Où V est le volume du sol dégagé.

En substituant les équations (2.99) et (2.101) dans (2.100) nous aurons :

$$Q = \rho \cdot (l \cdot a \cdot B) \cdot g = \frac{a \cdot B \cdot h}{\sin \alpha} \rho \cdot g \quad (2.102)$$

En remplaçant l'équation (2.102) dans (2.97) on aura :

$$P = a \cdot B \cdot h \cdot \rho \cdot g \frac{(f + \tan \alpha) + \frac{F_3 \tan \alpha}{a \cdot B \cdot h \cdot \rho \cdot g}}{(1 - f \cdot \tan \alpha) \tan \alpha} \quad (2.103)$$

En tenant compte de l'expression de la force F_3 , cette dernière équation devient :

$$P = a \cdot B \cdot \rho \cdot \left[h \cdot g \cdot \frac{(f + \tan \alpha)}{(1 - f \cdot \tan \alpha) \tan \alpha} + V_M^2 \frac{f \cdot \sin \alpha}{(1 - f \cdot \tan \alpha) \tan \alpha} \right] \quad (2.104)$$

Cette équation montre bien qu'au repos, c'est-à-dire $V_M = 0$, il n'y a que la force de friction dû au poids du sol dégagé qui est appliquée sur le soc.

Dans notre cas : $a = 0.200 \text{ m}$, $B = 0.418 \text{ m}$, $h = 0.075 \text{ m}$ et si on prend $\rho = 1450 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $f = 0.65$ et $V_M = 1 \text{ m/s}$ la variation de la force P en fonction de l'angle α est donnée par la (**figure 2.15**) suivante :

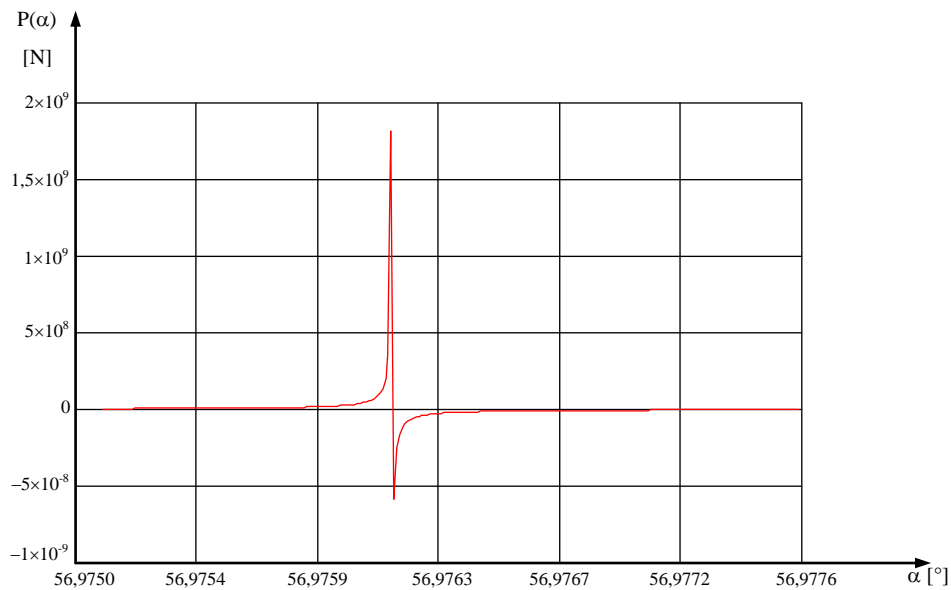


Fig. 2.15 – La variation de la force d'appui P en fonction de l'angle d'inclinaison α

Cette courbe montre qu'il y a un angle $\alpha_{critique} = 56.976^\circ$ où la force d'appui P devient négative, ça pourrait être expliqué physiquement par le fait que les mottes se détachent du soc. Cette valeur critique pourrait être déterminée directement de l'équation (2.97) en annulant le dénominateur, ainsi :

$$1 - f \cdot \tan \alpha = 0 \quad (2.105)$$

Ce qui donne :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1}{f}\right) = \arctan\left(\frac{1}{0.65}\right) = 56.976^\circ \quad (2.106)$$

Cet angle doit être évité et on s'intéresse juste à l'intervalle qui le précède.

En traçant la courbe de variation de la force d'appui P dans l'intervalle $\alpha \in]0^\circ ; 56.976^\circ[$ on obtient la **figure 2.16** :

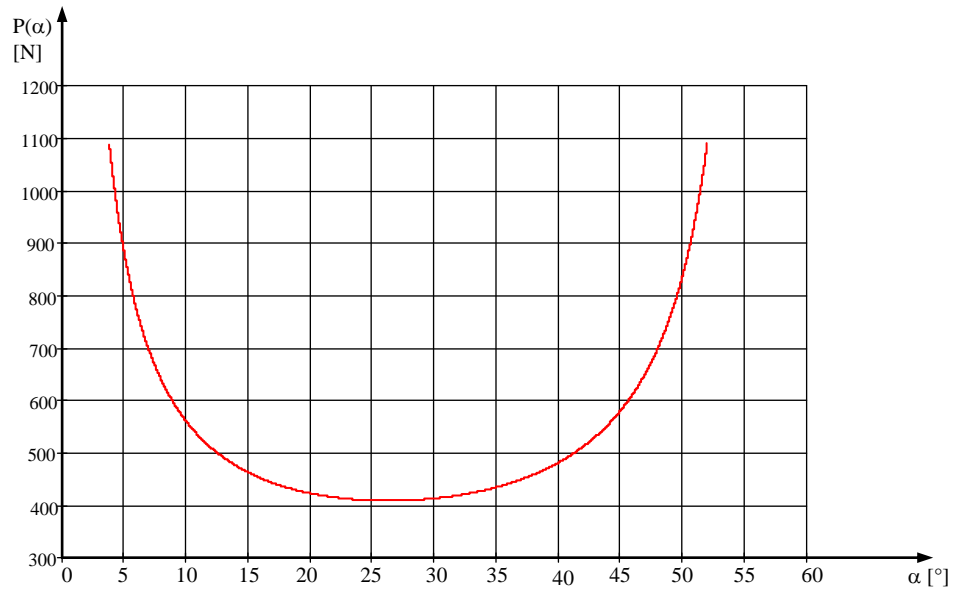


Fig. 2.16 – La variation de la force d'appui P en fonction de l'angle d'inclinaison α dans l'intervalle $]0^\circ ; \alpha_{critique}[$

Cette figure montre bien qu'il y a une valeur optimale α_{opt} où la force d'appui P est minimale, pour la déterminer on peut tracer la courbe de la dérivée P' et on trouve la valeur de α qui l'annule (figure 2.17).

De la figure 2.17 l'angle optimal est $\alpha_{opt} = 26,300^\circ$ qui correspond à une force d'appui minimale $P(\alpha_{opt}) \cong 408,3 N$

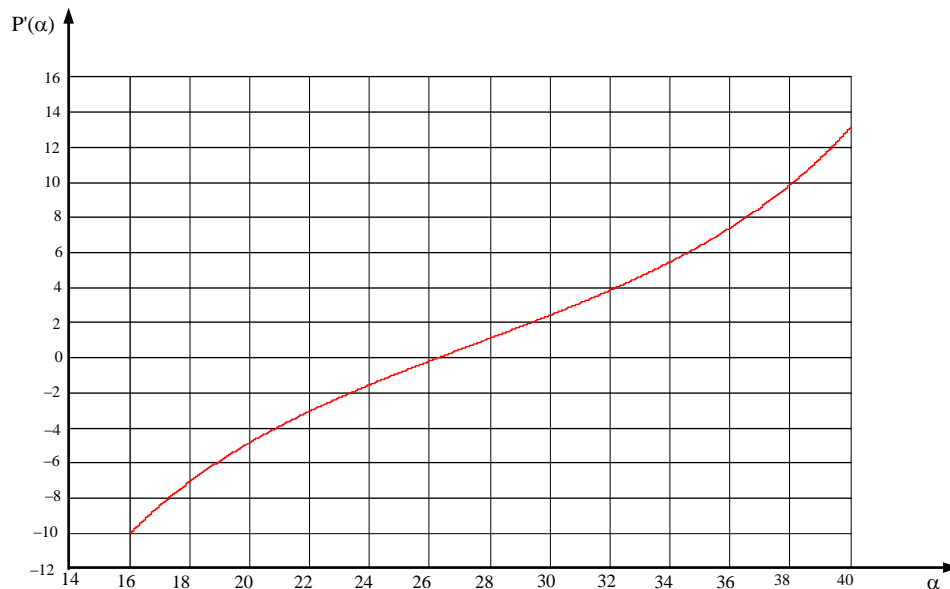


Fig. 2.17 – La variation de la dérivée P' en fonction de l'angle d'inclinaison α

2.3 Dimensionnement du mécanisme de renvoi d'angle (engrenages)

Dans le cas de notre machine, la transmission du mouvement du cardan au système bielle manivelle se fait par un couple d'engrenage conique (renvoi d'angle) dont le rapport de transmission est de 1. La puissance nécessaire pour le fonctionnement est de 30000 W avec une vitesse de rotation de 400 tr/min.

2.3.1 Calcul du module moyen

Il est donné par la relation suivante :

$$m_{moy} = 2.34 \sqrt{\frac{T}{k \cdot \sigma_p}} \quad (2.107)$$

De la puissance nous avons :

$$P = C \cdot \omega = T \cdot r_{moy} \cdot \omega \rightarrow T = \frac{P}{r_{moy} \cdot \omega} \quad (2.108)$$

Avec :

$$r_{moy} = \frac{m_{moy} \cdot Z}{2} \quad (2.109)$$

Ce qui donne pour l'effort tangentiel :

$$T = \frac{2P}{m_{moy} \cdot Z \cdot \omega} \quad (2.110)$$

En remplaçant dans l'équation (2.107) on aura :

$$m_{moy}^2 = (2.34)^2 \cdot \frac{T}{k \cdot \sigma_p} = (2.34)^2 \cdot \frac{2P}{k \cdot \sigma_p \cdot m_{moy} \cdot Z \cdot \omega} \quad (2.111)$$

Ainsi :

$$m_{moy}^3 = (2.34)^2 \cdot \frac{2P}{k \cdot \sigma_p \cdot Z \cdot \omega} \quad (2.112)$$

Ce qui donne pour le module moyen :

$$m_{moy} = 10 \cdot \sqrt[3]{(2.34)^2 \cdot \frac{2P}{k \cdot \sigma_p \cdot Z \cdot \omega}} \quad (2.113)$$

2.3.2 Calcul du module au gros bout

On désigne par (1) le pignon moteur et (2) le pignon récepteur.

Nous avons :

$$r = r_{moy} + \frac{b}{2} \sin \delta_1 \quad (2.114)$$

b étant la largeur de denture et δ le demi-angle au sommet du cône primitif.

Nous avons aussi :

$$r = \frac{m \cdot Z}{2} \quad (2.115)$$

$$b = k \cdot m \quad (2.116)$$

En remplaçant (2.115) et (2.116) dans (2.114) on aura :

$$\frac{m \cdot Z}{2} - \frac{k \cdot m}{2} \sin \delta_1 = r_{moy} \quad (2.117)$$

Ainsi :

$$m \cdot \left(\frac{Z}{2} - \frac{k}{2} \sin \delta_1 \right) = r_{moy} \quad (2.118)$$

Ce qui donne pour le module m :

$$m = \frac{2 \cdot r_{moy}}{Z \cdot k \sin \delta_1} \quad (2.119)$$

En calculant ce module, on peut avoir par la suite le module normalisé m_n .

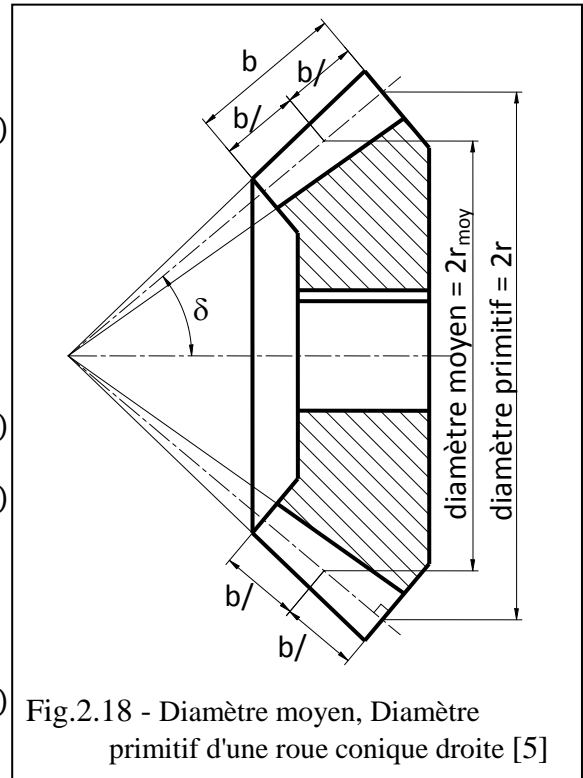
2.3.3 Calcul des angles primitifs :

Dans notre cas les engrenages coniques sont à axes orthogonaux, ainsi :

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\sin \delta_1}{\cos \delta_1} = \tan \delta_1 = 1 \quad (2.120)$$

Ce qui donne :

$$\delta_1 = \delta_2 = 45^\circ \quad (2.121)$$



2.3.4 Calcul des diamètres primitifs :

Comme le rapport de transmission est 1, le nombre de dents des deux pignons est identique, ainsi :

$$Z = Z_1 = Z_2 \quad (2.122)$$

Ce qui donne pour les diamètres primitifs :

$$d_1 = d_2 = d = m_n \cdot Z \quad (2.123)$$

2.3.5 Calcul numérique :

Pour la fabrication du renvoi d'angle, on choisit l'acier 30CrMo12 comme matériau dont la limite d'élasticité est de 850 MPa. Le tableau 2.1 suivant résume le calcul numérique des différents paramètres :

Tableau. 2.1 – Les données nécessaires pour le calcul d'engrenage

Données	
Puissance à transmettre P (W)	30000
Vitesse de rotation du pignon moteur N_1 (tr/min)	400
Rapport de transmission r	1
Limite d'élasticité du matériau 30CrMo12 σ_e (MPa)	850
Coefficient de largeur de denture k	5
Nombre de dents Z	19
Coefficient de sécurité s	1.5

Tableau. 2.2 – Le calcul des différents paramètres d'engrenage

Calculs	
Contrainte pratique $\sigma_p = \frac{\sigma_e}{s}$ (MPa)	566.667
Vitesse de rotation angulaire $\omega = \frac{\pi \cdot N_1}{30}$ (rad/s)	41.888
Module moyen m_{moy} (mm)	5.262
Rayon moyen r_{moy} (mm)	49.989
Module au gros bout m (mm)	6.465
Module normalisé m_n (mm)	6.500
Diamètre primitif d (mm)	123.500
Largeur de denture $b = k \cdot m$ (mm)	32.325

Chapitre 3

**Conception de la machine sur un
logiciel de CAO et réalisation d'un
prototype**

3.1 Introduction

Ce chapitre comporte la phase de conception et la réalisation d'un prototype à l'échelle 1 :3 de l'arracheuse de pomme de terre en se basant sur le modèle italien disponible sur le marché algérien (Checchi & Magli SP50V). Les dimensions réduites et le caractère pratique de cette machine, lui permettent de déterrer les pommes de terre et les tubercules. Elle peut être aussi utilisée sur les terrains sableux. Elle est équipée de disques et d'un soc vibrant qui en facilite la pénétration dans le terrain. Après avoir réalisé un premier tri, elle convoie le produit vers le tamis qui le sépare par secouement et élimine les mauvaises herbes.

Les principales caractéristiques de la machine sont données dans le tableau suivant :

Tableau. 3.1 – Les principales caractéristiques de l'arracheuse

Efficacités (ha/h)	0.25
Vitesse de travail (m/s)	1
Dimensions de la machine (cm)	151.0 X 94.7 X 127.2
Puissance du tracteur (kW)	30
Poids de la machine (kg)	234

Les différents composants de la machine sont illustrés dans la figure suivante :

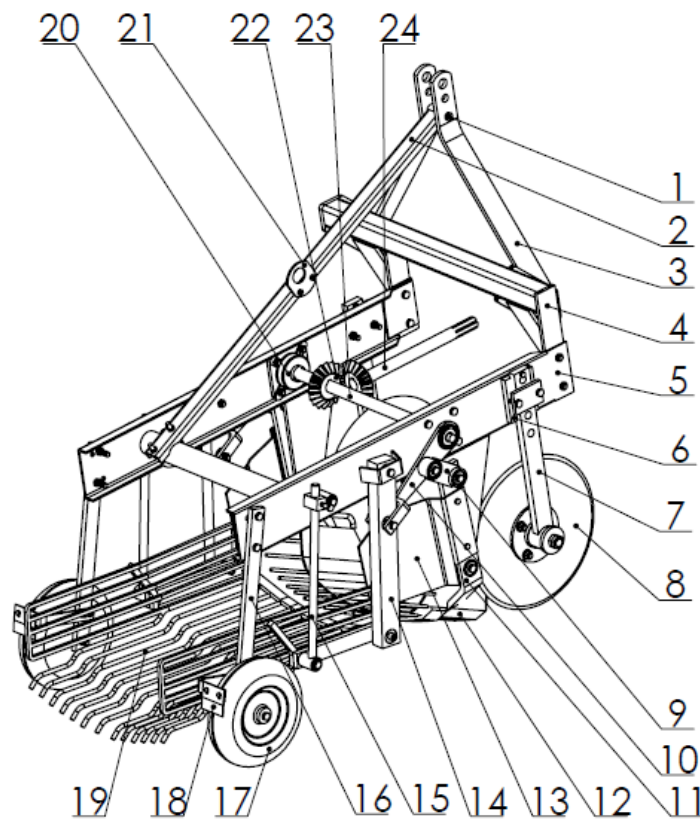


Fig. 3.1 – Vue en perspective de la machine en illustrant ses différents composants

La nomenclature des différents composants est donnée dans le tableau suivant :

Tableau. 3.2 – Les principaux composants de l'arracheuse

Numéro de la pièce	Désignation	Quantité	Matière
1	Axe pour attelage	1	A60
2	Barre de levage	1	A60
3	Elément d'attelage	1	A60
4	Traverse	1	E26
5	Châssis	2	E26
6	Glissière de guidage	2	E26
7	Bras de disque	2	E26
8	Disque	2	Acier au bore TBL
9	Bielle 2	2	A60
10	Bielle 1	2	A60
11	Support soc	2	E26
12	Soc	1	Acier au bore TBL
13	Collecteur	2	Acier au bore TBL
14	Barre de transmission	2	A60
15	Régulateur de niveau	2	E26
16	Support roue	2	A60
17	Roue	2	Acier avec revêtement en caoutchouc
18	Racleur	2	E26
19	Tamis de pomme de terre	1	Acier au bore TBL
20	Palier lisse	2	/
21	Anneau de levage	1	E26
22	Engrenage conique	2	Acier 30CD12
23	Arbre récepteur	1	XC48
24	Arbre de prise de mouvement	1	XC48

3.2 Le châssis

C'est la structure de base de la machine. Il est composé de deux longerons en acier E26, parallèles et attachés par un tube épais. Chaque longeron comporte plusieurs perçages qui permettent l'assemblage des autres composants de la machine. En avant, une traverse est attachée au châssis qui sert à la fixation de l'attelage à trois points auquel est fixée la barre de levage utilisée pour soulever la machine.

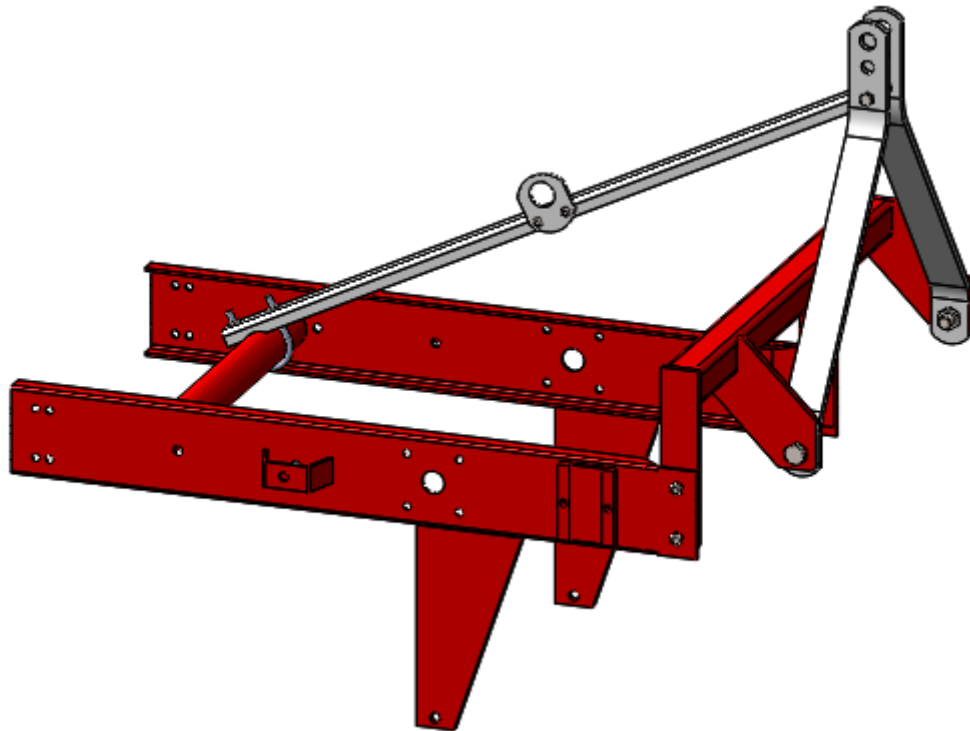








Fig. 3.2 – Vue en perspective du châssis sur SolidWorks

Le tableau suivant décrit la réalisation des différents composants du châssis du prototype :

Tableau. 3.3 – Désignations des différents composants du châssis

Désignation	Illustration	Dimensions	Méthode de fabrication
Longeron		Longeron de dimensions $367 \times 47 \times 10$ avec une épaisseur de 3 mm.	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - Pliage - Soudage

<p>Glissière</p>		<p>Une barre 40 × 30 × 10</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Fraisage - Perçage - Soudage
<p>Support de la barre de transmission</p>		<p>Une tôle 56 × 13.5 × 2</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - Pliage - Soudage
<p>Traverse</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Un tube carré 20 × 20 × 272 - Une tôle 93 × 20 × 3 - Une tôle 70 × 70 × 4 	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - Soudage
<p>Élément d'attelage</p>		<p>Une tôle 239 × 20 × 4</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - Pliage
<p>Barre de levage</p>		<ul style="list-style-type: none"> - longeron de dimensions 383.5 × 17 × 8 Avec une épaisseur de 2 mm. - Une tôle 31 × 31 × 2 - fer rond de diamètre 10mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - Soudage

La figure suivante illustre le châssis du prototype après réalisation :



Fig. 3.3 – La réalisation du châssis pour le prototype

3.3 Le soc

Sa fonction principale est de pénétrer dans le sol et arracher la motte qui recouvre les pommes de terre. Il est muni, à son extrémité, de 16 barres soudées qui servent à un premier nettoyage avant de transporter les pommes de terre sur le tamis.

Il est caractérisé par une structure simple et une fabrication facile (une tôle pliée).

Le soc est fait en acier au bore qui est généralement utilisé pour les outils de jardin. Le bore, additionné à l'acier, lui confère une très forte trempabilité, sans pour autant affecter la résistance de l'acier. Un acier au bore trempé est donc très dur et très résistant à l'usure et il assure une haute protection à l'abrasion due au frottement du soc avec le sol qui contient de la silice. Ces qualités en font un matériau précieux pour les outils trempés qui peuvent être fortement sollicités au jardin.

Dans notre cas, on choisit l'acier au bore TBL recommandé pour les socs des machines agricole et dont la composition chimique est donnée par le tableau suivant :

Tableau. 3.4 – La composition chimique de l'acier au bore TBL [Int12]

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	B [%]
L'acier au bore TBL	0.25-0.30	< 0.40	1.10-1.30	< 0.04	< 0.04	< 0.05	0.0008-0.0040

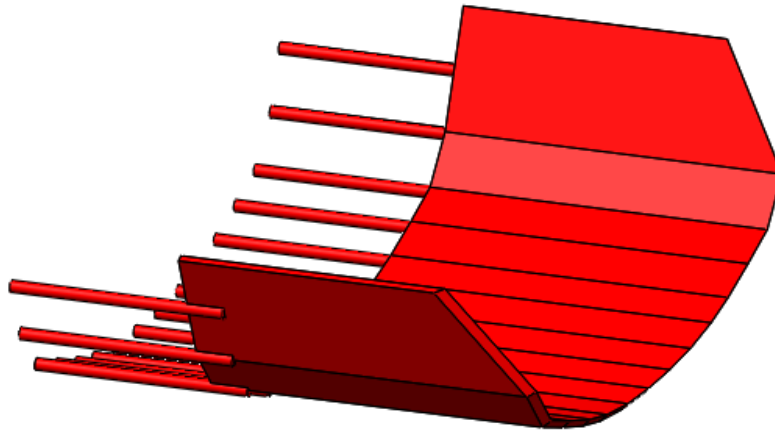


Fig. 3.4 – Vue en perspective du soc sur SolidWorks

Pour la réalisation du soc du prototype, nous avons choisi la tôle $217 \times 77 \times 2$. Celle-ci est pliée. Des fers ronds, de diamètre 3mm et de longueur de 48mm, y sont soudés. La figure suivante montre le soc après réalisation :



Fig. 3.5 – La réalisation du soc pour le prototype

3.4 Les disques

Leur fonction principale est de couper les fanes de pommes de terre excédentaires et de régler la profondeur du soc grâce à la glissière soudée au châssis. Ils sont fabriqués en Acier au bore TBL alors que leurs bras sont en acier E26.

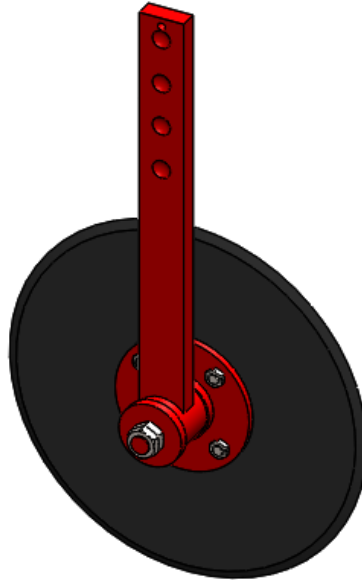




Fig. 3.6 – Vue en perspective du disque avec son support sur SolidWorks

Le tableau suivant décrit la réalisation du disque et son support châssis du prototype :

Tableau. 3.5 – Désignations des différents composants du disque

Désignation	Illustration	Dimensions	Méthode de fabrication
Le disque		Une tôle 133 × 133 × 2	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - tournage

<p>Le support du disque</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Un fer plat 150 × 16.5 × 7 - Une plaque (disque) de diamètre 50 mm et épaisseur 4mm. - un tube de diamètre 22mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - Tournage - Soudage
-----------------------------	---	--	---

La figure suivante illustre le disque avec son support pour le prototype après réalisation :



Fig. 3.7 – La réalisation du disque avec son support pour le prototype

3.5 Le mécanisme de renvoi d'angle

Il est utilisé pour transmettre le mouvement de rotation à la sortie du tracteur à la machine. La rotation de l'arbre de prise de mouvement est transmise à l'arbre récepteur muni à ses extrémités d'excentriques. La transmission est assurée par un couple d'engrenages coniques droits, identiques et perpendiculaires (rapport de transmission = 1).

L'arbre récepteur est supporté à ses extrémités par deux palliés lisses attachés au châssis de la machine.

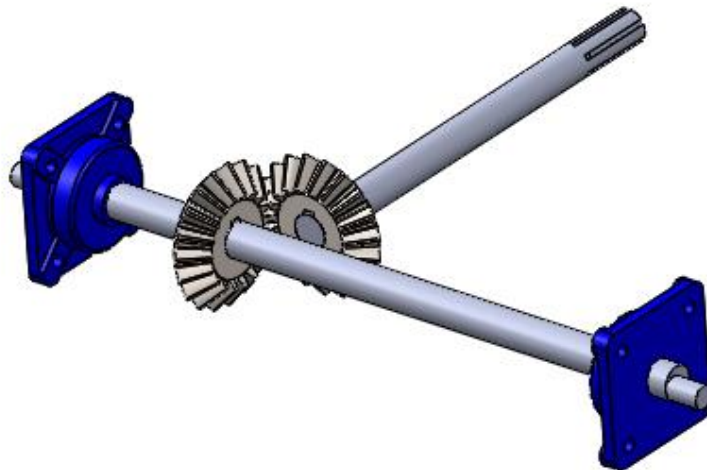


Fig. 3.8 – Vue en perspective du mécanisme de renvoi d'angle sur SolidWorks

Dans le but de simuler le fonctionnement de la machine, nous avons réalisé au département de Génie Mécanique un prototype à l'échelle 1/3. Dans ce prototype, l'arbre de prise de mouvement et le couple d'engrenages sont remplacés par un moteur électrique d'une machine à coudre d'une puissance de 100W. Le moteur entraîne l'arbre récepteur par l'intermédiaire d'une courroie.

La figure suivante illustre le moteur électrique et l'arbre récepteur du prototype :

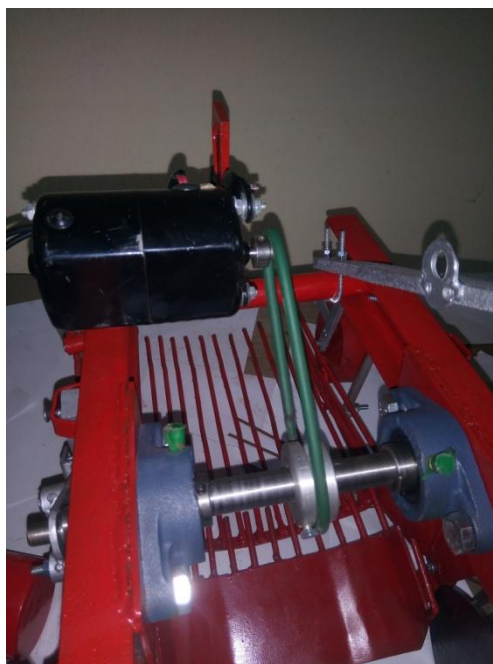


Fig. 3.9 – Moteur électrique et arbre récepteur du prototype

3.6 Le système bielle-manivelle

C'est le système qui provoque l'oscillation du soc ainsi que le tamis en partant du mouvement de rotation de l'arbre récepteur. Les deux bielles et la barre de transmission sont fabriquées en acier A60 alors que le support du soc est en acier E26.

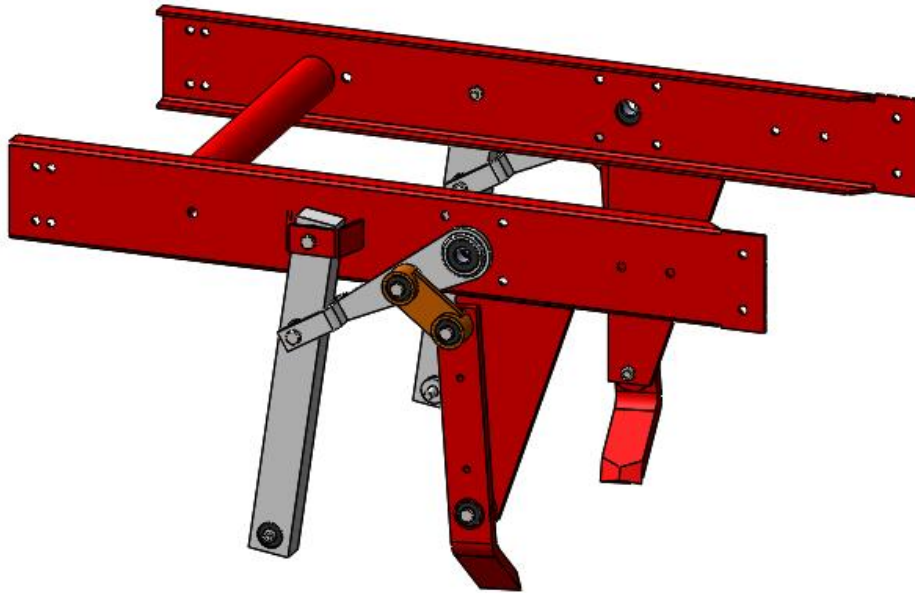






Fig. 3.10 – Vue en perspective du système bielle-manivelle lié au châssis sur SolidWorks

Le tableau suivant décrit la réalisation des différents composants du système bielle-manivelle du prototype :

Tableau. 3.6 – Désignations des différents composants du système bielle-manivelle

Désignation	Illustration	Dimensions	Méthode de fabrication
Support soc		Une tôle 163 × 20 × 5	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - Pliage

Bielle 1		Une tôle d'épaisseur 3mm	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Perçage - Pliage - Soudage
Bielle 2		<ul style="list-style-type: none"> - Une tôle 30 × 18 × 3 - barre de diamètre 16mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Découpage - Tournage - Perçage - Soudage
Barre de transmission		Une barre 164 × 19 × 13	<ul style="list-style-type: none"> - Fraisage - Perçage

La figure suivante illustre le système bielle-manivelle du prototype après réalisation des différentes pièces:

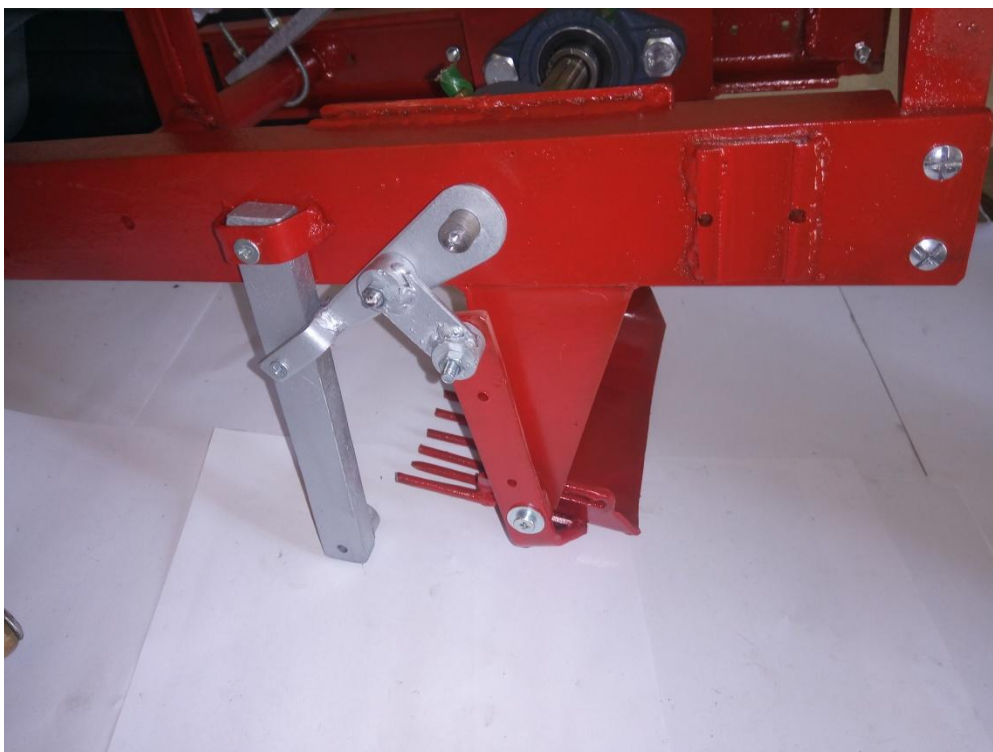


Fig. 3.11 – Le système bielle-manivelle du prototype

3.7 Le tamis

Il est animé par une transmission mécanique commandée par le système bielle-manivelle. Son rôle est de séparer les tubercules de la terre et de réaliser un deuxième nettoyage. L'espacement des barres de ce tamis est étudié pour retenir les tubercules et laisser retomber la terre par gravité sur le sol.

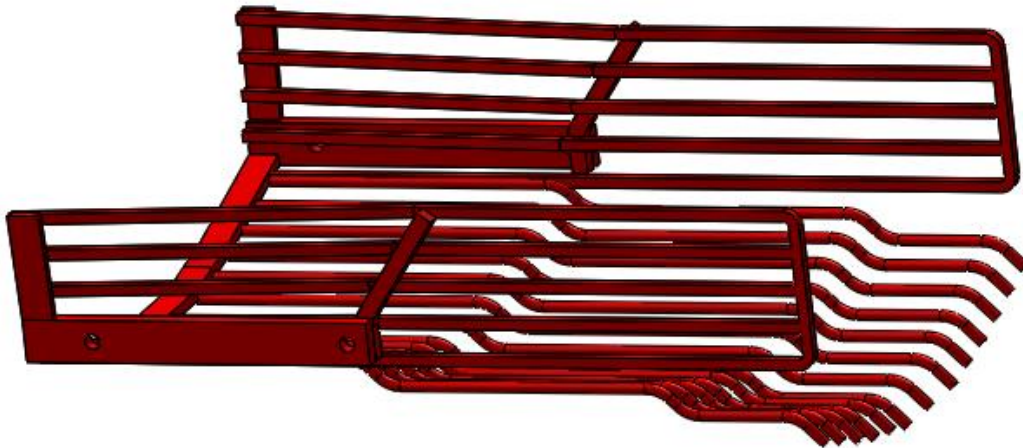


Fig. 3.12 – Vue en perspective du tamis sur SolidWorks

Le tamis est réalisé avec des barres en acier au bore TBL de diamètre 5mm et de longueur 256mm, pliés et soudés au support. Ce dernier est attaché au système bielle-manivelle.

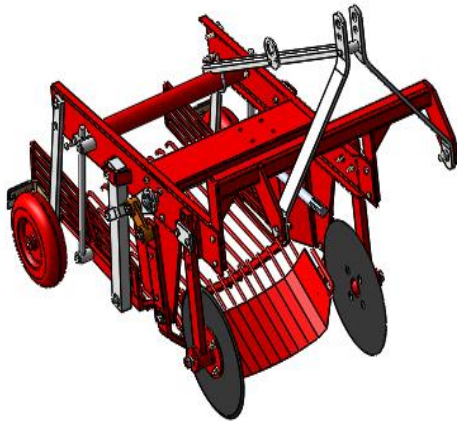
La figure suivante illustre le tamis du prototype réalisé :



Fig. 3.13 – Le tamis du prototype

3.8 La machine assemblée

En partant de la conception des différentes pièces, on peut réaliser l'assemblage de la machine complète qui est représenté dans la figure ci-dessous, avec laquelle on compare le prototype réalisé au sein du département de Génie Mécanique.



(a)



(b)

Fig. 3.14 – Comparaison entre la conception de la machine sur SolidWorks et le prototype

(a) Conception de la machine sur Solidworks

(b) Le prototype de la machine

Pour la simulation du mouvement de la chaîne cinématique, est intégré un moteur à l'entrée de l'arbre de prise de mouvement.

3.9 Validation du soc

Dans cette partie, nous allons vérifier la résistance du soc sur SolidWorks en introduisant les forces y appliquées pendant le fonctionnement de la machine.

La première étape consiste à l'application d'un matériau au soc qui est l'acier au bore TBL dont la limite d'élasticité est de 410 MPa.

La deuxième étape consiste à l'application des conditions aux limites. Dans notre cas, le soc est fixé par les deux extrémités de son support comme le montre la **figure 3.15**.

Pour le chargement, on utilise la **figure 2.13** et on calcule la résultante normale et tangentielle appliquées sur le soc pour $\alpha_{opt} = 26,300^\circ$:

- Pour la résultante normale, nous avons :

$$F_N = N + S = Q \cdot \cos\alpha + P \cdot \tan\alpha = \frac{a \cdot B \cdot h}{\sin\alpha} \cdot \rho \cdot g + P \cdot \tan\alpha \quad (3.1)$$

L'application numérique donne :

$$F_N = 382.251 \text{ N} \quad (3.2)$$

- Pour la résultante tangentielle, nous avons :

$$F_T = P - T = P - Q \cdot \sin\alpha = P - \frac{a \cdot B \cdot h}{\sin\alpha} \cdot \rho \cdot g \quad (3.3)$$

L'application numérique donne :

$$F_T = 319.113 \text{ N} \quad (3.4)$$

La **figure 3.15** montre l'application des forces normale et tangentielle au soc sur SolidWorks.

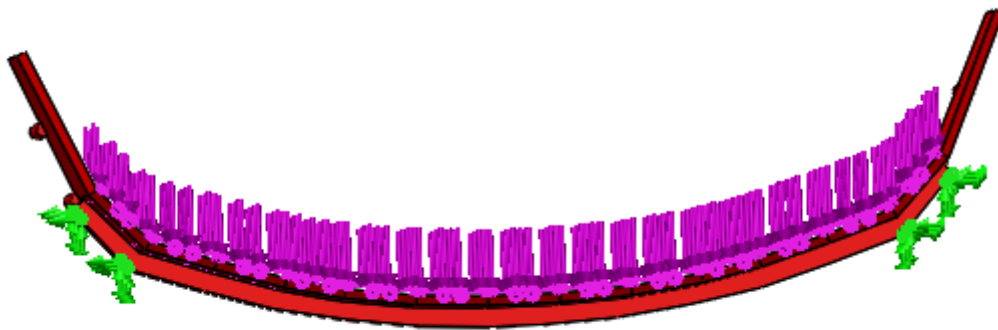


Fig. 3.15 – Applications des conditions aux limites et les chargements sur le soc

La dernière étape avant de simuler est de générer un maillage sur le soc comme le montre la figure suivante :

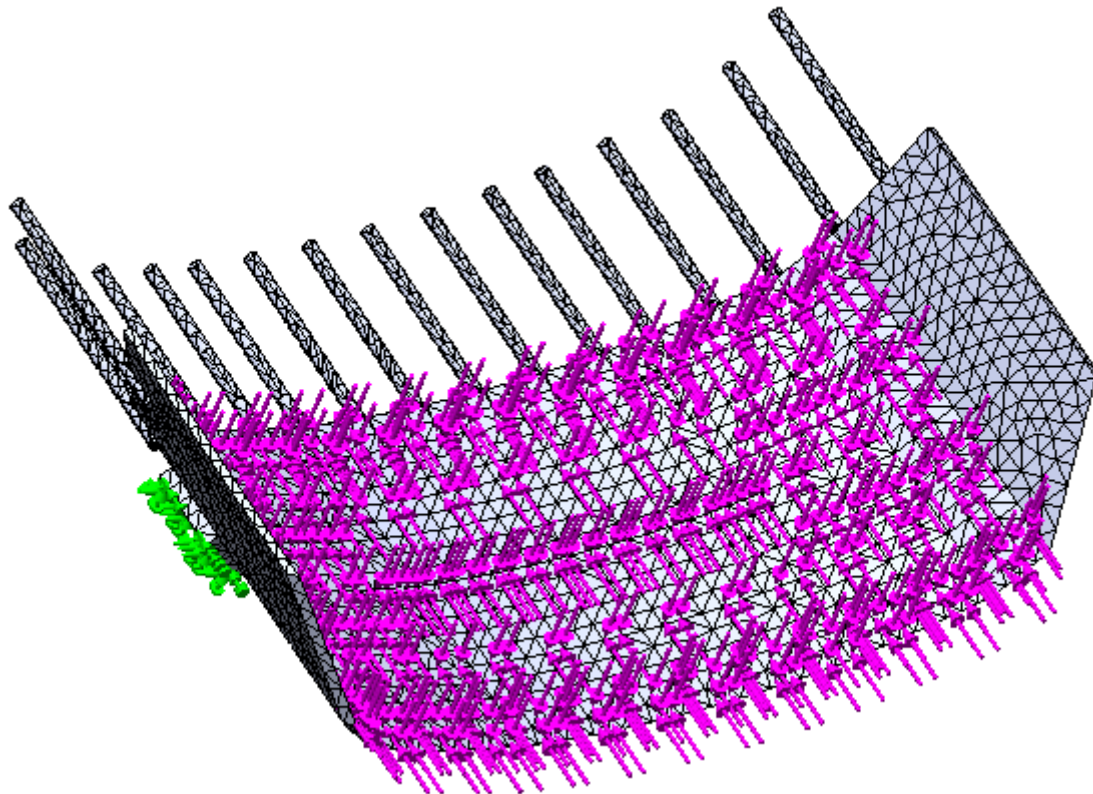


Fig. 3.16 – Création du maillage sur le soc

Les résultats obtenus après simulation sont représentés sur les **figures 3.17, 3.18, 3.19** et **3.20**.

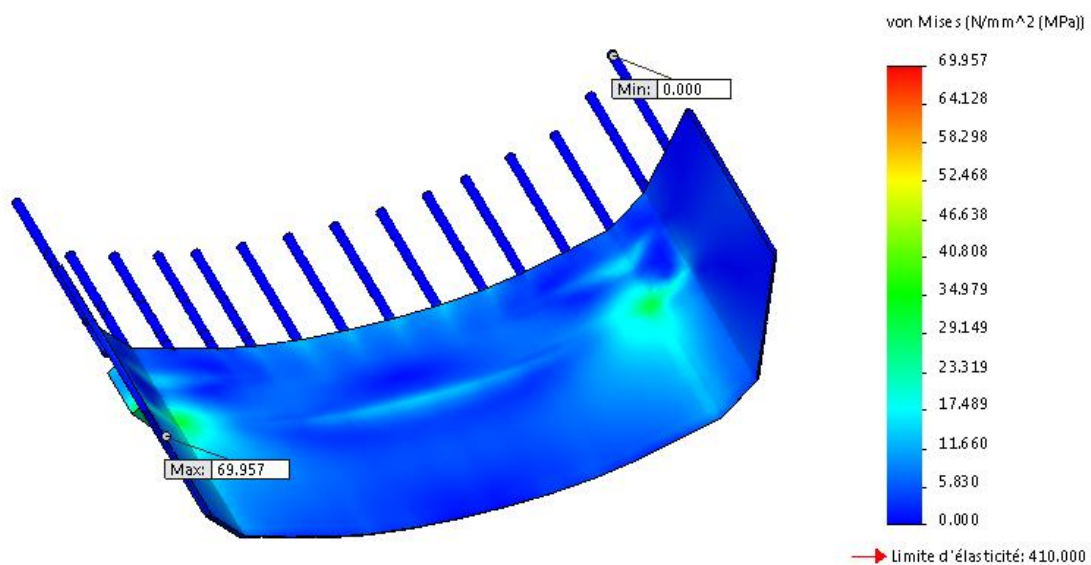


Fig. 3.17 – Distribution de contraintes sur le soc

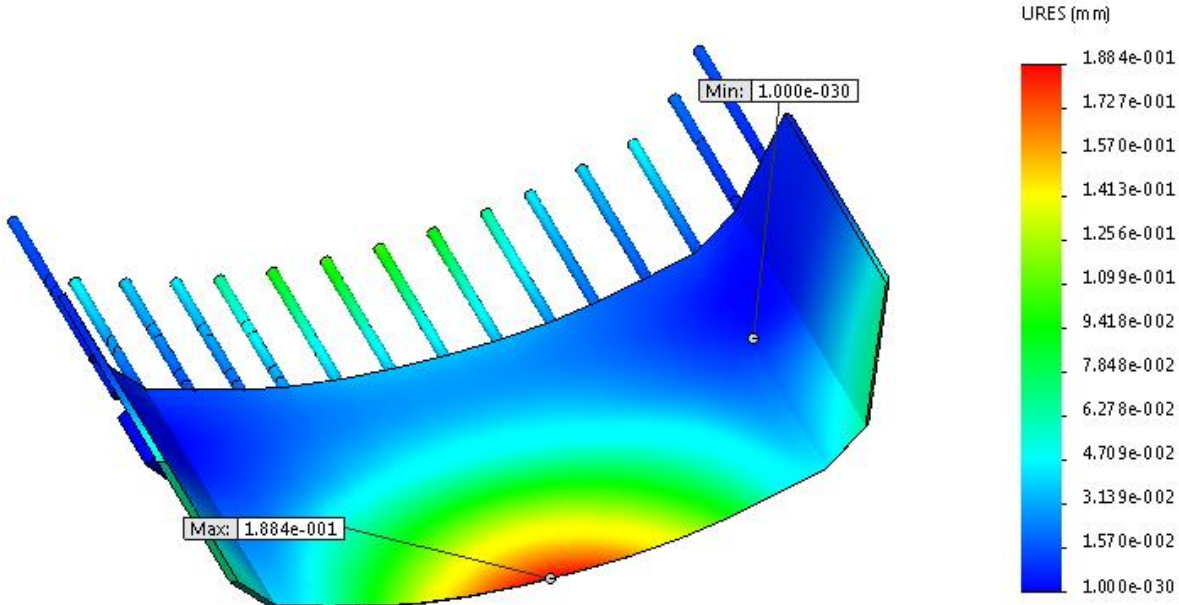


Fig. 3.18 – Déplacement du soc

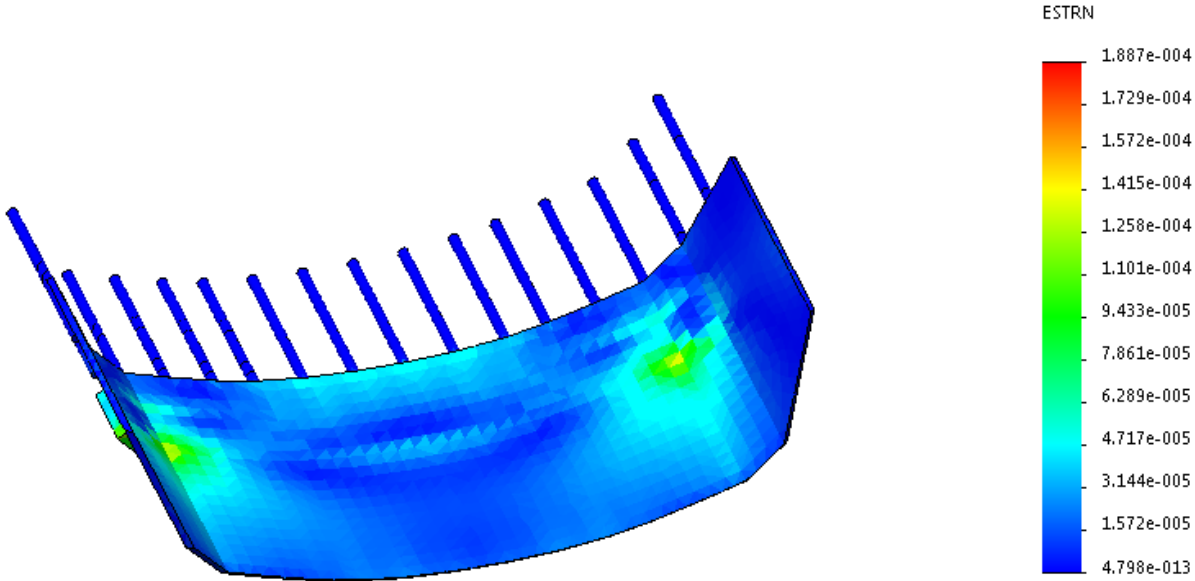


Fig. 3.19 – La déformation du soc après l'application des forces

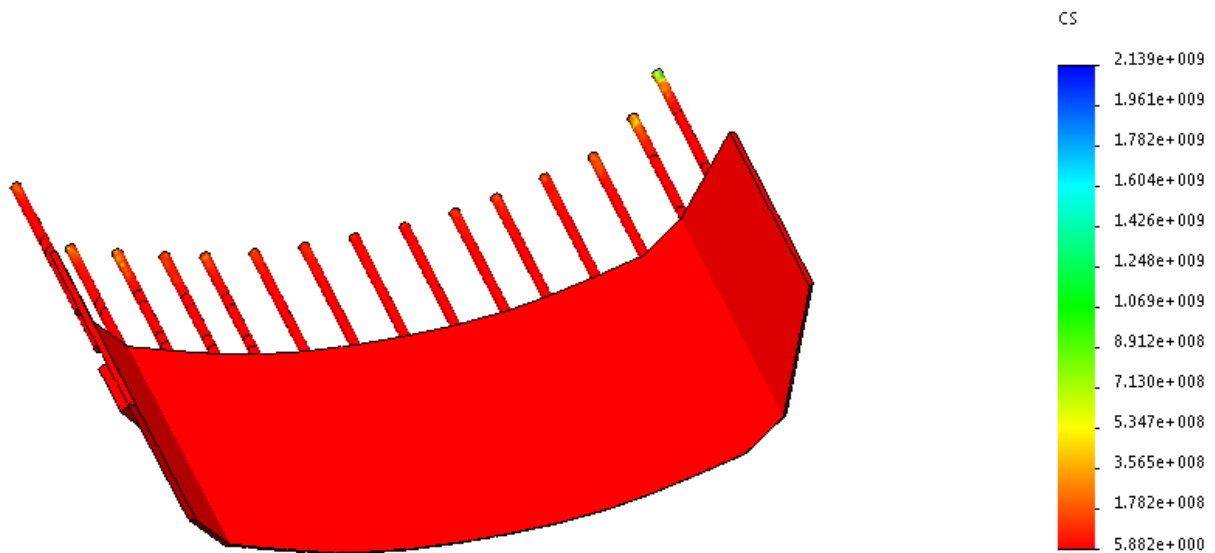


Fig. 3.20 – La distribution du coefficient de sécurité de Von Mises

Tableau récapitulatif des résultats :

Tableau. 3.7 – Résultats de l'étude statistique appliquée au soc

Le soc	Valeur de la force normale [N]	Valeur de la force tangentielle [N]	Limite d'élasticité [MPa]	Contrainte		Déplacement	Coefficient de sécurité de Von Mises S_{min}
				σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]	U_{max} [mm]	
	382.251	319.113	410.000	69.957	0.000	0.188	5.861

Analyse des résultats :

- La contrainte maximale obtenue sur le soc par la simulation est nettement inférieure à la limite élastique ce qui signifie qu'il est loin du domaine plastique et pour l'atteindre il faudra appliquer 5.86 fois l'effort appliqué (ce qui est confirmé par la **figure 3.20** dont le coefficient de sécurité minimal est de 5.88). Le soc résiste bien aux efforts appliqués.
- Les zones de concentration de contraintes se limitent aux points d'attache du soc avec son support.
- Le déplacement maximal quant à lui est de 0.188 mm. C'est une valeur acceptable pour un soc d'une machine destinée à la récolte de la pomme de terre.

Conclusion générale

Ce Projet de Fin d'Etudes a consisté d'étudier une machine arracheuse de pomme de terre semblable à une machine industrielle existante. L'étude a porté sur les points suivants :

- Etude analytique de la chaîne cinématique,
- Dimensionnement des principaux paramètres de fonctionnement de la machine,
- Conception par la CAO,
- Choix et sélection des matériaux pour les différents éléments de la machine,
- Validation de la conception du soc (partie travaillante) à l'aide du logiciel SolidWorks,
- Elaboration des plans de fabrications pour la réalisation.

Elle est suivie par la réalisation d'un prototype à l'échelle 1/3. L'essai de son fonctionnement est encourageant et montre qu'il est possible de réaliser la machine à l'échelle réelle.

Nous suggérons comme perspective une continuation de ce travail portant sur :

- le calcul de résistance,
- l'étude de lubrification du renvoi d'angle,
- l'étude de la possibilité d'ajouter un tamis circulaire à la sortie de la machine dans le but d'effectuer un troisième nettoyage des pommes de terre.

Références Bibliographiques

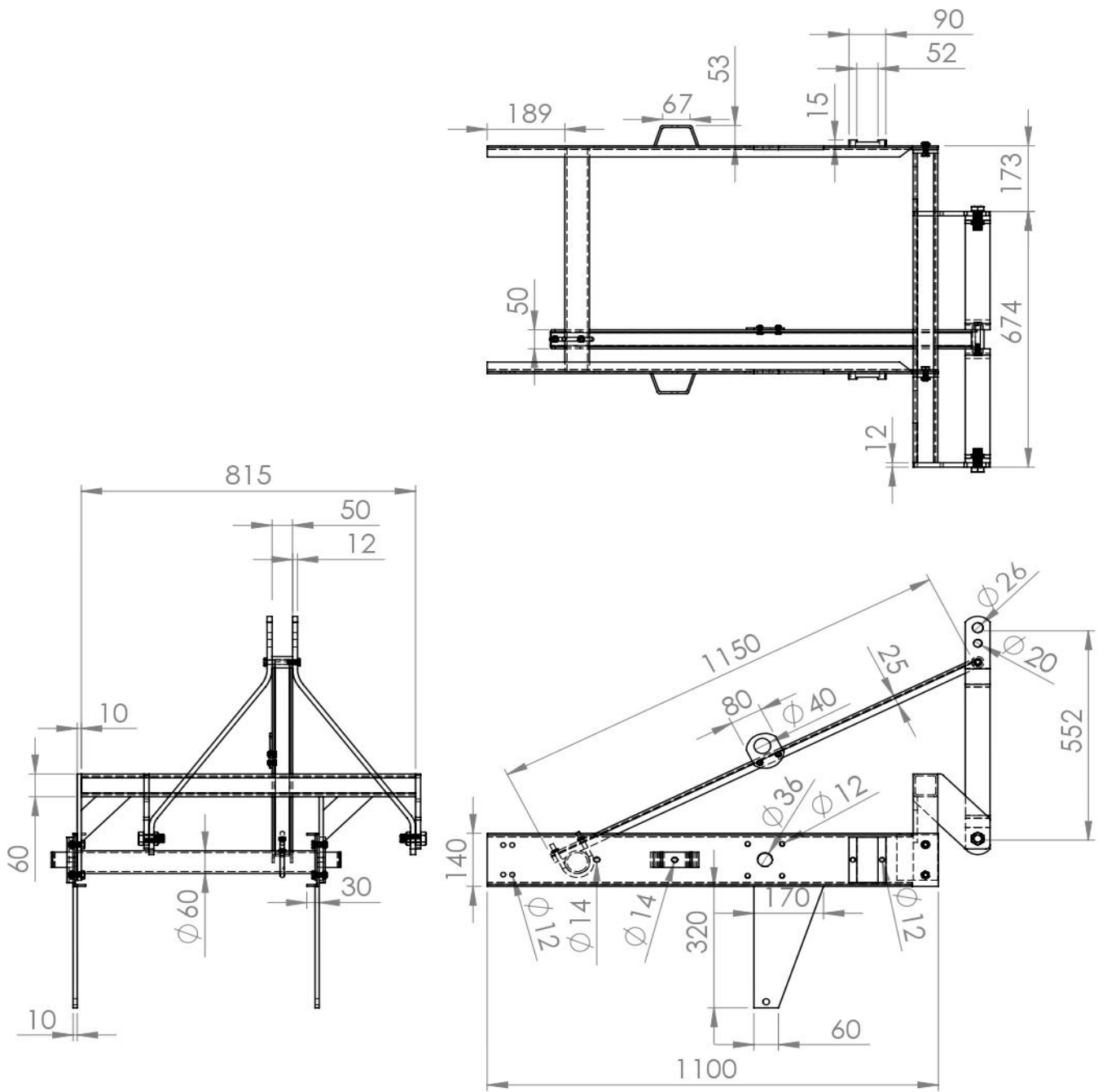
- [1] HADJ MOHAMMED, Rabah et HALOUANE, Narimane. Office Nationale Des Statistiques. *L'Algérie en quelques chiffres*, résultats 2014-2016, n° 47, p. 37.
- [2] AISSOU, Cherif. Etude de l'arracheuse de pomme de terre type : CAII, en vue de son utilisation en Algérie, p. 5. PFE : Génie Rural, Institut National Agronomique : 1979.
- [3] Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. FAO statistique 2017.
- [4] TANASÍ, Wojciech. The optimal depression angle of share in sets of digging machine to potatoes harvest. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2009, vol. 54, n°1, p. 62-64.
- [5] Pr. Mohamed BOUAZIZ. Cours de Construction Mécanique II, *Chapitre 1_3 les engrenages coniques*, ENP Alger, 2017, p. 2.

Sitographie

- [Int1] : <http://madrp.gov.dz/agriculture/statistiques-agricoles/> (consulté le 30 mars 2019).
- [Int2] : <http://www.radioalgerie.dz/news/fr/article/20180724/146819.html> (consulté le 30 mars 2019).
- [Int3] : <https://www.semencemag.fr/photos/recolte-pommes-de-terre-potager-gnis-yves-lanceau.jpg> (consulté le 5 avril 2019).
- [Int4] : https://www.gammvert.fr/conseils/sites/default/files/2017-08/AdobeStock_16786001R%C3%A9colter-pommedeterrereduit.jpg (consulté le 5 avril 2019).
- [Int5] : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Landwirtschaftliches_Ger%C3%A4t_1.JPG (consulté le 5 avril 2019).
- [Int6] : <https://www.spedo.it/fr/wp-content/uploads/CPL-spedo.jpg> (consulté le 5 avril 2019).
- [Int7] : <http://www.galagoal.it/842-large/scavapatate-a-scarico-posteriore-per-attacco-trattori-sp-50v-heckchi-magli.jpg> (consulté le 6 avril 2019).
- [Int8] : <http://www.terrateck.com/fr/recolte-nettoyage-et-conditionnement/95-ramasseur-doignon-et-pomme-de-terre-trainee.html> (consulté le 6 avril 2019).
- [Int9] : <https://docplayer.fr/docs-images/73/69267697/images/1-3.jpg> (consulté le 6 avril 2019).
- [Int10] : <https://www.spedo.it/fr/wp-content/uploads/Scavaraccoglipatate-Jr-int.jpg> (consulté le 6 avril 2019).
- [Int11] : http://img.agriexpo.online/fr/images_ag/photo-g/176116-10590088.jpg (consulté le 6 avril 2019).

[Int12] : https://www.thyssenkrupp-materials.fr/media/products_4/carbon_flat_steel/plates_and_slabs_carbon_steel/tk_broschuere_tbl_fr_web_dst.pdf (consulté le 2 juin 2019).

Annexes



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Matériau: Acier E26 & A60

Châssis

Dpt. G.Mécanique



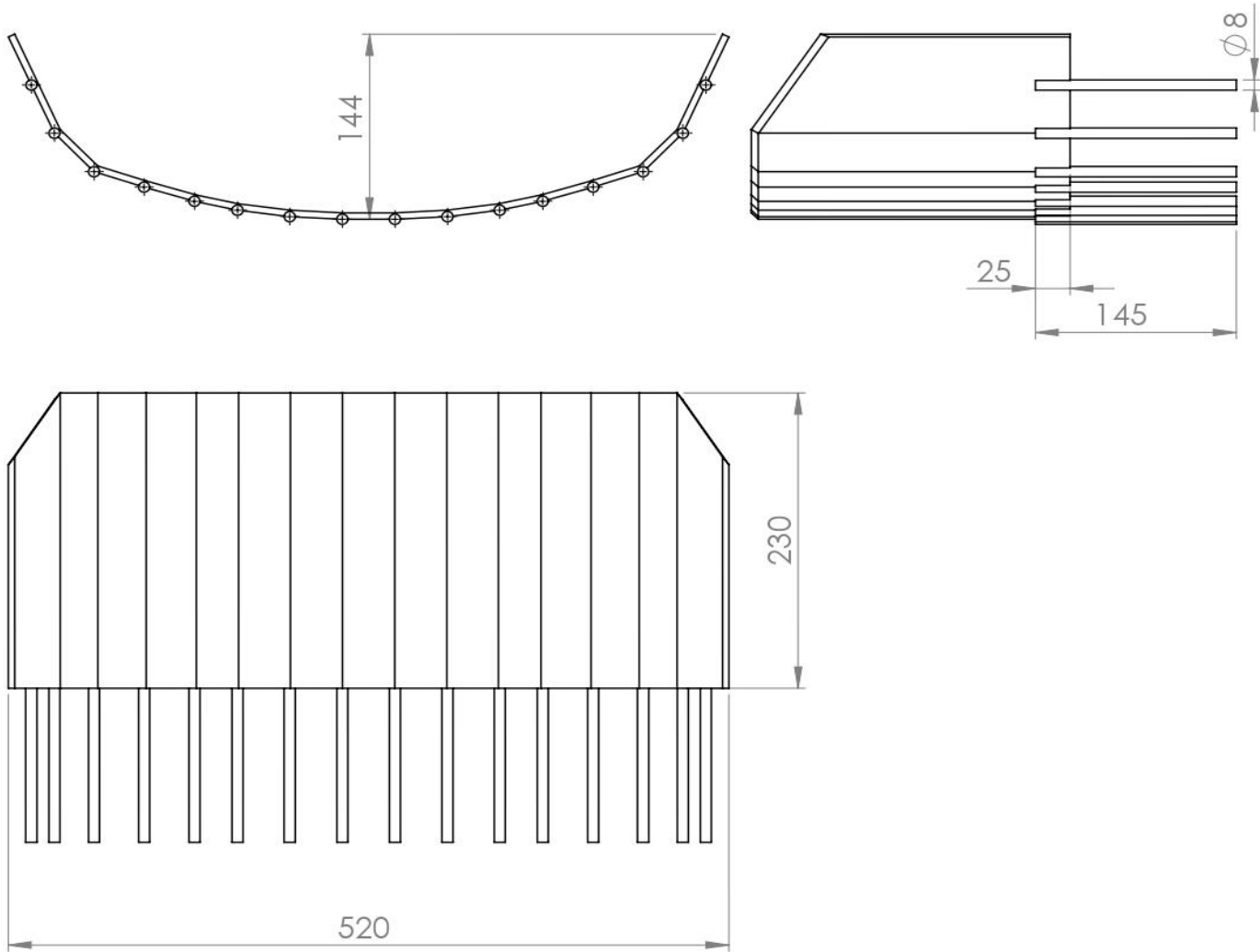
Proposé par: Mohamed RAHMOUNE

Date: 22/06/2019


Echelle: 1/15

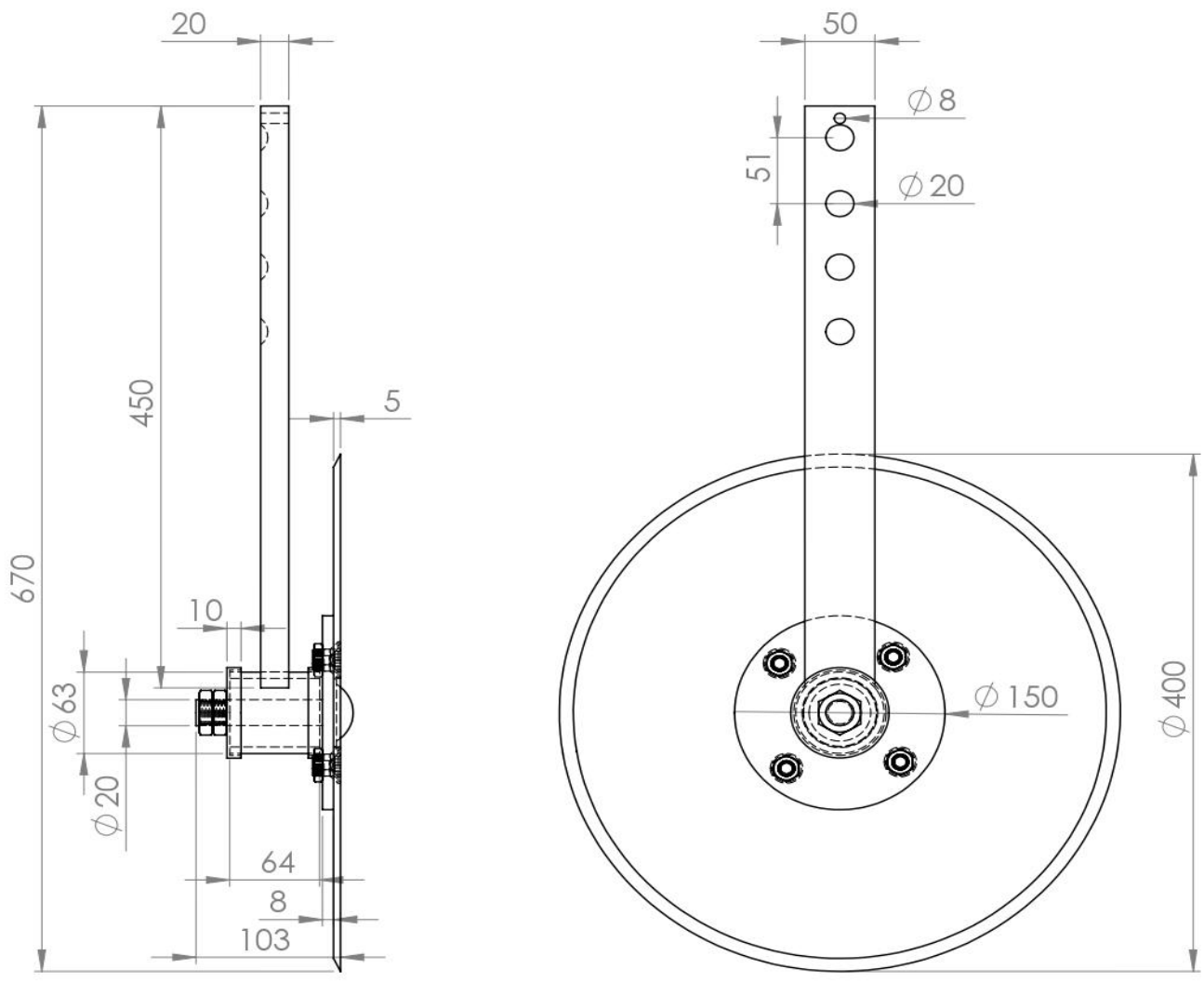
Etudié par: Hamza HEBHOUB

AP30 A 00



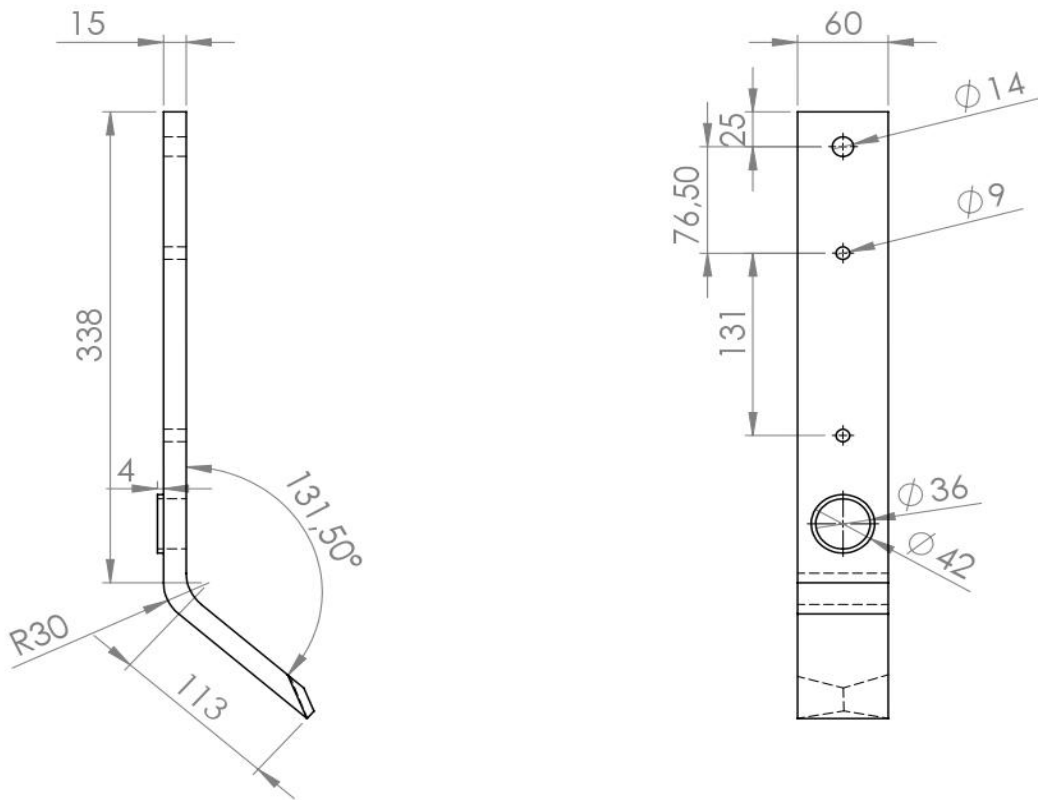
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Matériau: Acier au bore TBL	Soc	Dpt. G.Mécanique
	Proposé par: Mohamed RAHMOUNE	Date: 22/06/2019
Echelle: 1/5	Etudié par: Hamza HEBHOUB	AP30 B 00



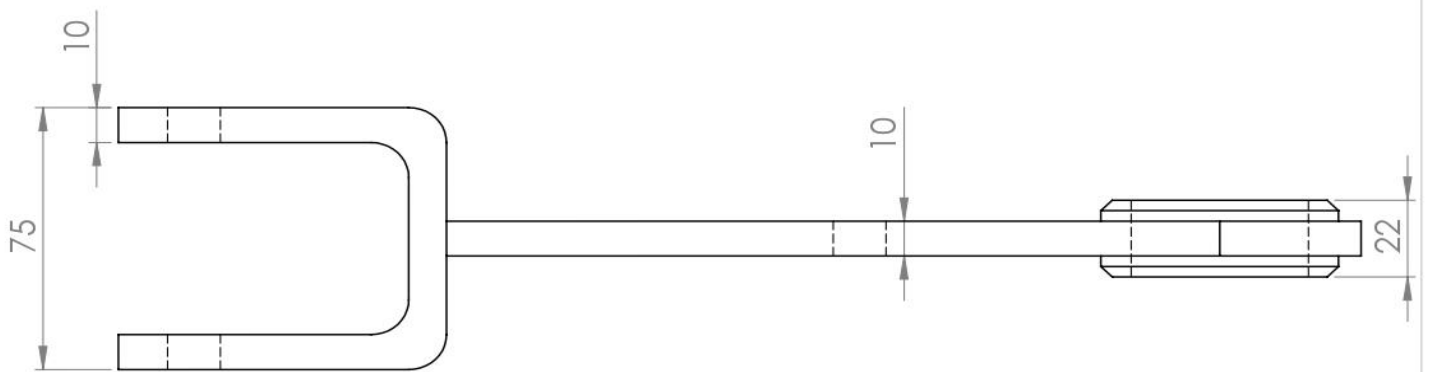
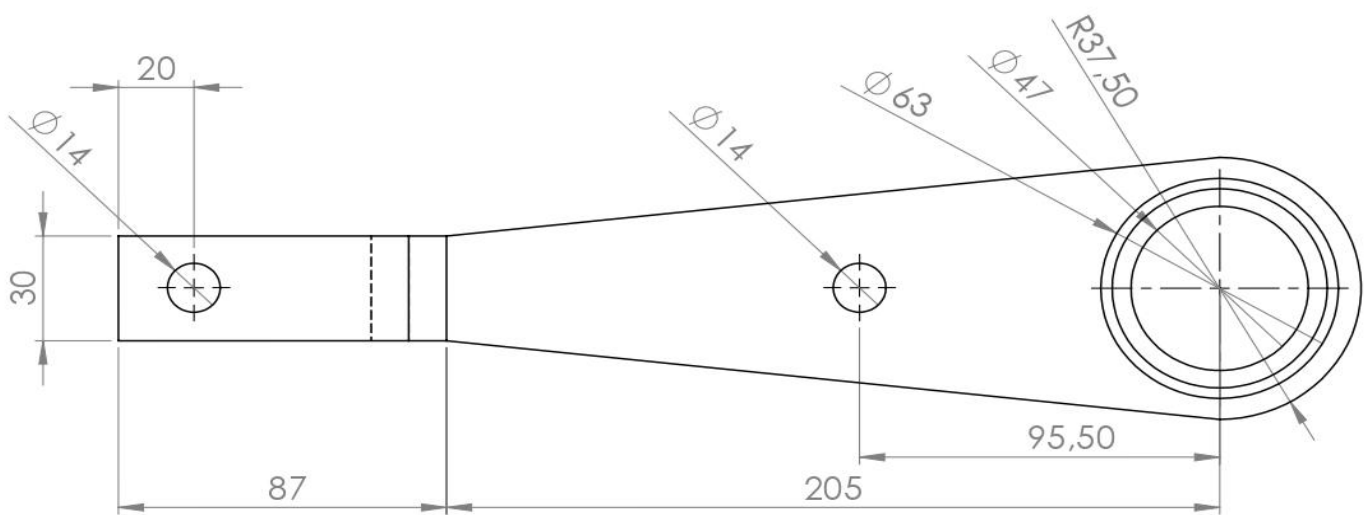
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Matériau: Acier au bore TBL	Assemblage_disque	Dpt. G.Mécanique
	Proposé par: Mohamed RAHMOUNE	Date: 22/06/2019
Echelle: 1/5	Etudié par: Hamza HEBHOUB	AP30 C 00



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Matériau: Acier E26	Support_soc	Dpt. G.Mécanique
	Proposé par: Mohamed RAHMOUNE	Date: 22/06/2019
Echelle: 1/5	Etudié par: Hamza HEBHOUB	AP30 D 01



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Matériau: Acier A60

Bielle 1

Dpt. G.Mécanique



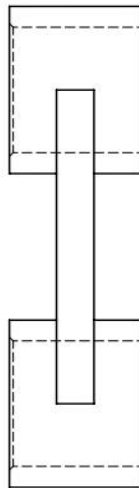
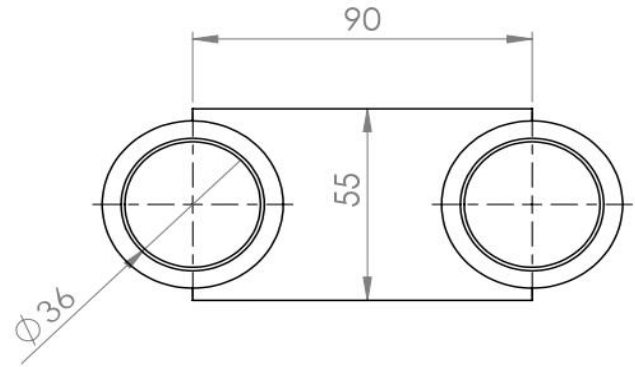
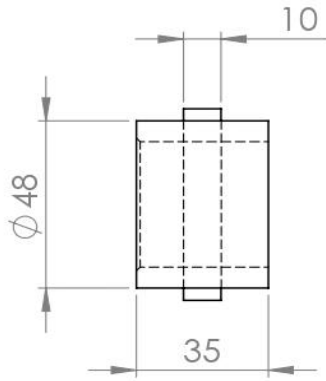
Proposé par: Mohamed RAHMOUNE

Date: 22/06/2019


Echelle: 1/2

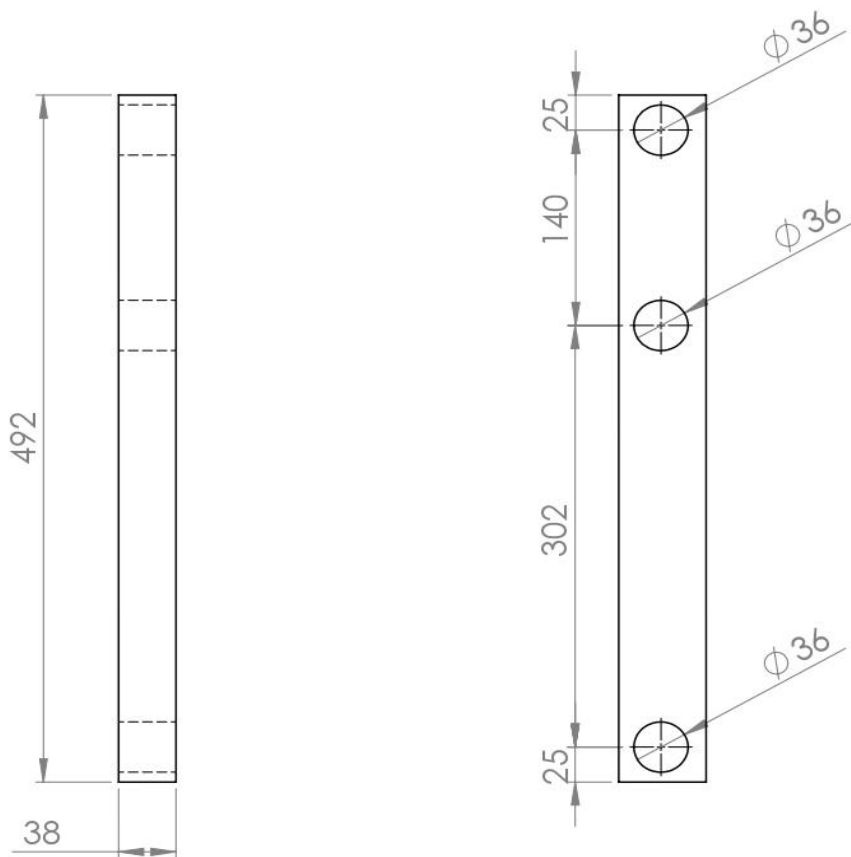
Etudié par: Hamza HEBHOUB

AP30 D 02




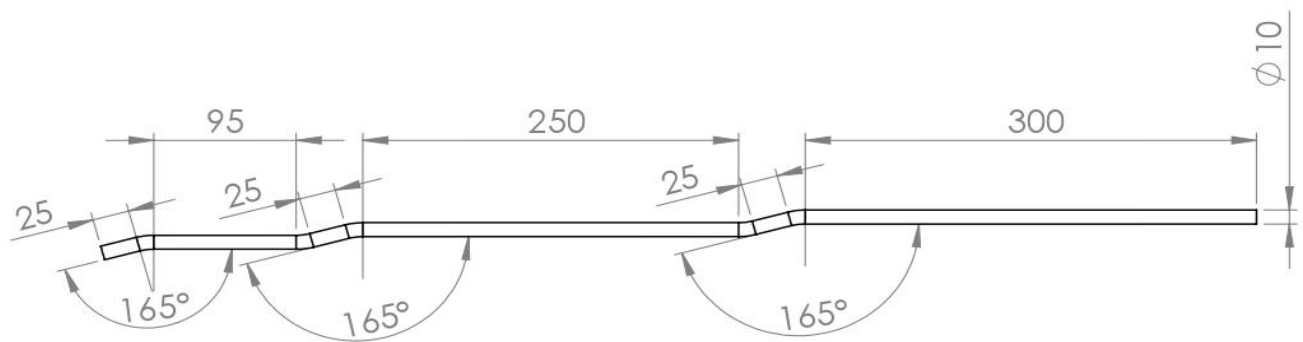
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Matériau: Acier A60	Bielle 2	Dpt. G.Mécanique
	Proposé par: Mohamed RAHMOUNE	Date: 22/06/2019
Echelle: 1/2	Etudié par: Hamza HEBHOUB	AP30 D 03




ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Matériau: Acier A60	Barre de transmission	Dpt. G.Mécanique
	Proposé par: Mohamed RAHMOUNE	Date: 22/06/2019
Echelle: 1/5	Etudié par: Hamza HEBHOUB	AP30 D 04



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Matériau: Acier A60	Barre_tamis	Dpt. G.Mécanique
	Proposé par: Mohamed RAHMOUNE	Date: 22/06/2019
Echelle: 1/5	Étudié par: Hamza HEBHOUB	AP30 C 01

