

**Résumé**

Le traitement des déchets organiques au Maroc reste un secteur qui consomme des budgets importants et qui augmente avec la croissance démographique. Ainsi de grands efforts, et plusieurs recherches soit en cours pour aboutir à des solutions ciblées et pertinentes.

La valorisation des déchets organiques, a connu un très essor ces dernières années vues leur impact sur la protection de l'environnement et sur le développement durable, valoriser ces déchets par un procédé de compostage est la technique la plus efficace.

Cependant, l'application de la technique de compostage classique n'est plus valide aujourd'hui à cause de l'augmentation de la quantité des déchets organiques. Cette technique nécessite une période de traitement plus grande que 6 mois, ce qui représente un handicap pour traiter l'énorme quantité produite chaque jour.

À cet effet, ce travail a une finalité très particulière. Il s'agit, tout d'abord, de mettre en œuvre un système de compostage plus rapide décentralisé. Ce système convertit les déchets organiques en un compost mature de haute qualité en 4 semaines. Il garantit tous les paramètres de compostage basée sur l'amélioration de l'existant avec des solutions constructives simple et rentable. La fabrication de ce système s'appuie sur le dimensionnement en fonction des propriétés des déchets organiques, ainsi les prototypes et les tests sur le terrain, ont montré une robustesse une performance plus élevé que l'existant. Cette thèse est clôturée par une conclusion générale présentant une brève synthèse de contribution apportées.

**Mots clés : Composteur innovant ; Compostage ; Composteur rotatif décentralisé ; Conception ; Fabrication ; déchets organiques ;**

**ملخص**

لا تزال معالجة النفايات العضوية في المغرب قطاعا يستهلك ميزانيات كبيرة ويزداد مع النمو السكاني. جهود كبيرة جداً، والعديد من الأبحاث جارية لتحقيق حلول مستهدفة وذات صلة إن استعادة النفايات العضوية، التي شهدت طفرة كبيرة في السنوات الأخيرة من حيث تأثيرها على حماية البيئة وعلى التنمية المستدامة، فإن استعادة هذه النفايات عن طريق عملية التسميد هي أكثر التقنيات كفاءة. ومع ذلك، فإن تطبيق تقنية التسميد التقليدية لم يعد صالحاً اليوم بسبب زيادة كمية النفايات العضوية. تتطلب هذه التقنية فترة علاج تزيد عن 6 أشهر، وهي عائق لعلاج الكمية الهائلة المنتجة كل يوم. وتحقيقاً لهذه الغاية، فإن لهذا العمل غرضاً خاصاً جداً. الأول هو تطبيق نظام تسميد أسرع ولا مركزي. يحول هذا النظام النفايات العضوية إلى سماد ناضج عالي الجودة في 4 أسابيع. وهو يضمن جميع بارامترات التسميد القائمة على تحسين الحلول البنية البسيطة والمربحة. يعتمد تصنيع هذا النظام على الأبعاد وفقاً لخصائص النفايات العضوية، لذلك أظهرت النماذج الأولية والاختبارات الميدانية أداءً أعلى من الأداء الحالي. وتختتم هذه الأطروحة باستنتاج عام يقدم توليفة موجزة للمساهمات المقدمة. الكلمات الرئيسية: سماد مبتكر؛ التحويل إلى سماد؛ سماد دوار لا مركزي؛ التصميم؛ التصنيع؛ نفايات عضوي؛

Mustafa  
EL ALAMICONCEPTION ET FABRICATION D'UNE MACHINE INNOVANTE  
POUR LA PRODUCTION DE COMPOST2020/2021  
Physique et Sciences de  
l'Ingénieur

**Université Hassan 1<sup>er</sup>**  
**Centre d'Études Doctorales en Sciences**  
**et Techniques & Sciences Médicales**



**Faculté des Sciences et Techniques**  
**Settat**

**THÈSE DE DOCTORAT**

*Pour l'obtention de grade de Docteur en Génie Mécanique*  
Formation Doctorale : Physique et Sciences de l'Ingénieur  
Spécialité : Génie Mécanique

*Sous le thème*

**CONCEPTION ET FABRICATION D'UNE**  
**MACHINE INNOVANTE POUR LA**  
**PRODUCTION DE COMPOST**

*Présentée par :*

**M. Mustafa EL ALAMI**

**Soutenu le : 10/11/2021**

A la Faculté des Sciences et Techniques de Settat devant le jury composé de :

Pr. Bouchaib RADI	PES	FST Settat	Président
Pr. Hicham Fihri Fassi	PES	FST Settat	Rapporteur
Pr. Jamaa Bengourram	PES	FST Beni Mellal	Rapporteur
Pr. Mohamed Maniana	PH	CRMEF Settat	Rapporteur
Pr. Rachid Boutarfa	PH	FST Settat	Examineur
Pr. Moha Arouch	PES	FST Settat	Directeur de thèse

*Année Universitaire: 2020/2021*



## Remerciements

Je tiens à remercier Dieu le tout puissant pour l'accomplissement de ce travail.

Je voudrais vivement remercier Monsieur Moha AROUCH pour toutes ces années d'orientation, de collaboration et d'apprentissage. Je suis très reconnaissant des opportunités qu'il m'a offertes pendant mon parcours universitaire.

Je remercie vivement Monsieur Bouchaib RADI qui a accepté le rôle de Président du jury. Merci également à Monsieur Hicham FASSI FIGHRI, Monsieur Jamaa BENGOURRAM et Monsieur Mohamed MANIANA d'avoir accepté d'être rapporteurs. Merci pour vos corrections, remarques et suggestions constructives.

Je tiens aussi à remercier Madame Fatima Zahra BERAICH pour toute son attention, son suivi, ses conseils, ainsi que la confiance qu'il a faite à mon travail en mettant toujours à ma disposition les moyens nécessaires afin de mener à bien ce travail de thèse.

En acceptant d'être examinateur de mon travail, les professeurs Rachid BOUTARFA m'a fait un grand honneur. Qu'il trouve ici toute ma gratitude.

Je remercie très vivement tous les membres du laboratoire que j'ai pu côtoyer et qui ont contribué directement, ou indirectement à la réalisation de cette thèse.

Je remercie spécialement ma chère femme Kaoutar ERRAKHA, qui était toujours à mes côtés, qui m'encourage, crois-en moi et m'exauce d'énergie positive, je la remercie pour ses conseils et remarques pertinentes, surtout dans les moments de crise.

Mon petit héros Mohammed Reda, Louange DIEU tous les temps de t'avoir mené dans ma vie, et je te remercie simplement parce que c'est toi, MA MOTIVATION !

Bien sûr, je n'oublie pas de remercier tous mes amis pour les bons moments de détente Rachid, Saïd, Yassine, Aziz, Azzedine, Mohamed...

À ma famille bien-aimée qui a toujours cru en moi, pour son irremplaçable et inconditionnel soutien : elle a toujours été à mes côtés pour me soutenir, me pousser vers l'avant et m'encourager dans les moments cruciaux de ma vie étudiante.

*A*

*Ma mère, Mon père,*

*A*

*Ma femme et mon fils*

*A*

*Mes sœurs et Mes frères*

*A*

*Tous ceux qui me sont chers...*

## **Résumé**

Le traitement des déchets organiques au Maroc reste un secteur qui consomme des budgets importants et qui augmente avec la croissance démographique. Ainsi de grands efforts, et plusieurs recherches soit en cours pour aboutir à des solutions ciblées et pertinentes.

La valorisation des déchets organiques, a connu un très essor ces dernières années vues leur impact sur la protection de l'environnement et sur le développement durable, valoriser ces déchets par un procédé de compostage est la technique la plus efficace.

Cependant, l'application de la technique de compostage classique n'est plus valide aujourd'hui à cause de l'augmentation de la quantité des déchets organiques. Cette technique nécessite une période de traitement plus grande que 6 mois, ce qui représente un handicap pour traiter l'énorme quantité produite chaque jour.

À cet effet, ce travail a une finalité très particulière. Il s'agit, tout d'abord, de mettre en œuvre un système de compostage plus rapide décentralisé. Ce système convertit les déchets organiques en un compost mature de haute qualité en 4 semaines. Il garantit tous les paramètres de compostage basée sur l'amélioration de l'existant avec des solutions constructives simple et rentable. La fabrication de ce système s'appuie sur le dimensionnement en fonction des propriétés des déchets organiques, ainsi les prototypes et les tests sur le terrain, ont montré une robustesse une performance plus élevé que l'existant.

Cette thèse est clôturée par une conclusion générale présentant une brève synthèse de contribution apportée.

**Mots clés : Composteur innovant ; Compostage ; Composteur rotatif décentralisé ; Conception ; Fabrication ; déchets organiques.**

## **Abstract**

The treatment of organic waste in Morocco remains a sector that consumes significant budgets and increases with population growth. Thus great efforts, and several researches are in progress to reach targeted and relevant solutions.

The valorization of organic waste, has known a very fast development these last years seen their impact on the environmental protection and on the sustainable development, to valorize this waste by a process of composting is the most effective technique.

However, the application of the classic composting technique is no longer valid today because of the increase in the quantity of organic waste. This technique requires a treatment period longer than 6 months, which is a handicap to treat the huge quantity produced every day.

To this end, this work has a very particular purpose. First of all, it is about implementing a faster decentralized composting system. This system converts the organic waste into a high quality mature compost in 4 weeks. It guarantees all the parameters of composting based on the improvement of the existing with simple and cost-effective constructive solutions. The manufacturing of this system is based on the dimensioning according to the properties of the organic waste, so the prototypes and the field tests, showed a robustness a higher performance than the existing one.

This thesis is closed by a general conclusion presenting a brief synthesis of the contributions made.

**Keywords: Innovative composter; Composting; Decentralized rotating composter; Design; Manufacturing; Organic waste.**

## **Table des matières**

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
Table des matières .....	iii
Table des illustrations .....	vii
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE -I : ÉTAT DE L'ART SUR LE COMPOSTAGE ET TECHNOLOGIE DE COMPOSTEUR ROTATIF .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>2 Compostage .....</b>	<b>4</b>
2.1 L'historique de compostage.....	4
2.2 Le compostage moderne .....	5
2.3 Les avantages de compostage.....	6
<b>3 Principe de compostage .....</b>	<b>6</b>
3.1 Définition de compostage.....	6
3.2 Phases de compostage .....	8
3.3 Les déchets compostables et non compostables .....	8
<b>4 Paramètres de compostage.....</b>	<b>9</b>
4.1 Les micro-organismes.....	9
4.2 Paramètres physico-chimiques .....	10
- L'apport en oxygène.....	10
- La température .....	10
- L'humidité .....	12
- Le PH.....	13
- Le rapport carbone/azote .....	13
<b>5 Modes de compostage .....</b>	<b>14</b>
5.1 Compostage centralisé.....	14
5.2 Compostage décentralisé .....	15
<b>6 Procédés de compostage .....</b>	<b>15</b>
6.1 Compostage en andains .....	15
6.1.1 Andains retournés.....	15
6.1.2 Andains aérés passivement.....	15
6.2 Compostage en récipients.....	16

6.3	Compostage en lits rectangulaires remués.....	16
6.4	Lombricomposteur.....	16
6.5	Compostage en bac plastique ou de bois .....	17
6.5.1	Bac à compost en plastique .....	17
6.5.2	Bac à compost en bois .....	17
6.6	Compostage en tambour rotatif .....	17
<b>7</b>	<b>Technologies de composteur rotatif .....</b>	<b>18</b>
7.1	Les types de composteurs rotatifs.....	18
7.2	Retournement par tambour rotatif et un bras mécanique.....	19
7.3	Retournement par bras mécanique .....	19
7.4	Retournement par tambour rotatif .....	21
7.5	Approche comparative des types de composteurs rotatifs.....	23
<b>8</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>25</b>
<b>CHAPITRE- II : METHODES ET OUTILS DE CONCEPTIONS DE COMPOSTEUR ROTATIF.....</b>		<b>26</b>
<b>1</b>	<b>Introduction : .....</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>Choix de la méthode de conception .....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>Présentation de l'analyse de la valeur .....</b>	<b>28</b>
3.1	Historique .....	28
3.2	Champs d'application .....	28
3.3	Définition.....	28
3.4	Étapes de l'analyse de la valeur.....	28
3.5	Orientation de l'action et cadre de l'étude.....	29
3.6	Recherche de l'information .....	29
3.7	Analyse fonctionnelle du besoin.....	31
3.7.1	Identifier le besoin.....	31
3.7.2	Validation du besoin.....	32
3.7.3	Recherche des fonctions de service.....	32
3.7.4	Caractérisation et hiérarchisation .....	34
3.7.5	Cahier de charge fonctionnel (CDCF) .....	35
3.8	Recherche des solutions.....	36
<b>4</b>	<b>Justification du choix de différentes solutions technologiques fonctionnelles.....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>41</b>



<b>CHAPITRE - III : CONCEPTION ET RÉALISATION DE PREMIER PROTOTYPE DE COMPOSTEUR ROTATIF .....</b>	<b>42</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>43</b>
<b>2 Descriptif du système.....</b>	<b>43</b>
<b>3 Schéma cinématique de système proposé .....</b>	<b>44</b>
<b>4 Dimensionnement des éléments de composteur rotatif .....</b>	<b>44</b>
4.1 Détermination de l'épaisseur de la paroi du tambour.....	45
4.2 Dimensionnement du système d'entraînement du tambour rotatif .....	47
4.2.1 Détermination du couple nécessaire à l'entraînement du tambour.....	48
4.2.2 Détermination de la puissance mécanique du tambour.....	49
4.2.3 Détermination de la puissance utile de moteur .....	50
4.2.4 Dimensionnement de poulie courroie .....	50
4.2.5 Dimensionnement de l'arbre .....	53
<b>5 Étude du support de composteur rotatif.....</b>	<b>54</b>
5.1 Modèle géométrique .....	54
5.2 Conditions aux limites et chargements .....	55
5.3 Définition du matériau de support .....	56
5.4 Définition de section de support.....	57
5.5 Déplacements et les contraintes.....	57
<b>6 Conceptions des composants de composteur rotatif sous Solidworks©.....</b>	<b>58</b>
6.1 Support ou châssis .....	59
6.2 Tambour rotatif.....	59
6.3 Paliers .....	60
6.4 Extracteur de l'air .....	61
6.5 Model 3 D de composteur rotatif.....	61
6.6 Dessin d'ensemble .....	62
<b>7 Prototype de composteur rotatif à tambour .....</b>	<b>63</b>
7.1 Le processus de fabrication .....	64
7.2 Réalisation de prototype .....	64
<b>8 Conclusion .....</b>	<b>66</b>
<b>CHAPITRE - IV : AMÉLIORATION DE PROTOTYPE DE COMPOSTEUR ROTATIF.....</b>	<b>67</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>68</b>
<b>2 Schéma cinématique de système proposé .....</b>	<b>68</b>
<b>3 Dimensionnement des dispositifs de composteur rotatif .....</b>	<b>69</b>

3.1	Détermination de l'épaisseur de tambour .....	69
3.2	Dimensionnement du système d'entraînement du tambour rotatif .....	70
3.2.1	Modèle mécanique de la puissance pour déplacer les déchets .....	70
3.2.2	Détermination de la puissance de moteur .....	74
<b>4</b>	<b>Étude du support de composteur rotatif.....</b>	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>Conceptions des composants de composteur rotatif sous Solidworks©.....</b>	<b>78</b>
5.1	Support avec les galets .....	78
5.2	Tambour rotatif.....	79
5.3	Ventilateur soufflant et Extracteur de l'air .....	79
5.4	Model 3 D de composteur rotatif.....	80
5.5	Dessin d'ensemble .....	81
<b>6</b>	<b>Partie de commande du système.....</b>	<b>83</b>
6.1	Capteurs de température .....	83
6.2	Capteurs d'humidité .....	84
6.3	Capteur de gaz .....	84
6.4	Carte à microcontrôleur .....	84
6.5	Système proposé pour la partie contrôle.....	85
<b>7</b>	<b>Prototype de composteur rotatif à tambour .....</b>	<b>87</b>
7.1	Le processus de fabrication .....	87
7.2	Réalisation de prototype de composteur rotatif semi-industriel .....	87
<b>8</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>89</b>
	<b>Conclusion générale et perspective .....</b>	<b>90</b>
	<b>Référence.....</b>	<b>92</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>99</b>
	<b>Publications scientifiques.....</b>	<b>109</b>

## **Table des illustrations**

### **Figures**

Figure 1. 1: Compostage en Andain aéré .....	16
Figure 1. 2: Compost système [71] .....	19
Figure 1. 3: Composteur rotatif à bras mécanique [72].....	20
Figure 1.4: Composteur rotatif à bras mécanique tambour [74] .....	21
Figure 1.5: Composteur rotatif à tambour [75] .....	21
Figure 1. 6: Composteur rotatif a tambour KOLLVIK [76] .....	22
Figure 2. 1: Étapes de l'analyse de valeur.....	29
Figure 2.2: Diagramme bête à cornes de composteur rotatif .....	31
Figure 2.3: Diagramme Pieuvre de composteur rotatif.....	33
Figure 2.4: Diagramme de souhaits en % .....	34
Figure 2. 5: Diagramme FAST de FP1 .....	36
Figure 2.6: Diagramme FAST de FC1 .....	37
Figure 2.7: Diagramme FAST de FC2 .....	37
Figure 2.8: Diagramme FAST de FC3 .....	38
Figure 2.9: Diagramme FAST de FC4 .....	38
Figure 2.10: Diagramme FAST de FC5 .....	39
Figure 2.11: Diagramme FAST de FC6 .....	39
Figure 2.12: Diagramme FAST de FC7 .....	40
Figure 3. 1: Dessin du tambour .....	43
Figure 3. 2: Schéma cinématique de système proposé.....	44
Figure 3. 3: Pression relatif $p_i$ est appliquée à l'intérieur du cylindre.....	45
Figure 3. 4: Effort élémentaire sur un $d\vec{f}$ élément de surface da.....	46
Figure 3. 5: Enveloppe en équilibre .....	46
Figure 3. 6: Mouvement des déchets organiques dans le tambour.....	48
Figure 3.7: Nomenclature et géométrie de la courroie .....	51
Figure 3. 8: Modélisation de l'axe de rotation .....	54
Figure 3. 9: Numérotation des nœuds de châssis .....	55
Figure 3.10: Numérotation des poutres de la structure .....	55

Figure 3. 11: Définition des conditions limites et charges .....	56
Figure 3.12: Les déplacements dans le support du composteur .....	57
Figure 3.13: Diagramme de distribution des contraintes normales dans la structure contrainte maximale affichée égale 21.941 MPa .....	58
Figure 3.14: Coefficient de sécurité (cs) .....	58
Figure 3.15: Vue 3D de châssis de composteur rotatif .....	59
Figure 3.16: Vue 3D du tambour rotatif.....	60
Figure 3.17: Vue 3D du palier.....	60
Figure 3.18: Vue 3 D Assemblage de système d'aération .....	61
Figure 3.19: Vue 3D de composteur rotatif.....	62
Figure 3 20: Dessin d'ensemble de composteur rotatif.....	63
Figure 3.21: Palier de l'axe creux .....	64
Figure 3.22: Palier de l'axe plein.....	65
Figure 3.23: Composter à tambour rotatif réel .....	65
Figure 4.1: Schéma cinématique de Système proposé .....	68
Figure 4.2: Mouvement des matières dans la section transversale du composteur.....	70
Figure 4.3: Angle de repos des déchets organiques .....	72
Figure 4.4: Régression de $\sin\theta$ on $\theta$ (for $5^\circ < \theta < 90^\circ$ ) .....	72
Figure 4.5: Régression de $\sin^3\varepsilon$ sur $f$ (pour $0 < f < 0,5$ ). .....	73
Figure 4.6: charge appliquée sur un galet.....	76
Figure 4.7: Diagramme de distribution des contraintes normales dans la structure contrainte maximale affichée égale 47.831 MPa .....	77
Figure 4.8: Les déplacements dans le support du composteur .....	77
Figure 4.9: Vue 3D de châssis de composteur rotatif .....	78
Figure 4.10: Vue 3D du tambour rotatif.....	79
Figure 4.11: Vue 3 D Assemblage de système d'aération .....	80
Figure 4.12: Vue 3D de composteur rotatif.....	80
Figure 4.13: Dessin d'ensemble de composteur rotatif.....	82
Figure 4.14: Schéma fonctionnel du système mécatronique.....	83
Figure 4.15: Organigramme de fonctionnement .....	86
Figure 4. 16 : réalisation de prototype dans l'atelier.....	88
Figure 4.17: Prototype Réal de composteur rotatif à tambour .....	88

## **Tableaux**

Tableau 1. 1: Liste de quelque matières compostables et non compostables .....	9
Tableau 1. 2: Fiche technique de composteur HOTROT .....	20
Tableau 1. 3: Fiche technique de composteur JK 5100.....	21
Tableau 1.4: Fiche technique de composteur BIG HANNA.....	22
Tableau 1.5: Fiche technique de composteur KOLLVIK .....	23
Tableau 1.6: Etude comparative de différents types de composteurs .....	24
Tableau 2.1: Méthodes de conception : avantages et inconvénients .....	27
Tableau 2. 2: Information pour la machine de traitement des déchets organiques .....	30
Tableau 2.3: les fonctions de services .....	33
Tableau 2.4: Tableau de tricroisé .....	34
Tableau 2.5: Cahier de charge fonctionnel.....	35
Tableau 3.1: Couple résistant à $\theta=45^\circ$ .....	49
Tableau 3.2: Puissance mécanique de rotation.....	50
Tableau 3.3: Puissance motrice .....	50
Tableau 3.4: Caractéristique technique de motoréducteur CB 3233.....	50
Tableau 3.5: Diamètre réceptrice .....	52
Tableau 3.6: Tableau 3.6:Puissance brute .....	52
Tableau 3.7: Puissance nette .....	52
Tableau 3.8: Puissance effective .....	53
Tableau 3 9: Nombre de courroies .....	53
Tableau 3.10 : Valeur de diamètre de l'arbre .....	54
Tableau 4. 1: Valeur de l'épaisseur.....	69
Tableau 4. 2: Puissance mécanique pour déplacer les déchets organiques .....	74
Tableau 4. 3: Puissance motrice .....	74
Tableau 4. 4: Caractéristique technique de motoréducteur CB 3233.....	75

## **Introduction générale**

Au Maroc comme dans tous les pays en développement, la décharge est la méthode courante d'élimination des déchets ménagers et assimilés il y a une énorme quantité de déchets produite chaque jour et qui contient plus de 75 % de la teneur en fraction. Si cette fraction n'a pas été traitée à temps, elle commence à se décomposer naturellement en l'absence d'oxygène dans les décharges. La matière organique commence à générer du biogaz composé principalement de dioxyde de carbone et de méthane qui sont les causes principales du réchauffement climatique. Ajoutez à cela le flux de lixiviat qui contamine la nappe phréatique. En effet le compostage est la technique parfaite de traitement des déchets, c'est le premier moyen employé par nos ancêtres, en raison de ses avantages connexes, c'est aussi le moyen naturel de recyclage des résidus organiques tels que l'hygiénisation, la rentabilité et la transformation des déchets en produits à valeur ajoutée, le compostage est donc un traitement fiable des déchets organiques qui pourrait être utile pour réduire les effets négatifs qui peuvent résulter de l'épandage de déchets organiques sur le sol ,car il fournit des produits désinfectés et stabilisés qui pourraient être employés comme source potentielle d'engrais organique ou dans le sol.

À travers le présent travail de thèse, nous espérons contribuer à cette problématique d'actualité qui d'assurer le traitement efficace des déchets organiques. Ces déchets nécessitent de composter la matière à la source, ce qui réduit les coûts de tri et de transport, par la technique de compostage rotatif qui lui permet d'être utilisé dans des zones urbaines très restreintes, avec l'intégration des systèmes de contrôle de tous les paramètres influençant le processus de compostage tel que l'humidité, la température ,aération, cette technologie innovante incorporée avec une stratégie de collecte à la source permet aussi de réduire le poids de la matière dégradée par compostage à la source et par conséquent une réduction des coûts de transport ,le présent travail propose une conception basée sur technologie innovante .

La conception de la machine de compostage rotatif sera réalisée à l'aide des études basées sur les propriétés de la matière organique ainsi que sur des logiciels pour tester virtuellement la conception. Le travail sera achevé par la fabrication locale d'un prototype permettant le test et la validation de la conception.

Ce présent mémoire synthétise les travaux de thèse qui ont été réalisés au sein de l'équipe ecoconception, énergie et innovation du laboratoire d'ingénierie du management industriel et d'innovation (LIMII) à la faculté des sciences et techniques de settat, de l'université Hassan

premier. Il est constitué, en plus de cette introduction, de quatre chapitres et d'une conclusion générale.

Ainsi, dans ce travail nous allons commencer, dans le premier chapitre, par dresser les différents types de compostage, nous procédons par la suite à une étude comparative entre différentes techniques de compostage afin de souligner les avantages et les limites de chaque technique. Cette étude nous a offert la possibilité de choisir un type adéquat pour résoudre le problème de traitement en local des déchets organiques.

Quant au deuxième chapitre, il traite le volet de conception de système de composteur rotatif qui sert à chercher les solutions constructives pour concevoir ce système en se basant sur la méthode de conception analyse de valeur, qu'est une méthode de compétitivité, créative et organisée, visant la satisfaction du client r, afin de pouvoir réduire les coûts de production, en passant par différentes étapes notamment : étude de besoin, recherches des éléments extérieurs en relation avec le système et recherche des solutions techniques.

Le troisième chapitre présente notre contribution à la réalisation de prototype de ce système, en s'appuyant sur le dimensionnement des différentes composantes du composteur rotatif qui dépend des caractéristiques des déchets organiques, ainsi que la conception et la simulation via logiciel Solidworks©, en mettant en œuvre les problèmes et les contraintes de premier prototype.

Le chapitre quatre présente les solutions aux problèmes présentés dans le troisième chapitre, nous avons conçu un nouveau système semi-industriel vis avis aux exigences cités dans le chapitre précédent, qui supporte une grande quantité des déchets organiques. Sur ce point nous avons adopté un modèle simplifié qui permet de calculer la puissance mécanique pour déplacer les déchets et des propositions concrètes de contrôle des paramètres de compostage ,en ce qui concerne cette dernière partie de ce chapitre elle aborde les étapes de fabrication de prototype de ce composteur rotatif semi-industriel en collaboration avec la société BIODÔME, les tests de ce prototype ont été régulièrement effectués au sein de centre de l'innovation de l'université Hassan premier .

Finalement, nous présentons une conclusion générale qui récapitule l'ensemble des étapes de notre recherche et qui ouvre de nouvelles perspectives au présent travail.

**CHAPITRE -I : ÉTAT DE L'ART SUR LE  
COMPOSTAGE ET TECHNOLOGIE DE  
COMPOSTEUR ROTATIF**



## **1 Introduction**

Suite à la croissance de développement démographique, et économique qu'a connue notre pays ces dernières décennies, la production des déchets devient de plus en plus accrue, et le problème de gestion des déchets demeure un défi à relever. L'élimination de ces déchets nécessite le recours aux technologies performantes, et qui prennent en compte la croissance des populations, les préoccupations environnementales, et le développement durable. En effet, les stratégies de gestion des déchets doivent prendre en considération la réduction des matériaux destinés aux décharges finales afin de minimiser les risques de la pollution de l'environnement à savoir : les émissions du gaz à effet de serre, la contamination de la nappe phréatique par le lixiviat, le dégagement des odeurs désagréables, la consommation de l'espace, etc. Pour atteindre ces objectifs, le compostage reste la meilleure solution à adopter, vu les avantages qu'il procure vis-à-vis de l'environnement, et de l'écosystème en général. Le produit obtenu « le compost » grâce au compostage est riche en nutriments et présente une opportunité pour les agriculteurs pour fertiliser et améliorer la qualité des sols cultivés. Par ailleurs il existe différentes techniques et méthodes de compostage depuis l'antiquité, et qui ne cessent de s'améliorer à travers le temps. Ceci constitue une solution efficace et performante pour la valorisation des déchets putrescibles, surtout dans les pays en développement.

## **2 Compostage**

Le compostage est une technique ancestrale, qui a permis de recycler la matière organique pour pallier au manque de sources de nutriments externes et à la dégradation des sols. Aujourd'hui, le compostage représente un moyen de gestion des déchets et une solution pour la sauvegarde de l'environnement. Ainsi cette technique de traitement des déchets apparaît comme alternative à l'incinération ou au stockage.

### **2.1 L'historique de compostage**

Le compostage n'est pas seulement une question d'époque moderne. Cette pratique a eu lieu il y a longtemps. Les premiers documents attestent qu'avant l'introduction des systèmes d'égouts modernes, les principaux engrais étaient le fumier animal et les composts de déchets de jardin et de cuisine. Le compostage existait il y a 10 000 ans dans l'empire akkadien, situé dans l'Irak actuel. Lorsque les citoyens ont remarqué que leurs plantes poussaient mieux dans les régions où il y avait du fumier, ils ont commencé à mettre du fumier dans leur sol. L'histoire du compostage indique également que les premiers agriculteurs écossais, à l'âge de pierre, avaient

l'habitude de mettre du fumier et du compost végétal dans leur sol. En Asie ancienne, il est prouvé que les outils trouvés dans les sites néolithiques du nord de la Chine présentaient des caractéristiques similaires à ceux utilisés par les agriculteurs. Les écrits anciens et les premiers textes hindous montrent que les anciens fermiers chinois avaient l'habitude de mettre des os cuits, des débris de vers à soie et du fumier dans leur sol. Les Grecs, les Romains et les Égyptiens utilisaient également le compostage. Ils prenaient de la paille dans les étables et la mettaient dans le sol. Les cendres, la paille, le chaume, les balles et l'herbe servaient à enrichir le sol et le sang des animaux était utilisé comme engrais. En Égypte, après avoir observé les capacités de compostage des vers, Cléopâtre a promulgué une loi qui stipule que quiconque retire des vers de terre d'Égypte est puni de mort. Au cours du 12<sup>ème</sup> siècle, le manuel Kitab Al Falah écrit par Ibn AL Awam a donné des informations détaillées sur le compostage et l'utilisation du fumier. En Amérique, les Amérindiens étaient connus pour le compostage et le pratiquaient selon trois méthodes. La première méthode était le compostage en feuilles, où les matières compostables étaient déposées en couches sur le sol. La deuxième méthode consistait à composter pendant la plantation, où les nutriments étaient les parties de poissons ou d'autres parties d'animaux. La troisième méthode était les boules de semence. Dans cette méthode, les graines étaient mises en boules dans de l'argile et des matériaux compostables, ce qui les maintenait humides, puis ils étaient jetés pour planter les graines. Le compostage était depuis lors connu comme un moyen d'économiser de l'argent. En 1943, George Washington Carver a déclaré : "Faites votre propre engrais, le compost peut être fait avec peu de travail et pratiquement pas de l'argent". Pourtant, le compostage a rapidement été remplacé au début du XX<sup>e</sup> siècle. Justus Von Liebig, un scientifique allemand, a prouvé en 1840 que les plantes peuvent se nourrir des produits chimiques. C'est pourquoi le mélange de déchets végétaux et animaux a été rapidement remplacé par des engrais, et ce fut le début de la méthode scientifique de l'agriculture. Mais comme toutes les solutions artificielles, les engrais avaient leurs adversaires [1 ,2].

## **2.2 Le compostage moderne**

En 1905, Sir Albert Howard a mis au point la méthode Indore. Après 30 ans de recherche, Howard a trouvé le meilleur compost moderne. Il consiste à alterner des couches de vert, de fumier et de terre jusqu'à atteindre la hauteur souhaitée. Le tas doit être humide et tourné régulièrement pour atteindre la hauteur désirée. Le compost est prêt en trois mois dans des conditions aérobies [3].

### **2.3 Les avantages de compostage**

De nos jours, le compostage est connu pour ses nombreux avantages qu'il comporte :

- La réduction des déchets de jardin et de nourriture représente 30% du flux de déchets et donc en détournant ces déchets des décharges.
- L'amélioration de la porosité de sol.
- L'amélioration de la structure de sol par l'augmentation des agrégats.
- L'amélioration des propriétés physiques de sol, et l'augmentation de son pouvoir tampon.
- L'ajout de matière organique au sol améliore la rétention d'humidité.
- L'ajout de matière organique décomposée au sol nourrit les organismes du sol.
- Le compost fournit une source équilibrée de nutriments qui aide le sol à retenir des nutriments suffisamment longtemps pour que les plantes puissent les utiliser.
- Les plantes d'un compost bien fait auront meilleure apparence, produiront mieux et aura une capacité beaucoup plus grande à lutter contre les maladies.
- Le compostage permet d'économiser de l'argent.
- Le compostage améliore notre alimentation, les plantes auront une bonne quantité de nutriments.

## **3 Principe de compostage**

Le compostage est un processus de transformation des déchets organiques putrescibles, en un produit organique humifié stable, appelé compost [4]. Ce compost doit être stable, hygiénique, semblable à un terreau, et il peut varier selon les caractéristiques qui lui sont attribuées, à savoir : la technologie de compostage adoptée pour sa production, la nature des matières organiques utilisées, etc.

### **3.1 Définition de compostage**

Le compostage est un processus naturel. Il implique toutes les activités de décomposition spontanée dans la nature, comme la décomposition des feuilles ou le vieillissement du fumier animal. Cependant, ce processus prend beaucoup de temps, c'est là que réside l'importance du compostage. De plus, les produits biologiques frais doivent être composés avant de les ajouter au sol, sinon il peut en résulter un changement dans l'écosystème.

Un compost bien fait est brun foncé et sent la forêt. Il est composé de carbone, l'azote, l'oxygène et l'eau.

Ces quatre ingrédients sont obligatoires pour un compostage efficace.

- Carbone : matière brune, fournit de l'énergie et l'oxydation microbienne du carbone produit la chaleur.
- Azote : les fruits et légumes sont utilisés pour cultiver et reproduire plus d'organismes afin d'oxyder le carbone.
- Oxygène : pour l'oxydation du carbone pendant le processus de décomposition.
- Eau : en quantité suffisante pour maintenir l'activité sans provoquer les conditions anaérobies.

La biologie d'un compost est facile à appréhender. En commençant par le cycle du carbone. Les composés carbonés sont la source de l'activité métabolique élevée, ce qui augmente la température pendant le compostage. Alors que le bilan azoté diminue au cours du processus avec une perte de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , ce qui signifie une diminution du rapport carbone-azote (C/N). Les bactéries fixent de l'azote pour remplacer cette perte. Cette activité se produit fortement à la fin de la décomposition et est influencée par la présence d'ammoniac et les températures élevées. La disponibilité de l'oxygène est également cruciale, car le processus est une oxydation biologique. Par conséquent, le compost doit être retourné quotidiennement pour fournir de l' $\text{O}_2$  et permettre la respiration aérobie. Il est important d'éviter que le pourcentage d'oxygène dans le compost ne tombe en dessous de 18 %.

Un autre facteur important du compostage est la température. Contrairement à la croyance populaire qui affirme que des températures élevées sont essentielles pour un bon compost, une température excessivement élevée ralentit l'activité de décomposition des matières organiques. En effet, seules quelques bactéries peuvent fonctionner au-dessus de  $70^\circ\text{C}$ . Dans le meilleur des cas, la température variera entre  $45$  et  $50^\circ\text{C}$ .

Il est également très important de maintenir un niveau d'humidité adéquat. Il diminue la résistance structurelle des matières organiques et accélère par conséquent le processus de décomposition.

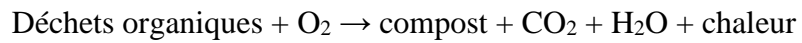
Dans un niveau de précision plus élevé, le rapport C/N doit être compris entre 25 et 35. Si le rapport est inférieur à 20, l'azote est perdu et l'ammoniac est libéré, ce qui entraîne une mauvaise odeur dans le compost.

Cependant, si le rapport C/N est supérieur à 40, le processus de décomposition ralentit.

La taille des matériaux est également un facteur important. Pour une décomposition rapide et efficace, la taille des matériaux compostables doit être comprise entre 1,3 et 5 cm. Si les

matériaux sont trop grands, il est important de réduire leur taille. La taille ne doit pas être très petite non plus, sinon cela provoquera un lac d'aération [5].

La réaction chimique suivante résume le processus de compostage :



### **3.2 Phases de compostage**

Généralement, le traitement par compostage se fait à travers quatre phases, en fonction de l'évolution de la température :

- La phase mésophile : C'est la phase initiale de compostage, se caractérise par une forte activité microbienne générant une montée rapide de la température de la matière.
- La phase thermophile : Phase durant laquelle, la température continue d'augmenter jusqu'à 75°C, seules les bactéries peuvent survivre à ces températures. La grande partie de la matière organique est perdue sous forme de H<sub>2</sub>O, d'un gaz CO<sub>2</sub>.
- La phase de refroidissement : Elle est caractérisée par une diminution de la quantité de matières organiques, facilement dégradables provoquant un ralentissement de l'activité microbienne. Ceci favorise un refroidissement du compost.
- La phase de maturation : Se caractérise essentiellement par des réactions de biosynthèse de macromolécules organiques, dites molécules humiques. Cette phase de maturation dure jusqu'à l'utilisation du compost. Après l'humification vient l'étape de stabilité.

### **3.3 Les déchets compostables et non compostables**

Les déchets qui contiennent la fraction organique sont souvent dédiés au compostage. Le tableau 1. 1, illustre la liste des déchets compostables, et non compostables

**Tableau 1. 1: Liste de quelque matières compostables et non compostables**

<b>Matières compostables</b>		<b>Matières non compostables</b>
aiguilles à feuilles persistantes	Feuilles vertes	les mauvaises herbes envahissantes
feuilles séchées	déchets de jardin	charbon de bois
cartons d'œufs en papier	fleurs	graisse/huile/graisse
papier journal déchiqueté	légumes	produits laitiers
serviettes en papier	Pelures de fruits	les produits chimiques
les tontes d'herbe séchées	rebuts	Plastiques
Ecorce	marc de café	Plastiques
filtres à café	feuilles/sachets de thé	Métaux
paille	coquilles d'œuf	Verre
sciure de bois (quantité limitée)	Carton (coupé en petits morceaux) plantes d'intérieur mortes	Matière toxique
peluches de séchage / sous vide	sacs en papier brun déchiquetés	

#### **4 Paramètres de compostage**

Le compostage se déroule spontanément dans le milieu naturel, de façon non optimale. Pour en faire un procédé technologique, il est donc nécessaire de connaître parfaitement les différents paramètres physico-chimiques et biologiques qui interviennent pour la production d'un compost de bonne qualité.

##### **4.1 Les micro-organismes**

Haruta et all [6] ont montré qu'une bonne compréhension des successions de communautés microbiennes est primordiale pour la compréhension des changements d'états physiques et biologiques durant le processus de compostage. Les bactéries interviennent à différentes phases

du compostage, et sont généralement responsables de la destruction des produits simples au cours des deux premières phases. Elles sont majoritaires au cours de la première phase. Comme les bactéries, la majorité des champignons sont mésophiles et se développent entre 5°C et 37°C pour dégrader la matière organique surtout au cours de la phase de ralentissement. En plus de ces deux types de microorganismes, on retrouve également dans le compost, des algues, des protozoaires, et des animaux pluricellulaires.

#### **4.2 Paramètres physico-chimiques**

Pour effectuer un compostage optimal, dans les conditions les plus adéquates au développement des bactéries, il faut s'assurer de suivre, et de surveiller les paramètres suivants :

##### **- L'apport en oxygène**

Au cours d'un processus de compostage, la procédure d'aération la plus courante consiste à retourner le compost. Cela rend le matériau de compostage facilement disponible pour une utilisation microbienne et entraîne donc une émission de gaz [7]. Si une meilleure aération aux premiers stades de la dégradation de la matière organique permet de réduire la durée de stabilisation des déchets, une aération ou un retournement excessif pourrait toutefois entraîner la perte de composants vitaux du compostage [8]. Par conséquent, l'optimisation du régime de retournement doit être poursuivie afin de conserver les nutriments pertinents ou d'atteindre d'autres objectifs spécifiques tels qu'un taux d'hygiénisation plus élevé (réduction des agents pathogènes) [9]. Des auteurs ont observé qu'il existe un lien étroit entre la fréquence de retournement et certaines variables physico-chimiques qui pourraient être utilisées comme indicateurs de la maturité du compost [10]. Par exemple, la fréquence de retournement affecte l'azote total, le pH, la teneur en humidité, le rapport C/N, la matière sèche, le carbone total et la température des tas de compost [11]. Lors du Co-compostage des déchets solides municipaux et du fumier de volaille, le mélange des matières premières du compost a permis d'améliorer l'homogénéisation du compost [12]. D'autres chercheurs ont également déclaré que le mélange des matériaux de compostage empêche le compactage, ce qui peut entraîner une mauvaise porosité et une faible répartition de l'air dans le lit de compost [13].

##### **- La température**

La température est l'un des principaux paramètres de surveillance du processus de compostage [14-15-16]. En même temps, la température est également une fonction du processus tel que significative un gradient se produit dans le tas de compostage en raison de la masse non linéaire et les bilans énergétiques [17],[18]. D'après [19] ont observé que le compostage est un

processus exothermique qui dépend de la température initiale et de la biodégradabilité des substrats. Des auteurs ont convenu que la température pendant le compostage pourrait augmenter en raison de l'accélération de la biodégradation de la matière organique par des microorganismes [20]. Cependant, l'efficacité du processus de compostage diminue à mesure que la température augmente [21]. La température est un facteur important pour déterminer l'avantage relatif de certaines populations microbiennes sur un autre. Cela pourrait être attribué à l'effet de la température sur les caractéristiques physico-chimiques des composts et la biodisponibilité du substrat pour les microorganismes de compostage. Chen et al [16] ont en outre estimé que l'évolution de la température pendant le compostage peut être divisée en quatre phases à savoir mésophile, thermophile, stade de refroidissement et de maturation. [13] ont proposé deux stades d'évolution de la température, à savoir le stade thermophile (phase active) et un stade de maturation (caractérisé par une baisse de température). Dans [22] les auteurs ont noté que la phase active du compostage est dominée par les bactéries. La matière organique présente un risque pour la santé des hommes et des animaux parce qu'ils contiennent des organismes pathogènes (par exemple des coliformes fécaux, parasites intestinaux). Selon [23] le compostage à des températures supérieures à 55 °C favorise l'élimination des parasites, des agents pathogènes et assure des conditions sanitaires maximales. Si la phase thermophile dure plus de trois jours, le compost sera exempt de semences de mauvaises herbes et d'agents pathogènes, ainsi que des exigences en matière d'hygiène pourrait être réalisée [24]. Bien que, [25] ont noté que la phase thermophile devrait durer une semaine pour l'élimination complète des agents pathogènes. D'autres ont estimé que les régimes de temps et de température requis pour l'élimination des bactéries coliformes, *Escherichia coli* et autres agents pathogènes varient [26]. Les températures comprises entre 52 et 60 °C sont considérées comme conservant la plus grande activité thermophile dans les systèmes de compostage [27]. Le thermophile est indicatif de la décomposition et de la stabilisation de la teneur initiale en matière organique [28], [29] a souligné que la température optimale est de 40 et 65 °C pour le compostage. Dans [30] les auteurs ont observé le plus grand niveau d'activité thermophile à 54 °C qui se situe dans la fourchette indiquée par [29 ; 31]. Aussi, l'inhibition des thermophiles à faible pH explique les fréquentes phases de retard observées (dans la transition des conditions mésophiles aux conditions thermophiles) à la phase initiale du compostage [22], la température élevée et quantité excessive d'ammoniac peut inhiber la croissance et l'activité des bactéries nitrifiantes dans la phase thermophile [32]. Toutefois, il faut veiller à ce que les températures ne deviennent pas trop élevées (c'est-à-dire plus que 71 °C) parce qu'une chaleur excessive peut détruire les populations microbiennes thermophiles [33 ; 32]. Les températures au cours du



Compostage ne doivent pas dépasser 60 et 65 °C, si non cette température tuerait presque tous les microorganismes et va faire cesser le processus [33]. Dans [34] les auteurs ont en outre expliqué que des températures supérieures à 65 °C pouvaient inactiver les champignons, les actinomycètes et la plupart des bactéries qui sont essentielles à la dégradation pendant les stades thermophiles ; cela ne permet de développer que des bactéries sporulées. Dans [35] les auteurs ont observé qu'une chaleur excessive pendant le compostage pouvait également constituer un risque d'incendie.

Les températures de la masse de compostage indiquent le taux de dégradation de la matière organique et montrent en temps réel l'établissement de conditions optimales qui facilitent la dégradation microbienne [8].

#### **- L'humidité**

Le taux d'humidité est un paramètre essentiel du processus de compostage. Il influence le taux d'absorption d'oxygène, l'espace d'air libre, l'activité microbienne et la température du processus [36]. Selon [37] la teneur en humidité optimale pour un compostage efficace dépend du type ou de la forme des déchets. Ils sont d'avis que la teneur en matières premières doit être de 50 à 60 %. [38] a souligné que le taux d'humidité optimale requise pour l'activité biologique pendant le compostage est compris entre 40 et 70 % du poids du compost. Au fur et à mesure que le taux de l'humidité augmente, le taux de diffusion des gaz diminue et Le taux d'absorption d'oxygène devient insuffisant pour répondre aux besoins métaboliques des microorganismes. Le processus de compostage peut devenir anaérobie en raison d'une activité restreinte [39]. Les auteurs [34] ont observé qu'il y avait un lien inverse entre teneur de l'humidité et la température ; si la température augmente, le taux l'humidité diminue. Selon [17] a observé des températures basses lorsque l'humidité était élevée. D'après [40] le teneur en humidité est un moyen utile de mesurer d'autres facteurs importants tels que : la disponibilité de l'eau, qui pourrait ralentir la croissance microbienne de l'activité sous une faible humidité. Au cours du compostage, le taux d'humidité est vital pour la distribution des nutriments solubles nécessaires à l'activité métabolique microbienne [41]. Ils ont estimé que la teneur optimale en humidité dépend des propriétés physico-chimiques et les caractéristiques biologiques des matériaux en cours de compostage. Selon [42], la perte d'humidité pendant le processus de compostage peut être considéré comme une forte indication du taux de décomposition. Une très faible teneur de l'humidité pourrait entraîner une déshydratation précoce pendant le compostage et entraver le processus biologique de décomposition [40]. Dans [40] les auteurs ont également déclaré que l'augmentation de taux d'humidité pendant le compostage pourrait former des bûches d'eau et

cela pourrait donner lieu à des conditions anaérobies qui interrompent les activités de compostage actif. Selon [43] ont noté un taux d'humidité initial de 70 comme optimal pour le compostage du fumier de volaille et de la paille de blé. Selon [44] dans leurs travaux ont maintenu le taux d'humidité à environ 60 et 70% de leur capacité de rétention d'eau pendant toute la période du compostage du lisier de porc. Cependant, lorsque la teneur en humidité dépasse 60 %, le mouvement de l'oxygène est entravé parce que les espaces poreux sont fermés et le processus tend vers l'anaérobiose [45].

#### - **Le PH**

Au début de processus de dégradation, les bactéries acidogènes produit l'acide organiques et le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, pour décomposer le matériel, ce qui provoque une diminution du PH initial. La seconde phase correspond à l'hydrolyse bactérienne de l'azote avec la production d'ammoniac NH<sub>3</sub> associée à la dégradation de protéines, et à la décomposition d'acides organiques [46]. Le PH optimal devient neutre en fonction de la nature du substrat [47]. Le suivi du PH est nécessaire pour évaluer le degré de décomposition biologique et biochimique.

#### - **Le rapport carbone/azote**

Au cours du compostage, les microbes décomposent les composés organiques pour obtenir l'énergie nécessaire au métabolisme et acquérir des nutriments (tels que N, P, K) pour maintenir leurs populations selon [35]. C, N, P et K sont les principaux nutriments nécessaires aux micro-organismes impliqués dans le compostage [48]. Cependant, C et N sont les plus crucial : C est utilisé comme source d'énergie tandis que N est utilisé pour la construction de la cellule [35] ; [49]. Dans [50] l'auteur a déclaré que lorsque la quantité de N est limitant, la croissance microbienne diminue et entraîne donc une lente décomposition du C disponible. Ils ont également ajouté que si la quantité de N présente est supérieure à la quantité de la population microbienne, l'excès d'azote sera volatilisé sous forme de gaz ammoniac. Par conséquent, le rapport C/N est un indicateur du degré de décomposition d'une matière organique ; comme le C est perdu sous forme de CO<sub>2</sub> pendant la bio-oxydation [13]. D'après [51], le rapport C/N diminue pendant le compostage. Ils ont expliqué que La diminution du rapport C/N se produit parce que le taux de La minéralisation du N est inférieur à celle du C organique. L'ajustement des matières premières pour obtenir un rapport C/N de 25 et 30 :1 est ultime pour le compostage actif [32], bien qu'au départ Un rapport C/N de 20 et 40 :1 a régulièrement donné un bon rendement de compostage [48]. Dans [52] ont toutefois adopté le rapport initial C/N entre 25 et 40 et même jusqu'à 50 comme valeurs recommandées pour le compostage. Les rapports C/N

impliquent que les micro-organismes utilisent le C disponible 30 et 35 fois plus vite que la vitesse à laquelle ils convertissent l'azote [50]. Des agents de charge pourraient être utilisés pour ajuster les rapports C/N comme souligné [53,54] si le rapport C/N est plus faible, l'azote sera disponible en excès et sera perdu sous forme de gaz ammoniac, avec l'odeur indésirable qui en résulte. Un rapport C/N plus faible libère une énorme quantité de sel basique soluble, rendant ainsi le sol défavorable à la croissance des plantes [8]. D'après [55] ont observé que le faible rapport C/N de départ donnait une caractéristique malodorante à la matière première du compost. En revanche, un rapport plus élevé signifie que l'azote est insuffisant pour une croissance optimale des micro-organismes, de sorte que le compost reste relativement frais et que la décomposition progresse lentement [35]. Une grande variété d'agents de charge (par exemple, la balle de riz, les copeaux de bois, la sciure et les coquilles d'arachides) sont généralement ajoutés à la matière organique pour améliorer la porosité et le rapport C/N d'avant le compostage [56-53-54]. Le co-compostage du fumier avec de tels agents de charge est une mesure de contrôle des odeurs due à l'absorption de l'excès d'humidité [33]. Dans [53-54] les auteurs ont également signalé l'utilisation de l'urée dans l'ajustement du rapport C/N. Les agents de charge sont également dégradés pendant le processus. D'après [44] ont précisé que le rapport C/N initial affecte la minéralisation de la matière organique ainsi que les processus de nitrification.

## **5 Modes de compostage**

Dans la littérature, la solution la plus efficace pour le traitement et la valorisation des déchets organiques, dans la plupart des pays en développement, est le compostage. Ce mode de traitement présente plusieurs avantages sur le plan économique, et environnemental [57]. Par ailleurs, il existe deux modes de compostage.

### **5.1 Compostage centralisé**

Généralement, ce mode de compostage concerne les grandes installations d'une capacité de traitement supérieur à 100 T/J. Les déchets traités sont soit de type putrescible (fraction fermentescible des ordures ménagères), ou de type bruts (tri compostage). Le système de compostage de type putrescible nécessite une fréquence de collecte élevée de déchets, afin de prévenir l'accumulation de déchets à des niveaux inacceptables, et avant que les déchets biodégradables commencent à se décomposer et à émettre des odeurs désagréables, et des nuisances environnementales. De plus ce système de compostage reste un peu coûteux pour les foyers qui y participent [58]. Ces problèmes amènent le plus souvent au tri compostage de

déchets bruts dans les pays en développements. Le tri compostage est un procédé biomécanique qui permet de produire un compost stable, hygiénique, et qui respecte les normes de qualité en vigueur.

## **5.2 Compostage décentralisé**

Ce mode de compostage est réalisé par les ménages, il nécessite un équipement simple, de faible investissement, et un cout d'entretien réduit. De plus, il permet de réduire les quantités des déchets destinés aux décharges [59 ; 60]. Le compostage décentralisé permet d'épargner les couts de transport et de ramassage des déchets, c'est pour cela que l'investissement dans le compostage décentralisé serait plus judicieux.

## **6 Procédés de compostage**

Le procédé de compostage se compose de plusieurs étapes, à savoir : la réception des matières premières, le tri manuel ou mécanique granulométrique, puis le lancement du compostage. Ces procédés sont nombreux, et se différencient l'un de l'autre par la technique de compostage utilisée.

### **6.1 Compostage en andains**

#### **6.1.1 Andains retournés**

Le compostage en andains consiste à placer un mélange de matières premières dans des tas étroits et longs, appelé andains, ils sont tournés de façon régulière. L'aération de ces andains est effectuée grâce à un mouvement passif, ou naturel de l'air, le taux d'échange avec l'air dépend de la porosité de l'andain. Il existe deux types d'andains à savoir : l'andain en couches constitué d'une superposition de couches de déchets, et l'andain triangulaire sa hauteur allant jusqu'à 2 m et sa largeur d'environ 2,5 à 3 m. Il est possible de constituer des andains d'une hauteur de 3 m pour 7 à 8 m de base et une pente de 70% [61]. Un andain composé de feuilles peut être bien plus grand qu'un andain humide contenant du fumier. Quand l'andain est trop grand, des zones anaérobies apparaissent, et quand l'andain est retourné, les odeurs désagréables se libèrent. Par contre, les andains de petite taille perdent rapidement la chaleur et risquent de ne pas atteindre des températures élevées pour permettre l'évaporation de l'eau et l'élimination des agents pathogènes.

#### **6.1.2 Andains aérés passivement**

Cette méthode de compostage consiste à utiliser des tuyaux perforés enfoncés dans l'andain pour fournir l'air, ce qui élimine la nécessité du retournement. Comme les matières premières ne sont pas retournées quand les andains sont achevés, celles-ci doivent être parfaitement

mélangées préalablement à leur mise en andain. Pour améliorer cette méthode de compostage, il suffit d'utiliser un ventilateur pour injecter l'air dans l'andain, et comme ça on peut contrôler directement le processus de compostage avec des tas plus importants, sans retournement après le début de compostage voir figure 1. 1.

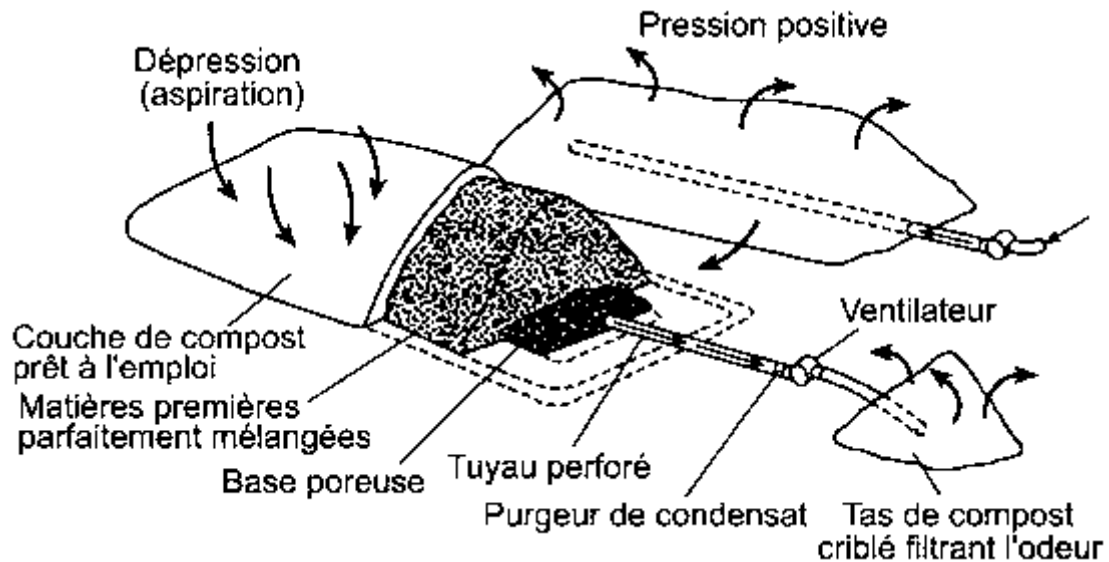


Figure 1. 1: Compostage en Andain aéré

## 6.2 Compostage en récipients

Méthode qui consiste à confiner les matières premières dans un bâtiment, un container, ou un récipient. Pour accélérer ce processus, une aération forcée, et des techniques de retournement mécanique sont envisagées. Cette méthode permet d'éliminer les problèmes climatiques, de maîtriser les odeurs, et de contrôler la température d'une manière efficace [62].

## 6.3 Compostage en lits rectangulaires remués

Ce système de compostage est une combinaison des méthodes d'aération forcée et de retournement périodique. Le processus se déroule dans des longs couloirs appelés lits. Des rails sont situés au-dessus de chaque mur, permettent de supporter et de guider la machine retournant le compost. En effet un chargeur place les matières premières à l'extrémité frontale du lit, au fur et à mesure que la machine avance sur les rails, le compost est retourné et reposé à l'arrière, un système d'aération forcée peut être ajoutée, et un contrôle permanent des paramètres de processus de compostage comme l'humidité, l'oxygénation, et de température est assuré, ainsi les émissions de gaz sont captées et traitées par des unités de désodorisation.

## 6.4 Lombricomposteur

C'est un type de composteur inventé et destiné spécialement aux appartements, il permet de transformer la matière organique en terreau ou en humus qui s'appelle lombricomposteur, grâce à un procédé naturel de bio-oxydation appelé lombricomposteur. Le processus de compostage

se développe sous l'action combinée des micro-organismes mésophiles et des vers. Ces vers se nourrissent de pourriture de végétation, de compost, et de fumier. Ils mangent les déchets organiques et environ 40% à 60% de ce qu'ils consomment ressort sous forme de déjections. Cependant cette méthode reste insuffisante pour éliminer une quantité importante de déchets organiques, et présente l'inconvénient de dégagement des odeurs désagréables, ce qui rend l'utilisation de ce type de compostage chez soi n'est pas évident [63].

## **6.5 Compostage en bac plastique ou de bois**

### **6.5.1 Bac à compost en plastique**

Ce type de composteur est généralement de forme rectangulaire, il nécessite peu de place et occupe une surface assez faible, il permet de faire un compost dans un délai long d'environ 5 mois ou 6 mois. L'utilisation de ce type de composteur présente plusieurs inconvénients comme le séchage du compost, ou l'excès d'humidité ce qui entraîne une production d'un mauvais compost [64].

### **6.5.2 Bac à compost en bois**

Plus esthétique que les bacs en plastique, protège le matériau des effets due aux intempéries, mais il présente aussi l'inconvénient de séchage et du cout élevé, ainsi il est moins résistant à l'humidité et à la chaleur, et il produit un compost de faible qualité [64].

## **6.6 Compostage en tambour rotatif**

Le composteur rotatif est une machine sous forme d'un tambour rotatif, qui permet de minimiser le temps de compostage d'une manière efficace, grâce aux conditions de mélange et d'aération qui offre, de plus il permet de traiter les déchets biodégradables, et offre un compost stable et mature. Le tambour rotatif présente un système performant de compostage décentralisé, et par conséquent l'utilisation de ce composteur permet de réduire les couts de la collecte et de transfert des déchets, ainsi il donne l'occasion aux stations de compostage centralisé de profiter des fonds épargnés grâce au compostage décentralisé [65].

Plusieurs études ont été mené sur les systèmes de compostages en andains ou en pile statique à aération forcée ou non, soumises à des conditions expérimentales changeantes à cause du météo, ces études ont montré que ce type de système est inefficace, vue la difficulté de contrôle des paramètres du processus de compostage, ce qui implique la nécessité d'envisager d'autres technologies qui seront plus efficaces. Par conséquent ces mêmes études ont recommandé l'utilisation du tambour rotatif, et l'ont considéré comme une technologie très efficace, et viable pour le compostage de différents types de déchets organiques. Le compostage en tambour rotatif assure l'agitation, l'aération et le mélange du compost, afin de produire rapidement un compost

stable, et riche en nutriments, sans générer des odeurs désagréables ce qui prouve sa performance technologique et opérationnelle. Il est recommandé d'adopter une fréquence de rotation du tambour rotatif environ deux fois par jour, et ce dans le but de garantir les conditions de stabilité du compost, de plus le retournement expose le matériau de compostage à la colonisation microbienne, et volatilise l'ammoniac qui s'est accumulé dans les espaces vides du compost. Différents types de déchets peuvent être décomposés efficacement dans le tambour rotatif [67-68]. Dans [69], les auteurs ont effectué une étude comparative concernant l'utilisation de différents compostages. Ainsi, les auteurs dans [41] ont suggéré le compostage dans le tambour rotatif, parce qu'il permet de conserver les nutriments dans le compost, et diminue la teneur en métaux lourds, ce qui favorise l'utilisation de ce compost dans l'agriculture. Ils ont affirmé aussi que cette méthode de compostage reste la meilleure méthode d'élimination et de gestion efficace des déchets organiques.

## **7 Technologies de composteur rotatif**

Les composteurs rotatifs sont généralement constitués d'un cylindre métallique de différentes tailles suivant les modèles. Le compostage s'effectue sous enceinte fermée avec un brassage automatisé. Un boîtier de commande gère la mise en route, le temps de rotation et la fréquence. L'utilisation du composteur rotatif permet de contrôler facilement les paramètres de compostage, à savoir la température qui doit atteindre un niveau élevé pendant quelques jours afin d'éliminer les agents pathogènes, l'humidité qui est contrôlé facilement par l'alimentation en air humide, et par la recirculation du lixiviat, et les conditions aérobies qui ne doivent pas être excessives ou insuffisantes pour ne pas affecter la décomposition. Le composteur rotatif électromécanique contient un mécanisme de rotation qui est constitué habituellement d'un moteur relié à un axe de rotation, une vanne qui permet de pomper l'air atmosphérique au cas de besoin, un rotamètre pour contrôler le débit d'air, un thermocouple qui indique la température des biodéchets à l'intérieur du tambour rotatif, et un orifice d'évacuation de lixiviat. Ce type de système est tourné tous les jours [66].

### **7.1 Les types de composteurs rotatifs**

Le composteur rotatif existe en une multitude de modèles de différentes tailles, avec différents systèmes de rotation ou d'agitation des déchets, avec une ou plusieurs chambres.

Parmi les types de composteurs rotatifs nous citons composteur à retournement par tambour rotatif et un bras mécanique, composteur à retournement par bras mécanique, composteur à retournement par tambour.

### **7.2 Retournement par tambour rotatif et un bras mécanique**

Le modèle canadien Compost mécanique permet le compostage de matières solides variées. La rotation du cylindre fonctionne en continue, tandis qu'un peigne à l'intérieur tourne à une vitesse constante afin de détruire les mottes de fumier qui se forment et roulent dans le cylindre. Le composteur est de 6.10 mètres de long et de 1.04 mètres de diamètre intérieur, et une capacité de 2m<sup>3</sup> de mélange par jour. Le cylindre accueille les intrants à une extrémité et le compost ressort à l'autre bout, à l'intérieur du cylindre se trouve un rotor longitudinal sur lequel sont fixées des tiges courtes perpendiculaires au rotor. La rotation est assurée par un moteur à vitesse variable contrôlé par un rhéostat simple à régler. Le cylindre dispose d'un ventilateur qui permet d'évacuer les gaz et la vapeur d'eau [71].



**Figure 1. 2: Compost système [71]**

### **7.3 Retournement par bras mécanique**

Ce type de système basé sur le retournement des déchets organiques par un bras mécanique actionné par un système rotatif, les déchets sont mis dans un tambour fixé sur le support du système.



La figure 1.3 représente le composteur de HOTROT



**Figure 1. 3: Composteur rotatif à bras mécanique de HOTROT [72]**

Le tableau 1. 2 représente la fiche technique de ce système donnée par R. Proix et all.

**Tableau 1. 2: Fiche technique de composteur HOTROT**

<b>Modèle</b>	<b>Longueur (m)</b>	<b>Largeur (m)</b>	<b>Hauteur (m)</b>	<b>Puissance en KW</b>	<b>Capacité de traitement annoncée en (t/j)</b>	<b>Temps de séjours Par jour</b>	<b>Prix en K€ HT</b>
1206	7	1.4	1.6	1.5	0.3-0.5	2 à 3 Sans Maturation	100
1509	11	2	2.1	3	1.3-1.5	2 à 3 Sans Maturation	190- 250
1811	13	2	2.3	5.5	2.2-2.7	2 à 3 Sans Maturation	220- 290
3518	22	5	4.25	37	10-12.5	2 à 3 Sans Maturation	900- 980

La figure 1.4 représente le composteur JK 5100



**Figure 1.4: Composteur rotatif à bras mécanique tambour [74]**

Le tableau 1. 3 représente la fiche technique de ce système donné par [73]

**Tableau 1. 3: Fiche technique de composteur JK 5100**

Modèle	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Capacité de traitement annoncée en (t/j)	Temps de séjours par semaine	Prix en K€ H T
JK 5100	3	1.2	1.5	0.05	2 à 3 Sans Maturation	20

#### 7.4 Retournement par tambour rotatif

Ce type de système basé sur le retournement des déchets organiques par tambour actionné par un système rotatif. Les déchets sont mets dans un tambour rotatif avec des chicanes à l'intérieur pour le mélange et le brassage des déchets.



**Figure 1.5: Composteur rotatif a tambour [75]**

Le tableau 1. 4 représente la fiche technique de ce système est donnée par [73].

**Tableau 1.4: Fiche technique de composteur BIG HANNA**

Modèle	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Puissance en KW	Capacité de traitement annoncée en (Kg/j)	Temps de séjours en semaine
T40	1.935	0.880	1.470	0.12	10-15	8 à 10
T60	2.320	1.080	1.550	0.37	20-35	8 à 10
T120	3.820	1.080	1.550	0.37	40-70	8 à 10
T240	4.800	1.400	2.070	0.55	55-170	8 à 10
T480	6.408	2	2.195	1.1	115-340	8 à 10

- Exemple KOLLVIK de la société Kollvik Advanced Solution figure 1. 6 :



**Figure 1. 6: Composteur rotatif a tambour KOLLVIK [76]**

Le tableau 1. 5 représente La fiche technique de ce système est donnée par [73]

**Tableau 1.5: Fiche technique de composteur KOLLVIK**

Modèle	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Puissance en KW	Capacité de traitement annoncée en (l/mois)	Temps de séjours en Semaines	Prix sans broyeur en K€ H T
BIOCOMP 1	3.5	2.1	2	0.12	1300	3-4 plus une semaine maturation	25
BIOCOMP 1CM	5	2.1	2	0.37	2300	3-4 plus une semaine maturation	34
BIOCOMP 3	4.5	2.1	2	0.37	3600	3-4 plus une semaine maturation	38
BIOCOMP 3CM	6	2.1	2	0.55	5000	3-4 plus une semaine maturation	48
BIOCOMP 5	6.5	2.1	2	1.1	5500	3-4 plus une semaine maturation	46
BIOCOMP 5CM	7.5	2.1	2		7000	3-4 plus une semaine maturation	58
BIOCOMP 12/40	6.5	2.2	2		8000	3-4 plus une semaine maturation	75
BIOCOMP 12/40 CM	8	2.2	2		100000	3-4 plus une semaine maturation	90

### 7.5 Approche comparative des types de composteurs rotatifs

Selon les types de composteurs rotatifs industriels [72-74-76] qui existent dans le domaine de compostage pour le traitement des déchets organiques, on a mis en évidence les trois méthodes pour brassage des déchets, ainsi que le temps de traitement varie de méthode à l'autre et de système à l'autre, le contenir de déchets dans toutes les méthodes par un tambour.

Le système de brassage par bras mécanique consomme de l'énergie électrique plus qu'un système à tambour, en revanche le temps de traitement est variable qui ne dépend pas de type de composteur choisi. Les systèmes selon [72-74-75] donnent un intervalle de temps de traitement sans maturation, c'est-à-dire que le système a pour but de mélanger et réduire la taille des déchets dans un temps réduit ,Le système [76] purement industriel dans zone rurale le temps de séjour, le coût de tous les composteurs industriels est élevé qui ne supporte pas par les pays en développement comme le Maroc et ne résoudre pas le problème de traitement locale

des déchets, le problème major c'est le traitement locale des déchets par un compostage décentraliser avec l'accélération de l'opération de compostage comme les composteurs rotatifs ainsi l'élimination de odeurs pour cela il faut adapté cette technologie de compostage rotatif à tambour dans les zones urbain .

**Tableau 1.6: Etude comparative de différents types de composteurs**

Types de composteur rotatif		Capacité de traitement annoncée	Temps de séjours par semaine	Contraintes Techniques	Contraintes économiques
Retournement par bras mécanique	Hotrot	De 0,3 à 12,5 t/jour	2 à 3 semaines et 3 à 4 semaines de maturation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consommation de l'énergie électrique</li> <li>- Système centralisé</li> <li>-Les zones mortes</li> <li>-Temps de récupération de compost est très long</li> <li>-Maturation par andain</li> </ul>	Coût très élevé (100000 à 900000 € HT)
	Joraform	0,05 t/j	2 à 3 semaines sans maturation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consommation de l'énergie électrique</li> <li>Possède des zones mortes</li> </ul>	Coût très élevé (20000 € HT)
Retournement par tambour rotatif	BIG HANA	De 10 à 340 Kg/J	8 à 10 semaines	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La solution des guidages de Tambour est très couteuse</li> <li>-L'usure des fonds de tambour par frottement</li> </ul>	Coût très élevé (20000à 160000 € HT )
	KOLLVIK	De 1300 à 100000 l/mois	3-4 plus 1 de maturation	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Design complexe</li> <li>-Système centralisé</li> </ul>	Coût très élevé (25000à 900000 € HT )

## **8 Conclusion**

Le compostage est une filière de valorisation des déchets organiques, que les autorités souhaitent développer compte tenu de sa valeur ajoutée sur le plan agronomique, de l'augmentation croissante du gisement de matières organiques brutes et des objectifs élevés de recyclage promus. Le compostage a approuvé son efficacité en tant que technique recommandée pour la gestion des déchets organiques. Ce processus s'effectue à travers plusieurs étapes, et doit respecter certains paramètres comme : la température, l'humidité, l'aération, et l'agitation, et ce dans le cadre d'aboutir à un compostage réussi et efficace. En effet, la connaissance des substrats à composter et la maîtrise du processus sont essentielles pour assurer l'obtention d'un compost sain et intéressant d'un point de vue agronomique. Le processus de compostage peut être réalisé grâce à plusieurs méthodes, et chacune de ces méthodes affecte le processus d'une manière spécifique. En effet, face à cette variété de technologie, le compostage dans le tambour rotatif est évaluée comme la technique la plus durable, et la plus rapide par rapport aux autres technologies, vu l'équilibre et la Co-optimisation de la performance qui offre, en tenant compte des objectifs sociaux, économiques, et environnementaux. Appliquer cette technique dans un milieu urbain reste un défi qui nécessite de choisir la méthode de conception et les outils adéquats afin de prendre en compte tous les éléments en relation avec cette technique de compostage, le prochain chapitre, méthodes et outils pour la conception de cette technique de composteur rotatif bien seront entamés.

## **CHAPITRE- II : METHODES ET OUTILS DE CONCEPTIONS DE COMPOSTEUR ROTATIF**

## 1 Introduction :

Le traitement des déchets organiques par les composteurs rotatifs semi-industriels décentralise pour les milieux urbains la technique la plus adaptée pour les pays en développement, car il réduira le taux des déchets qui sont envoyés dans les décharges, par la technique de traitement local des déchets, la réalisation de ce dispositif pour résoudre ce problème nécessite de connaître de tous les éléments en interactions avec le système et de choisir la méthode la plus efficace et la moins coûteuse pour trouver des solutions adéquates, par conséquent le choix d'une méthode de conception efficace est primordial pour minimiser le temps d'étude et de recherche des solutions, dans ce chapitre nous avons expliqué la méthode de conception choisie et dressé les solutions technologiques .

## 2 Choix de la méthode de conception

Afin de déterminer la méthode de conception la mieux adaptée à notre problème, nous allons procéder à une étude comparative des différentes méthodes de conception. Cela est présenté dans le tableau 2. 1.

**Tableau 2.1: Méthodes de conception : avantages et inconvénients**

Méthode de conception	Avantages	Inconvénients
Reverse Engineering	maîtrise quasi parfaite du fonctionnement du produit; très importante dans un environnement concurrentiel	. Inadapté lorsque le produit n'existe pas encore.
Ingénierie simultanée	maîtrise de la technologie ; intégration de toutes les phases du produit lors de la conception.	Fait allusion à des notions qui ne sont pas toujours connues par le client : insécurité du client.
Conception à coût objectif	optimisation des coûts de conception ; évite le gaspillage ; bonne communication avec le client.	réduction des performances techniques ; ne tient pas compte des aléas de conception.
Ecoconception	minimise l'impact du produit sur son environnement ; recyclabilité des matériaux utilisés.	augmentation des coûts de conception; n'est pas centrée sur la notion du besoin; adaptée pour une certaine classe de produit
Analyse de la valeur	Centrée sur les notions de besoins et de fonctions du produit (performances techniques) ; Favorise le croisement des compétences, Utilisée pour la conception et la reconception du produit ; Prend en compte l'interaction du produit avec l'environnement ; S'assure de la satisfaction du client ; Optimisation des coûts de conception.	Processus de conception assez subjectif ; Demande une disponibilité quasi permanente des participants ; remise en cause du fonctionnement de certains produits (ou processus).



Au vue de tous les critères sus mentionnés, la méthode de conception utilisée pour mettre en place notre composteur rotatif décentralisé pour la gestion des déchets domestiques biodégradables est l'Analyse de la Valeur (AV). Parce qu'elle s'appuie sur plusieurs volets, sur le produit, sur le besoin de l'utilisateur, sur le marché, sur les contraintes de l'environnement, sur le coût et donc sur la valeur de ce produit

### **3 Présentation de l'analyse de la valeur**

#### **3.1 Historique**

Conçue aux Etats-Unis dans les années 60 par Lawrence Delos Miles, Ingénieur à la General Electric, l'analyse de la valeur sert à améliorer les produits existants et concevoir aussi les nouveaux produits.

#### **3.2 Champs d'application**

L'objectif de cette méthode est la conception d'un produit qui s'adapte parfaitement aux besoins de son utilisateur avec un cout plus faible. Elle sert à améliorer la qualité d'un produit sans augmenter le coût et sans réduire le niveau des services attendus.

La méthode peut donc s'appliquer dans toutes les entreprises, l'ensemble des services et tous les secteurs économiques. Lorsqu'il s'agit d'analyse de la valeur de produit, on parle de « Value Analysis », lorsque c'est de l'analyse de la valeur en conception de « Value engineering » et enfin, pour de l'analyse de la valeur en gestion, on parle de « Value Management ».

#### **3.3 Définition**

Selon l'AFNOR, l'analyse de la valeur est une méthode de compétitivité, organisée et créative, visant à la satisfaction de l'utilisateur, par une démarche spécifique de conception, à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire.

La valeur d'un produit est une grandeur qui augmente lorsque la satisfaction du besoin augmente et/ou que le coût du produit diminue. La valeur peut donc être considérée comme le rapport entre la capacité à remplir des fonctions et le coût des solutions.

C'est une approche fonctionnelle, pluridisciplinaire et économique. Elle s'intéresse au produit, repose sur des concepts, s'appuie sur des coûts et s'articule sur des fonctions.

#### **3.4 Étapes de l'analyse de la valeur**

L'analyse de la valeur est une démarche de conception qui conduit au développement d'un produit. Pour ce faire, elle passe par plusieurs étapes d'égale importance.

Ces étapes sont illustrées dans le diagramme de la figure 1.2.

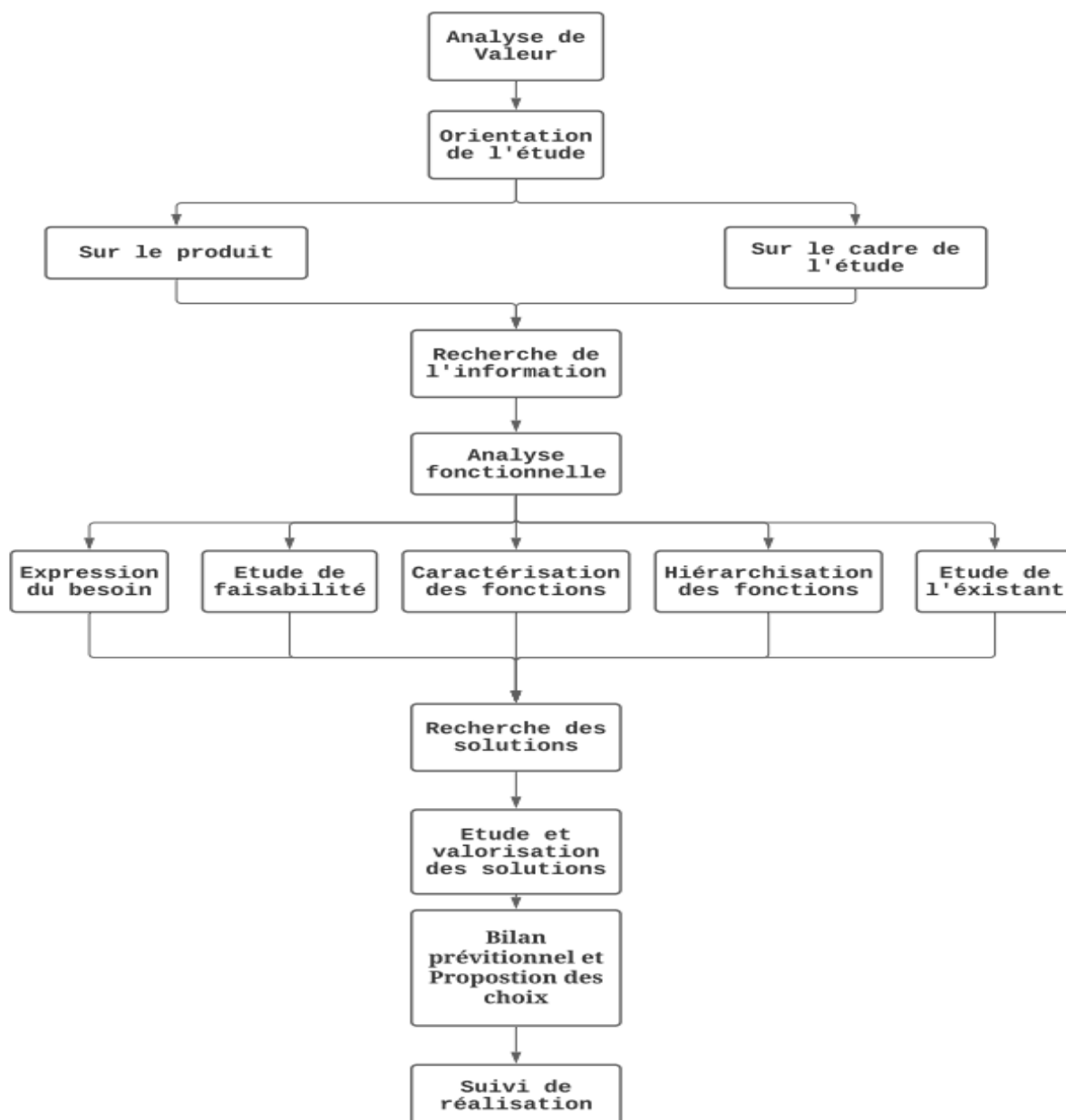


Figure 2. 1: Étapes de l'analyse de valeur

### 3.5 Orientation de l'action et cadre de l'étude

La machine de compostage rotatif que nous allons concevoir est une contribution à la gestion des déchets organiques par fermentation aérobie.

### 3.6 Recherche de l'information

Après avoir identifié les causes et les conséquences de la mauvaise gestion des déchets organiques dans le monde, et en particulier dans les pays en développement comme le Maroc, et après avoir établi que le problème est réel et que les enjeux sont importants, il est nécessaire

d'utiliser un outil de gestion de la qualité pour structurer l'information afin d'analyser la situation : c'est la méthode QQQQCP.

Certains problèmes ont des solutions évidentes, d'autres sont plus complexes et requièrent Une compréhension profonde de la situation.

La méthode QQQQCP fournit suffisamment d'informations de base sur toutes les dimensions du problème pour en identifier les aspects essentiels. Il adopte une approche d'analyse critique constructive basée sur un questionnement systématique.

Principe : Les questions doivent être posées systématiquement afin de n'oublier aucune information connue.

Après la recherche systématique de réponses aux questions relatives au dysfonctionnement, nous avons pu remplir le tableau de recherche d'informations 2.2.

**Tableau 2. 2: Information pour la machine de traitement des déchets organiques**

Question	Réponse
Quoi ? (le problème est en relation avec quoi ?)	Les maladies contagieuses causées par les déchets, la quantité d'ordures dans une poubelle
Qui? (qui est concerné par le problème ?)	-les gens qui exercent une activité agricole autour de leur maison d'habitation, ayant un espace vert dans les alentours de leur maison ou des fleurs, pratiquant l'horticulture -les municipalités pour réduire les quantités des déchets à mettre dans les décharges. -tout établissement privé ou publique
Où ? (le lieu où ces déchets se produisent)	Au sein de chaque ménage
Quand ? (quand est-ce qu'ils se produisent ?)	Ils se produisent régulièrement, Durant la période de récolte, pendant la production et la consommation des déchets solides
Comment ? (comment le problème évolue-t-il ?)	Accumulation des déchets solides Pollution des nappes d'eaux La partition des odeurs nuisibles dans les décharges
Pourquoi ?	Réduire le volume de déchets solides dans les poubelles, disparition des tas sauvages d'ordures, diminution des mauvaises odeurs. Production de compost mature pour améliorer la fertilité des sols Réduire la quantité des déchets transmis aux décharges

### 3.7 Analyse fonctionnelle du besoin

L'analyse fonctionnelle des besoins est une approche qui consiste à analyser un produit de manière systémique en l'examinant à l'intérieur et à l'extérieur, en accordant une attention particulière aux interactions entre les différents éléments de l'environnement.

Une analyse fonctionnelle passe par trois phases

**Phase 1** : recherche du besoin fonctionnel. L'outil de recherche est appelé « bête à cornes ».

**Phase 2** : Recherche de la fonction service : le principe consiste à étudier le produit pour découvrir et répertorier tous les éléments de l'environnement externe en contact avec le produit.

Pour ce faire, on utilise l'outil « Pieuvre ».

Phase 3 : caractérisation et hiérarchisation

- Caractérisation
  - Mettre en évidence la performance que devra atteindre le produit,
  - Pour chaque fonction de service, rechercher les critères d'appréciation
  - Pour chaque critère d'appréciation, préciser le niveau de flexibilité.
- Hiérarchisation
  - Jugement sur la fonction de service accordée par l'utilisateur

#### 3.7.1 Identifier le besoin

Pour identifier le besoin, on va utiliser la méthode de bête à cornes. Cette méthode repose sur trois questions voir figure 2. 3 .

- À qui le produit rend-il service ?
- Sur quoi le produit agit-il ?
- Dans quel but ?

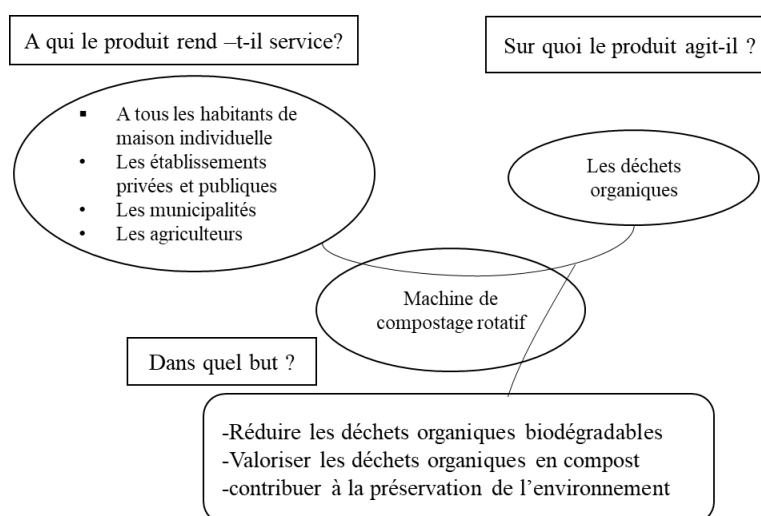


Figure 2.2: Diagramme bête à cornes de composteur rotatif

### 3.7.2 Validation du besoin

Pour valider la mise en place d'un composteur rotatif pour le traitement des déchets organiques il faut répondre aux trois questions illustrées dans le tableau

**Tableau 2. 2 : Information pour la machine de traitement des déchets organiques**

Pourquoi ce produit existe-il ?	Pourquoi ce besoin existe-t-il ?	Qu'est-ce qui pourrait faire disparaître ce besoin (risques et contrainte) ?
Réduire l'impact négatif des déchets sur l'environnement (pollution des sols par les lixiviat, émission de gaz à effet de serre et utilisation d'engrais chimiques).	Pour apporter au sol un engrais naturel et gratuit	Nous ne trouvons aucun risque tant que les déchets se produisent régulièrement et elles s'augmentent de jour au jour. Ainsi que ce composteur contribue à la protection de l'environnement et l'amélioration des propriétés physiques du sol,
	Pour économiser sur le transport et l'incinération des déchets,	
Réduire le tonnage des biodéchets de cuisine et des déchets verts pris en charge par la municipalité	Encourager les gens à composter, afin de réduire la fraction fermentescible des déchets	
Réduire le coût de l'élimination des biodéchets		

### 3.7.3 Recherche des fonctions de service.

Une fonction de service désigne l'action attendue d'un produit pour répondre à un élément du besoin d'un utilisateur donné. Il existe deux types de fonctions de service : la fonction de service principale notée FP et la fonction de service complémentaire ou fonction contrainte notée FC.

La fonction de service principale justifie la raison d'être du produit tandis que la fonction contrainte complète, améliore le service rendu, et adapte le produit aux exigences de l'environnement.

Cette méthode consiste à étudier le produit pour découvrir et dresser la liste de tous les éléments du milieu extérieur en contact avec ce produit, pour cela, on utilise l'outil « Pieuvre ».

Dans le diagramme « Pieuvre » de la figure 2. 4, sont représentées les différentes fonctions à remplir par la machine de compostage rotatif ainsi que les interactions avec le milieu extérieur.

La figure ci-dessous illustre le diagramme de Pieuvre de composteur rotatif

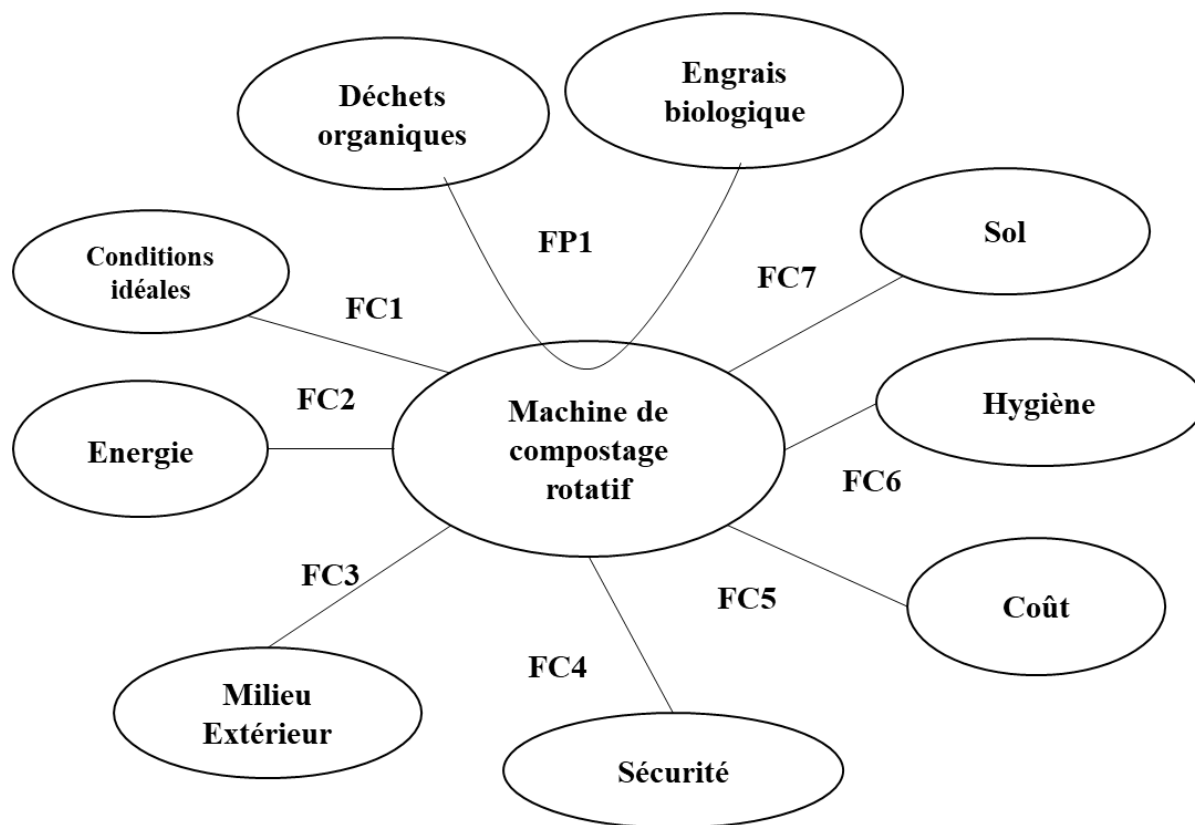


Figure 2.3: Diagramme Pieuvre de composteur rotatif

La formulation des fonctions de services pour le composteur rotatif des déchets organiques est donnée dans le tableau suivant.

Tableau 2.3: les fonctions de services

Fonctions de services	Formulations
FP1	Permettre d'obtenir un engrais biologique de bonne qualité à partir des déchets organiques.
FC1	Respecter les bonnes conditions (température, humidité, pH, aération)
FC2	Alimenter la machine par le réseau électrique
FC3	Résister aux agressions des milieux extérieurs
FC4	Protéger l'utilisateur de la machine
FC5	Être peu coûteux
FC6	Respecter les règles d'hygiène de produit.
FC7	Être facile de se positionner et de se déplacer par rapport au sol

Le concepteur n'accorde pas la même importance à toutes les fonctions de service. Il est donc intéressant de faire une caractérisation et une hiérarchisation des fonctions.

### 3.7.4 Caractérisation et hiérarchisation

Afin de hiérarchiser ses fonctions de service, on utilise la méthode de tri croisé qui permet de comparer ses fonctions une à une et d'attribuer à chaque fois une note de supériorité allant de 0 à 3 (tableau 2. 4) le classement est donné dans la fig 2. 5

0 : Pas de supériorité

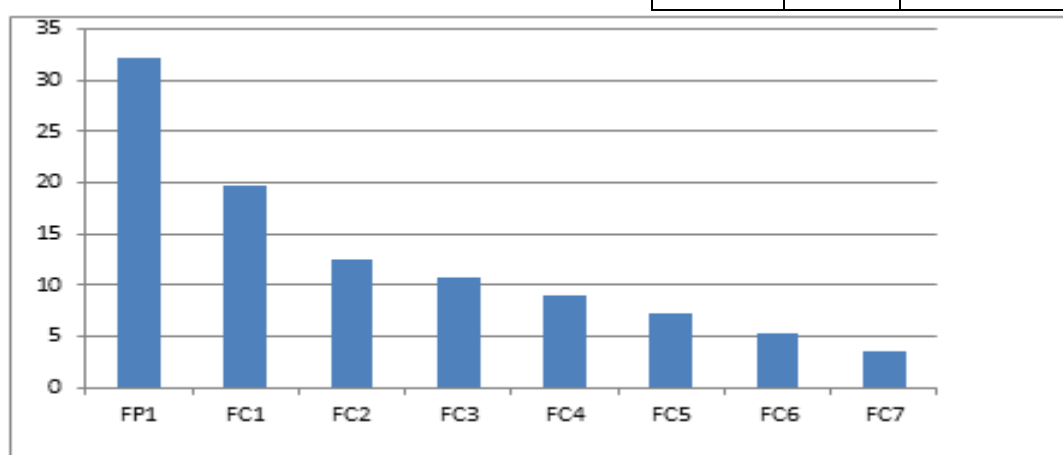
1 : Légèrement supérieur

2 : Moyennement supérieur

3 : Nettement supérieur

**Tableau 2.4: Tableau de tricroisé**

FP1	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	Points	%
FP1	3	2	2	2	3	3	3	18	32,14
	FC1	1	2	2	2	2	2	11	19.64
		FC2	2	2	0	2	1	7	12.5
			FC3	2	1	2	1	6	10.71
				FC4	1	2	2	5	8.93
					FC5	2	2	4	7.14
						FC6	3	3	5.36
							FC7	2	3.57
							<b>Total</b>	<b>56</b>	<b>100%</b>



**Figure 2.4: Diagramme de souhaits en %**

### 3.7.5 Cahier de charge fonctionnel (CDCF)

Le cahier des charges fonctionnel (CDCF) est un document formulant le besoin, au moyen de fonctions détaillant les services rendus par le produit et les contraintes auxquelles il est soumis.

**Tableau 2.5: Cahier de charge fonctionnel**

Fonction		Critère	Niveau	Flexibilité
FP1	Permettre d'obtenir un engrais biologique de bonne qualité à partir des déchets organiques.	-Vitesse de rotation de la cuve horizontale -capacité de tambour	-4 tr/min  -min 0.9 m <sup>3</sup>	+ - 1tr/min
FC1	Respecter les bonnes conditions (température, humidité, pH, aération)	-Température -Aération -humidité -PH	-Entre 20° et 65° -entre 40% et 60% -entre 6.5 et 8	Impératif  Impératif  Impératif
FC2	Alimenter la machine par le réseau électrique	-Tension d'alimentation	-220 V	-
FC3	Résister aux agressions des milieux extérieurs	-Matériaux de système	INOX	-
FC4	Protéger l'utilisateur de la machine	-sécurité	Les normes de sécurité	Impératif
FC5	Être peu coûteux	-Coût	-	-
FC6	Respecter les règles d'hygiène de produit	-Odeur -Bruit	Éliminer	Impératif
FC7	Être facile de se positionner et de se déplacer par rapport au sol	-Déplacement - position	-roulette réglable	-



### 3.8 Recherche des solutions

Lorsque le besoin est déjà identifié, le concepteur doit chercher une solution technique qui lui permet de satisfaire ce besoin. Pour atteindre cette finalité, il faut procéder à une démarche rationnelle qui se traduit par une analyse descendante en convertissant les fonctions de service en fonctions techniques de plus en plus élémentaires, et ceci en se basant sur le diagramme FAST. On présente ci-après les différents diagrammes relatifs aux fonctions de services :

La figure 2. 6 représente le diagramme FAST de la fonction principale FP1

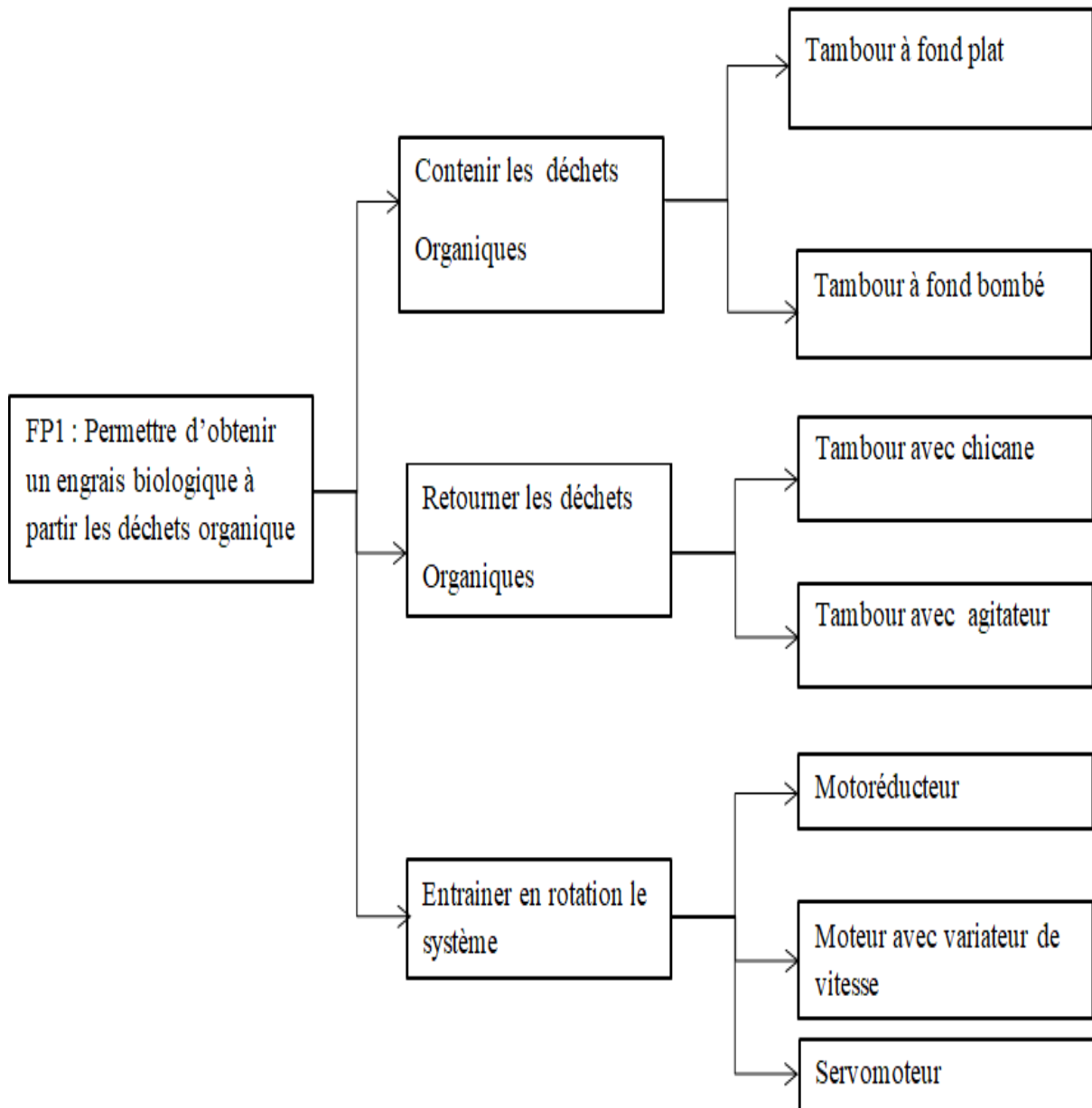
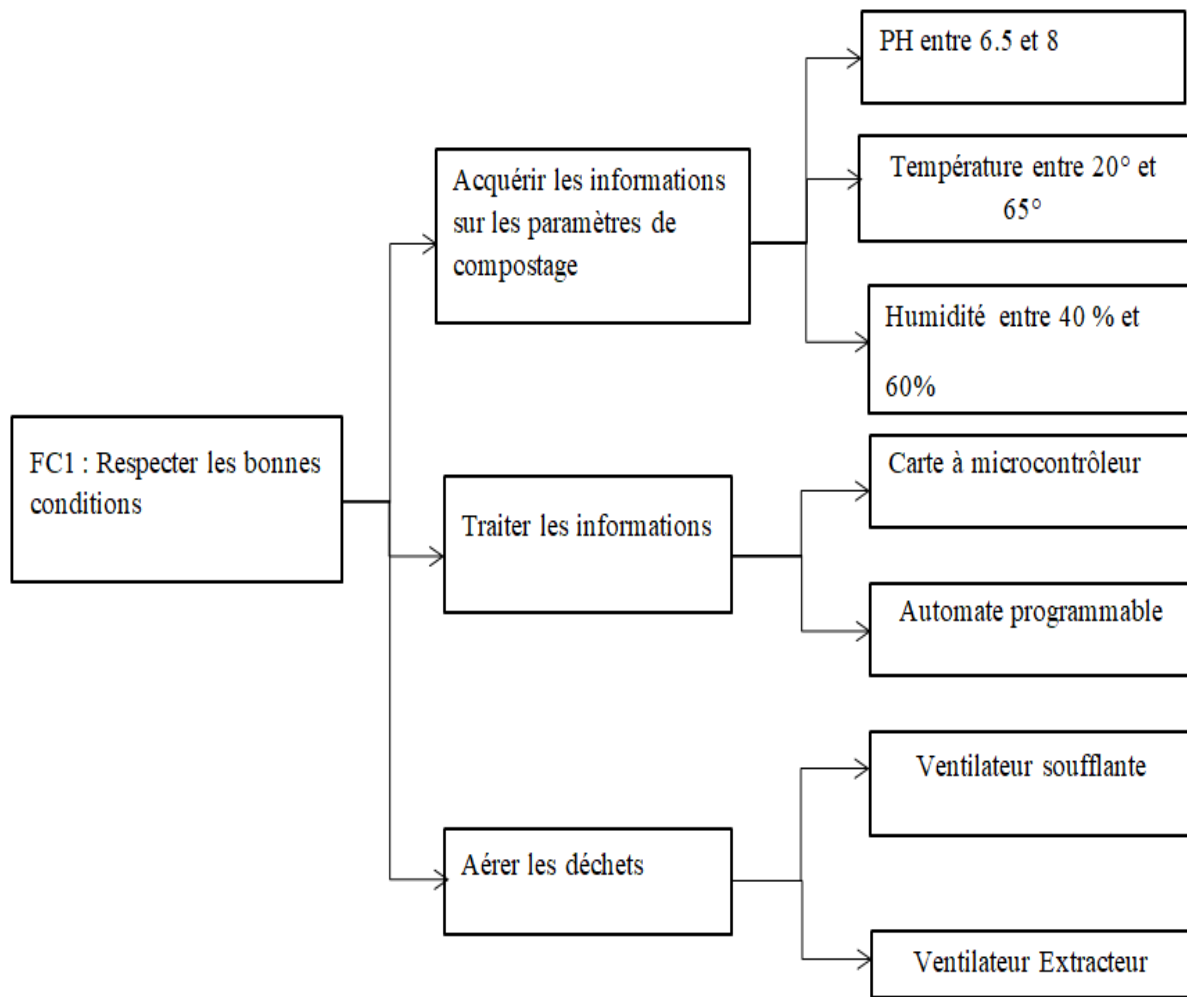


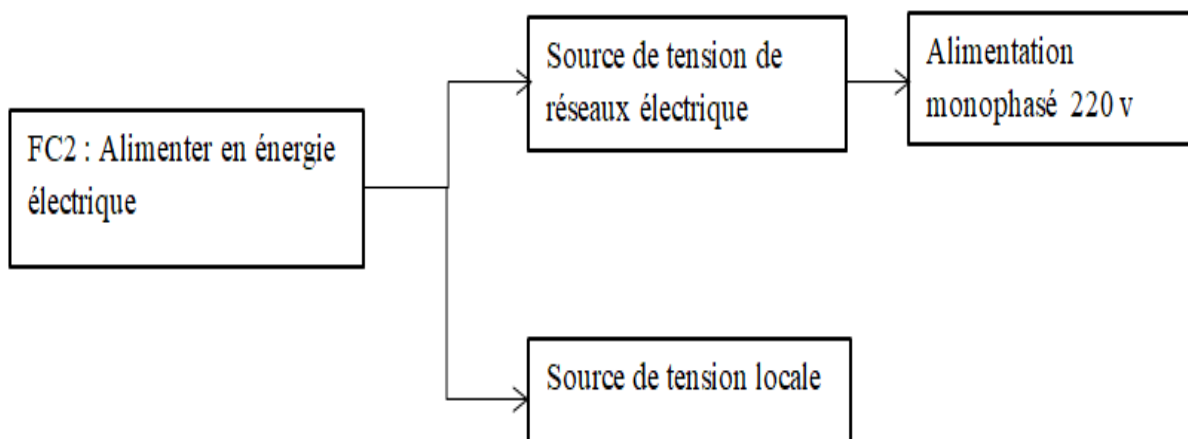
Figure 2. 5: Diagramme FAST de FP1

La figure 2. 6 représente le diagramme FAST de la fonction principale FC1



**Figure 2.6: Diagramme FAST de FC1**

La figure 2.7 illustre le diagramme FAST de la fonction principale FC2



**Figure 2.7: Diagramme FAST de FC2**

La figure 2. 8 représente le diagramme FAST de la fonction principale FC3

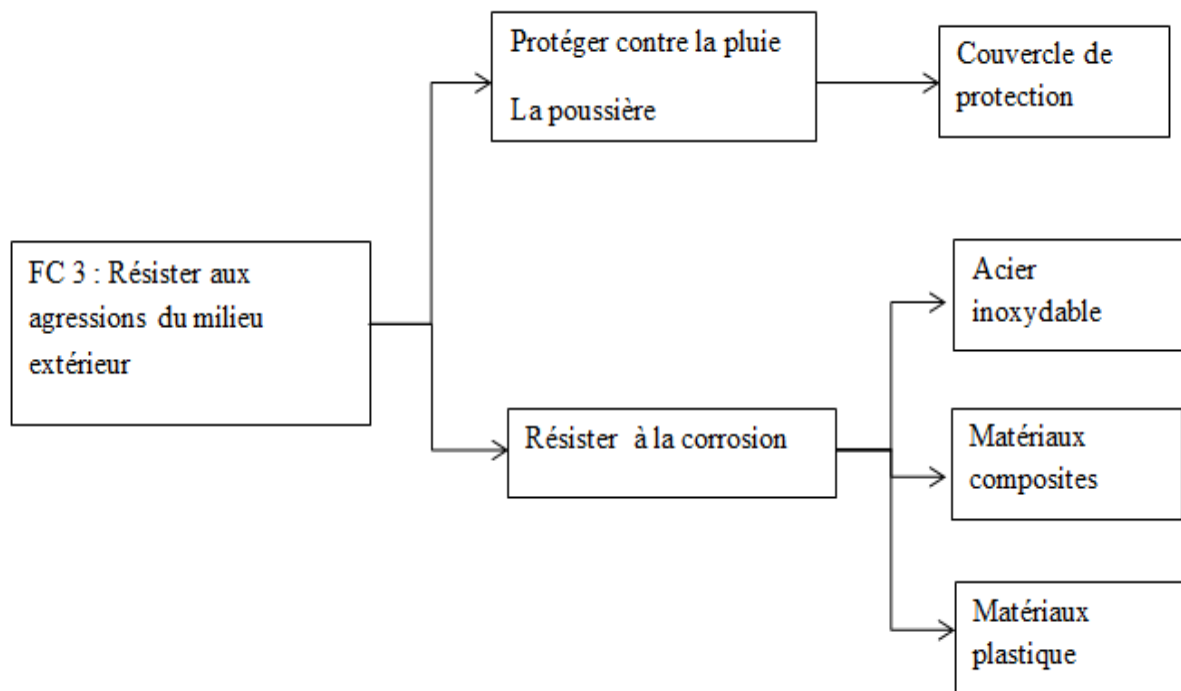


Figure 2.8: Diagramme FAST de FC3

La figure 2.9représente le diagramme FAST de la fonction principale FC4

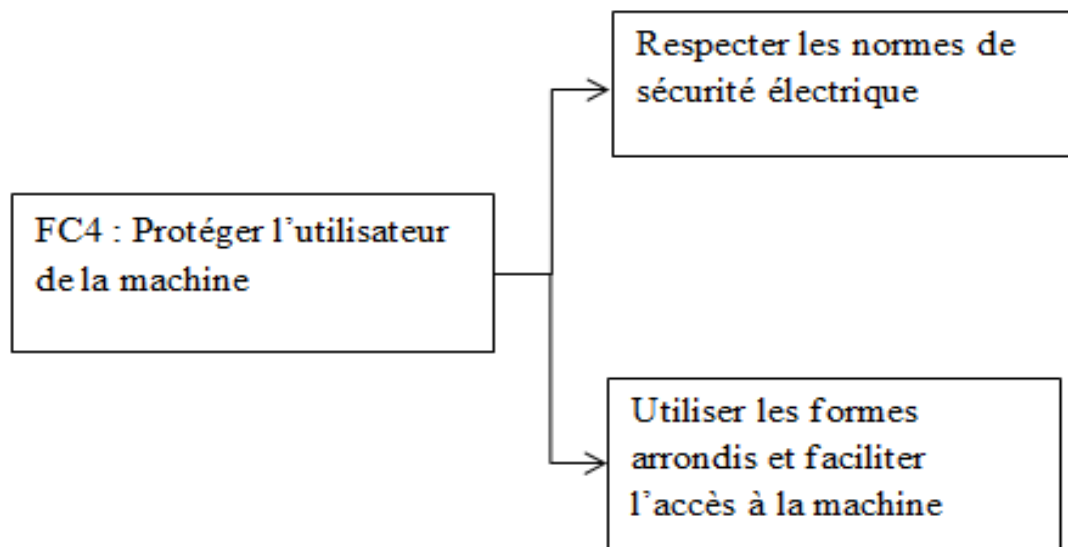
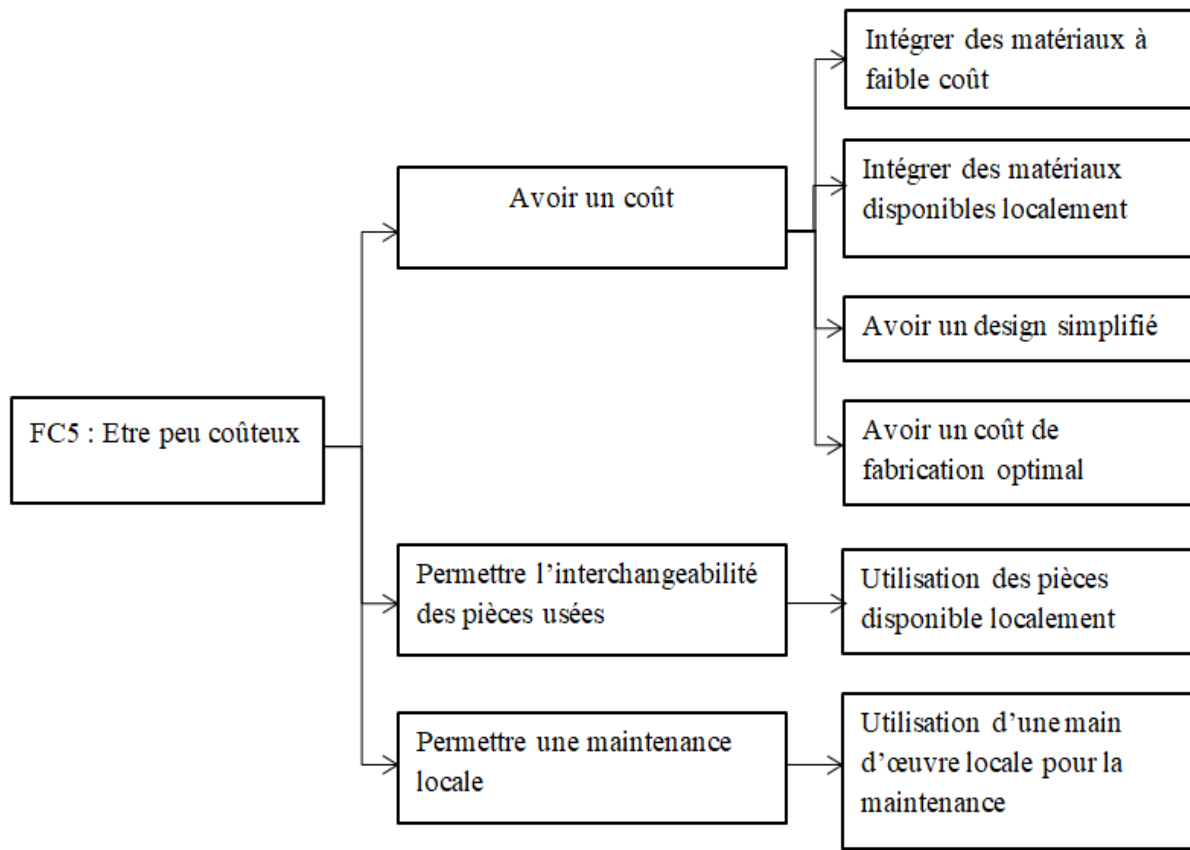


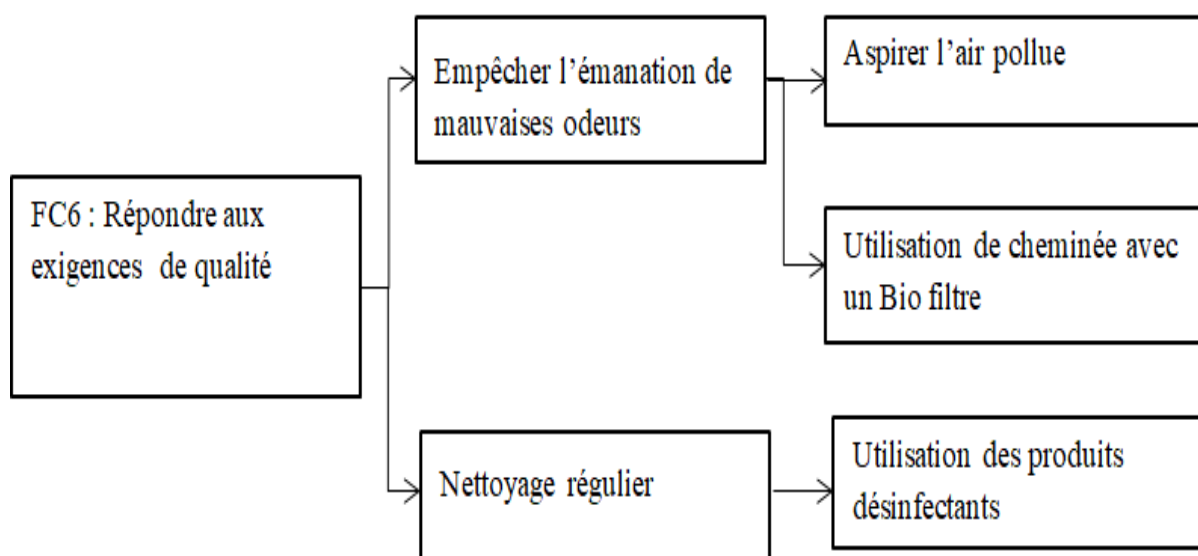
Figure 2.9: Diagramme FAST de FC4

La figure 2.1 illustre le diagramme FAST de la fonction principale FC5



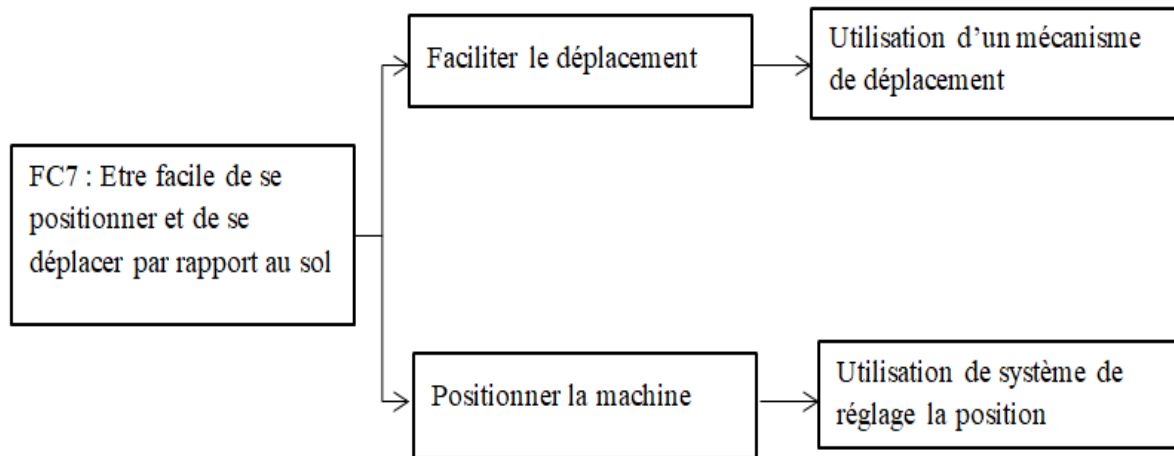
**Figure 2.10: Diagramme FAST de FC5**

La figure 2. 11 représente le diagramme FAST de la fonction principale FC6



**Figure 2.11: Diagramme FAST de FC6**

La figure 2. 12 représente le diagramme FAST de la fonction principale FC4



**Figure 2.12: Diagramme FAST de FC7**

Les travaux précédents ont permis de trouver un nombre important de solutions possibles, il est nécessaire d'apporter un modèle d'aide à la décision, lui, même assorti d'outils consiste à suivre les étapes suivantes :

- Choix des critères
- Valorisation par critère
- Valorisation globale
- Analyse de résultats

#### **4 Justification du choix de différentes solutions technologiques fonctionnelles**

Le choix d'une forme de tambour à fond plat avec des chicane à l'intérieur est pour assurer une meilleure d'accélération, dégradation et le mélange des déchets organiques ainsi que la garantie de la stabilité et l'intégration de dispositif d'aération et la cheminée d'extraction de l'odeur au lieu de choisir un tambour à fond bombé qui peut causer une instabilité de ces dispositifs et des solutions coûteuses.

La solution de motorisation avec motoréducteur a été choisie pour sa conservation du couple transmis qui n'est pas le cas des motorisations avec variateur de vitesse (robustesse).

Le choix de matériaux INOX pour l'ensemble de mélangeur est approuvé par sa Résistance à la corrosion des déchets humide, et par un excellent caractère de soudabilité. Ce qui va faciliter la mise en fabrication de la solution par une construction mécanosoudée.

Pour le contrôle des paramètres de compostage (Température, Aération, PH, Humidité) on a

choisi des capteurs avec fils avec un système de traitement des informations par une carte à microcontrôleur au lieu d'automate programmable, le nombre des entrées et sorties est réduit.

## **5 Conclusion**

Pour conclure, ce chapitre a été consacré à la démarche de conception analyse de valeur qui permet d'étudier et clarifier tous les éléments en interaction avec le système. D'après cette étude on a constaté que le besoin de traitement des déchets organiques à temps est primordial, on effectue pour répondre à ce besoin nous avons choisi le composteur rotatif dont sa réalisation nécessite de trouver les éléments extérieurs qui sont en interaction avec le système. Par la suite, nous avons cité les différentes fonctions de services classées par ordre croissant, et pour chaque fonction nous avons adopté des critères d'appréciation, ensuite nous avons mis en évidence une recherche des solutions constructives à partir des fonctions de services en outre nous avons fixé les solutions constructives à utiliser. Par conséquent, nous nous sommes penchés sur le dimensionnement des dispositifs de composteur rotatif.

## **CHAPITRE - III : CONCEPTION ET RÉALISATION DE PREMIER PROTOTYPE DE COMPOSTEUR ROTATIF**

## 1 Introduction

Vu la nécessité de concevoir un composteur rotatif qui répond à toutes les fonctions décrites dans le chapitre 2. La réalisation de prototype de ce système s'appuie sur le dimensionnement de différents dispositifs de système, cette démarche permettra de dimensionner les composantes principales du système c'est-à-dire le tambour, le système d'entraînement de tambour ainsi le support de tambour. En s'appuyant sur les méthodes analytiques de mécanique et le calcul de la résistance des matériaux et des simulations numériques,

Nous allons par la suite d'entamer la conception et la simulation en utilisant un logiciel de conception et simulation Solidworks© afin de valider les dimensions et de générer les dessins de définitions et le dessin d'ensemble de ce système. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons mis en évidence la réalisation de prototype de composteur rotatif.

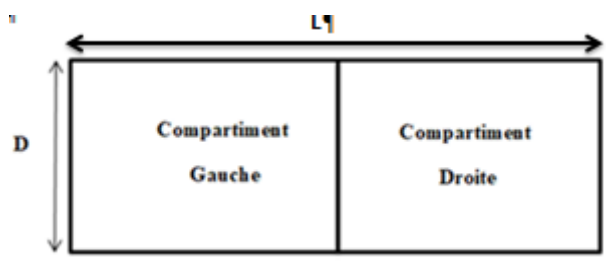
## 2 Descriptif du système

Pour gérer les apports continus de déchets, deux compartiments seront nécessaires. Il faudrait entre 21 et 28 jours pour que la phase de compostage actif se termine dans le premier compartiment. Il faut donc au moins 28 jours pour remplir le deuxième compartiment.

Afin de simplifier la gestion, le composteur à tambour rotatif sera conçu pour traiter les déchets entrants pendant un mois ou 31 jours. Les résidents mettront leurs déchets dans compartiment un pendant un mois entier tandis que le compartiment deux, qui a été rempli au cours du mois précédent, sera en phase de compostage actif.

Le composteur à tambour est conçu pour gérer un taux de participation allant de 50 % à 75 %. Les déchets alimentaires étant très humides, il est recommandé d'ajouter 10 % en poids de granulés de bois dans le mélange.

Le composteur rotatif serait de forme circulaire pour faciliter et optimiser le mélange de la matière organique. La longueur de tambour est fixée à 1,5 mètre. Le diamètre du tambour est calculé comme étant 0,9m, cette conception serait de forme circulaire avec les parois latérales en forme plate. Le composteur aurait une hauteur de 1,3 mètre figure 3. 1.



**Figure 3. 1: Dessin du tambour**



### 3 Schéma cinématique de système proposé

La figure 3.2 représente le schéma cinématique de système proposé qui contient deux classes d'équivalences défini ci-dessous :

3.1. Classe 1 : Tambour rotatif

3.2. Classe 2 : Support de système

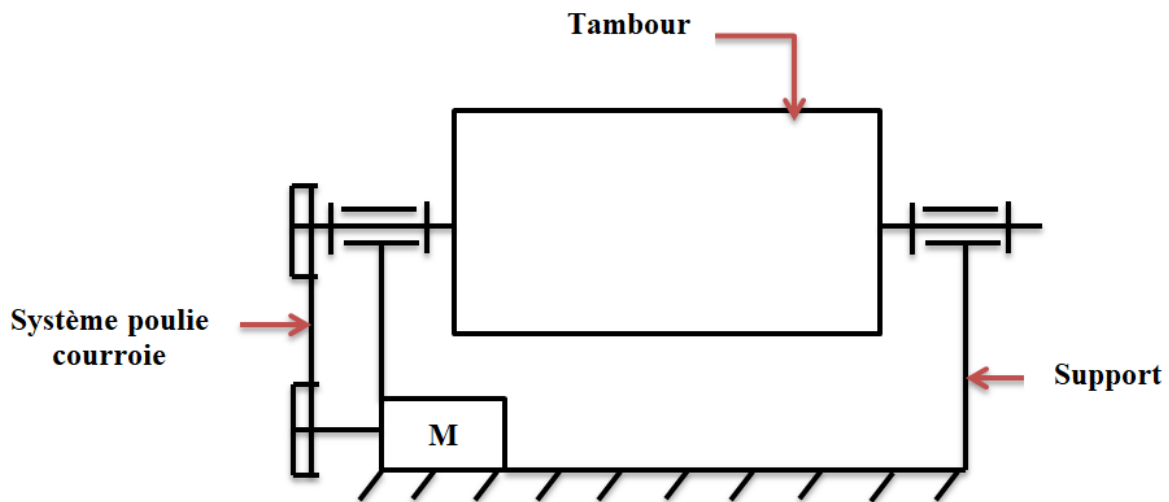


Figure 3. 2: Schéma cinématique de système proposé

Le système de transmission par poulie courroie a été choisi pour des raisons de la souplesse, possibilité de varier l'entraxe et évité le bruit, la liaison entre la classe 1 et classe 2 est une liaison pivot.

### 4 Dimensionnement des éléments de composteur rotatif

Afin de déterminer l'épaisseur minimale du tambour rotatif, il est important de terminer les charges en supposant que les deux compartiments sont remplis en même temps.

En effet, le tambour est soumis à la contrainte circonférentielle ou transversal tambour sous le chargement des déchets organiques.

Tous ces calculs auront été atteints en supposant ces hypothèses générales :

- Le matériau du tambour aciers inoxydables 316 L
- La limite d'élasticité est 172 MPa
- Diamètre à l'intérieur de tambour est fixé  $D_i$
- La densité du compost varie considérablement selon l'apport et le stade de décomposition. À déterminer le volume du tambour, une densité pour le compost frais varié de 500 à 600 kg/m<sup>3</sup> [77]. Cependant, à des fins de conception, il est plus prudent de supposer que le compost sera plus dense que le compost frais. Au début, le compost

sera chargé de matière organique qui a une densité bien supérieure à  $600 \text{ kg/m}^3$  par conséquent, la densité supposée du compost sera de  $900 \text{ kg/m}^3$  qui est inférieur à la densité de l'eau, mais supérieur à la densité du compost frais.

- Tous les calculs incluront un facteur de sécurité de 3.

#### 4.1 Détermination de l'épaisseur de la paroi du tambour

Pour éviter la déformation et la défaillance du tambour, il est nécessaire de choisir une épaisseur minimale du tambour.

Tout d'abord il faut calculer le volume du tambour et calculer la masse totale à introduire dans le tambour :

- Le volume du tambour rotatif

$$V = \pi \cdot r_i^2 \cdot L \quad (1)$$

Avec L : longueur du tambour

$r_i$  : rayon interne du tambour

- Calcul la masse des déchets à composté

$$m = \rho_d \cdot V \quad (2)$$

Avec  $\rho_d$  : Masse volumique des déchets organiques

On considère le tambour comme un cylindre creux, fermé aux extrémités et tel que son épaisseur soit suffisamment faible devant son diamètre pour l'assimiler à une enveloppe mince voir figure 3. 3, on considère aussi que les contraintes appliquées sur les deux parois latérales sans négligé devant la contrainte exercée sur la paroi longitudinale.

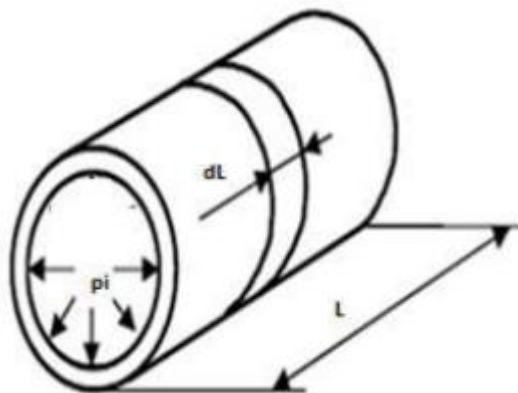


Figure 3. 3: Pression relatif  $p_i$  est appliquée à l'intérieur du cylindre

On considère une demi-tranche de rayon R de largeur  $dL$  de l'enveloppe, soumise à la pression

Relative p figure 3. 4.

Expression de l'effort total exercé sur la demi-enveloppe :

$$\vec{F} = \sum d\vec{f} \quad (3)$$

- En projection sur Ox :  $\sum (df.\sin\alpha) = 0$  par symétrie
- En projection sur Oy :  $\sum (df.\cos\alpha) = \sum (p.da.\cos\alpha)$

Or  $ds = da.\cos\alpha$  et  $\sum ds = 2R.dL$

Par conséquent,

$$\|\vec{F}\| = 2R.pi.dL \quad (4)$$

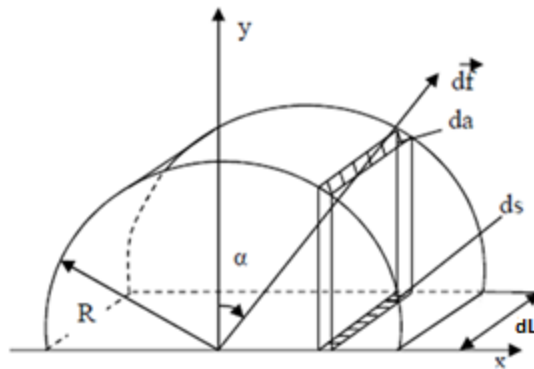


Figure 3. 4: Effort élémentaire sur un  $d\vec{f}$  élément de surface da

La relation (2) permet d'écrire pour la demi-enveloppe de longueur l que :

$$F = pi.di.L \quad (5)$$

La demi-enveloppe est en équilibre sous l'action figure 3. 5 :

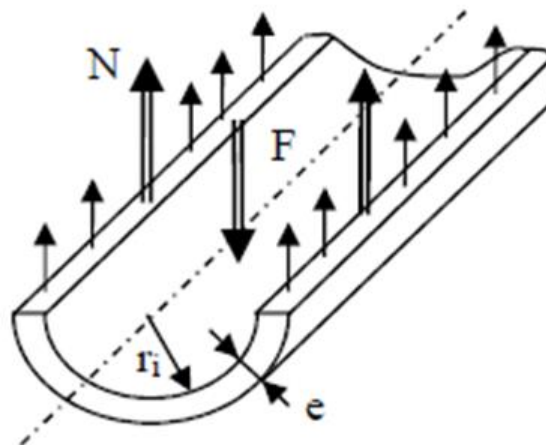


Figure 3. 5: Enveloppe en équilibre

- De  $F$  engendré par la pression interne,
- Des forces de cohésion exercées par l'autre demi-enveloppe.

Ces forces se traduisent par un effort normal  $N$  pour chaque coupure.

L'équilibre s'écrit :  $\vec{F} + 2\vec{N} = \vec{O}$  avec  $N = \sigma_t \cdot L \cdot e$  .

On a donc :  $p_i \cdot d_i \cdot L = 2\sigma_t \cdot L \cdot e$

D'où la contrainte transversale est donnée par :

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot d_i}{2 \cdot e} \quad (6)$$

- Condition de la résistance :

La contrainte circonférentielle doit être inférieure ou égale à la limite élastique, la relation est donnée par l'inéquation :

$$\sigma_t = \frac{p_i \cdot d_i}{2 \cdot e} \leq \frac{\sigma_e}{s} \quad (7)$$

L'épaisseur minimale est calculée par la relation (5) par l'équation suivante :

$$e = \frac{p_i \cdot d_i \cdot s}{2\sigma_e} \quad (8)$$

Avec :

$\sigma_t$  : Contrainte transversale en (MPa)

$L$ : Longueur du tambour rotatif en (mm)

$p_i$  : Pression appliquée sur le tambour (N / mm<sup>2</sup>)

$s$  : Coefficient de sécurité

$\sigma_e$  : Limite élastique en (MPa)

D'après le calcul de l'épaisseur on a trouvé une valeur d'épaisseur inférieure de 1 mm, le choix d'une valeur 1 mm de l'épaisseur peut déformer et perdre de cylindricité à cause de soudage des chicane à l'intérieur du tambour, par conséquent pour une meilleure sécurité de systèmes on a choisi une épaisseur de 2 mm pour toutes les parois du tambour.

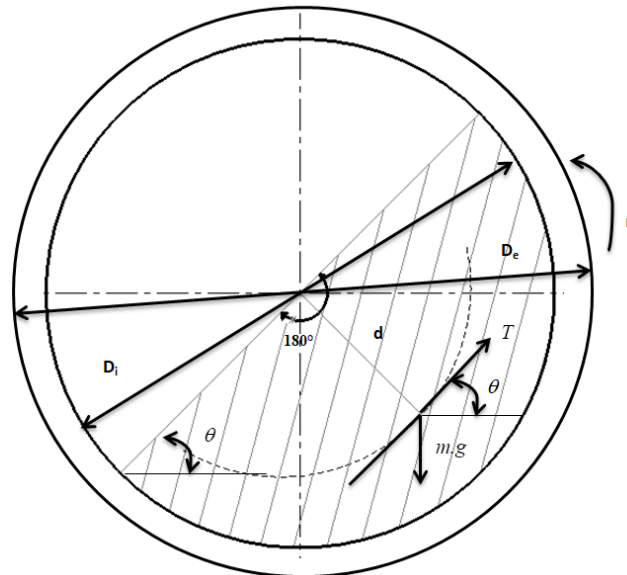
#### **4.2 Dimensionnement du système d'entraînement du tambour rotatif**

Le tambour rempli des déchets organiques d'une densité  $\rho_d = 900$  (kg/m<sup>3</sup>), est guidé en rotation par deux paliers à roulement, la vitesse de rotation est lente de 4 tours par minute, on doit employer un motoréducteur avec d'autres systèmes de transmission poulie courroie, le choix

de motoréducteur et dimensionnement de poulie courroie nécessite de calculer la puissance mécanique pour déplacer les déchets dans le tambour.

#### 4.2.1 Détermination du couple nécessaire à l'entraînement du tambour

Le couple nécessaire pour le déplacement des déchets organiques dans le tambour dépend de plusieurs paramètres, on néglige le couple résistant du tambour devant le couple résistant des déchets organiques ce qui implique que le couple éventuellement haut, sur le positionnement des déchets organiques, puisque l'essentiel de l'effort fourni par le moteur sera de vaincre le couple causé par le positionnement du centre de masse de ces déchets. Considérant que le contenu des déchets organiques forme un angle de repos  $\theta$  maxi de  $45^\circ$  avec l'horizontale. Le couple sera maximal si le tambour rempli en moitié voir figure 3. 6



**Figure 3. 6: Mouvement des déchets organiques dans le tambour**

Le couple pour déplacer les déchets organiques peut être exprimé est calculé par la relation :

$$C_r = T.d \quad (9)$$

L'effort tangentiel T est calculé par équation suivante :

$$T = m.g.\sin\theta \quad (10)$$

En remplaçant l'équation (1) et (2) dans l'équation (9) on trouve :

$$T = \frac{\pi.D_i^2 \cdot \rho_d \cdot g \cdot L \cdot \sin\theta}{8} \quad (11)$$

Le centre de masse des déchets organiques est calculé en fonction de diamètre intérieur  $D_i$  et la surface occupée par les déchets  $S_d$  par la relation suivante :

$$d = \frac{D_i^3 \cdot \sin^3\left(\frac{\pi}{2}\right)}{12 \cdot S_d} \quad (12)$$

Avec  $S_d$  surface occupé par le déchet égal :  $\frac{\pi \cdot D_i^2}{8}$

D'après l'équation (8), (10) et (11) le couple pour déplacer les déchets organiques est donné par la relation suivante :

$$C_r = \frac{D_i^3 \cdot \rho_d \cdot g \cdot L \cdot \sin\theta}{12} \quad (13)$$

Avec  $C_r$  : Couple résistant pour faire tourner le tambour (N.m).

$\rho_d$  : Densité des déchets organiques en (kg/m<sup>3</sup>).

L : Longueur du tambour en (m).

g : l'accélération de pesanteur en (N/s<sup>2</sup>)

$\theta$  : Angle de repos des déchets organiques

On suppose que l'angle de repos des déchets organiques prend une valeur de 45°, le couple admissible pour entraîner le système est majoré de 10% du couple résistant de la charge des déchets organiques tableau 3. 1.

**Tableau 3.1: Couple résistant à  $\theta=45^\circ$**

$D_i$ (m)	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	L(m)	$\theta$ (°)	$C_r$ (N.m)	$C$ (N.m)
<b>0.9</b>	<b>900</b>	<b>1.5</b>	<b>45</b>	<b>570</b>	<b>627</b>

#### 4.2.2 Détermination de la puissance mécanique du tambour

La puissance mécanique pour entraîner le tambour rotatif est calculée en fonction du couple et la vitesse de rotation par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{9550} N \cdot C \quad (14)$$

Avec :

$P_m$  : Puissance mécanique de rotation en (KW)

$N$  : Vitesse de rotation en (tr/min)

La valeur de la puissance mécanique de rotation est donnée dans le tableau 3. 2.

**Tableau 3.2: Puissance mécanique de rotation**

N (tr/min)	C(N.m)	P <sub>m</sub> (KW)
<b>4</b>	<b>627</b>	<b>0.262</b>

#### 4.2.3 Détermination de la puissance utile de moteur

Pour déterminer la puissance utile de moteur électrique on doit connaître les rendements de système de transmission c'est-à-dire le rendement du motoréducteur et le rendement de poulie courroie

On pose  $\eta_p$  : Rendement de poulie courroie

$\eta_r$  : Rendement de motoréducteur

La puissance motrice est calculée en fonction de la puissance mécanique du tambour et les rendements par la relation suivant :

$$P_u = \frac{P_m}{\eta_p \cdot \eta_r} \quad (15)$$

La valeur de la puissance motrice est donnée dans le tableau 3. 3.

**Tableau 3.3: Puissance motrice**

$\eta_d$	$\eta_r$	P <sub>m</sub> (KW)	P <sub>u</sub> (KW)
<b>0.9</b>	<b>0.9</b>	<b>0.262</b>	<b>0.324</b>

D'après nos calculs on choisit un motoréducteur de marque compabloc 3233 pour plus détail voire l'annexe A, les caractéristiques de ce moteur est donné dans le tableau 3.4 :

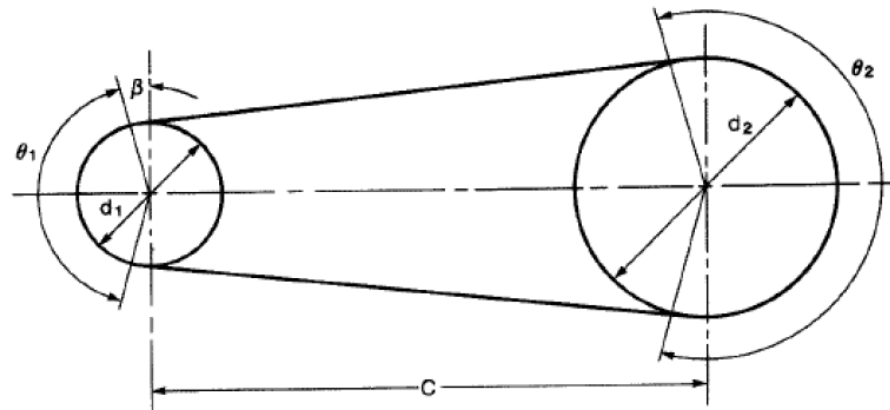
**Tableau 3.4: Caractéristique technique de motoréducteur CB 3233**

Vitesse de sortie en (tr/min)	Rapport de réduction	Puissance en (KW)
11.8	<b>123</b>	<b>0.370</b>

#### 4.2.4 Dimensionnement de poulie courroie

Les poulies à courroie trapézoïdale sont dimensionnées conformément aux normes en utilisant

le livre de dimensionnement des éléments de la machine [78]. Les axes de deux poulies sont parallèles, les limitations d'espace exigent que l'entraxe soit d'environ 600 mm et que les poulies soient optimales voir figure 3.7.



**Figure 3.7: Nomenclature et géométrie de la courroie**

$d_1$  : diamètre de la poulie motrice, en mm

$d_2$  : diamètre de la poulie réceptrice, en mm

$C$  : entraxe, en mm

$n_1$  et  $n_2$ : vitesse de rotation des poulies, en tr/min

$\omega_1$  et  $\omega_2$  : vitesse angulaire des poulies, en rad/s

$\theta_1$  Et  $\theta_2$  : angles de contact entre la courroie et les poulies en degrés ( $^\circ$ ) ou rad

$v$  : vitesse de la courroie, en m/s

$b$  : largeur de la courroie, en mm

$e$  : épaisseur de la courroie, en mm

- Dimensionnement du Courroie :

Pour assurer la rotation du Tambour du composteur, et d'après le type de motoréducteur choisi, la vitesse à la sortie du réducteur ( $n_1 = 11.8$  tr/min) et la vitesse de rotation du tambour ( $n_2 = 4$  tr/min).

On choisit une courroie type A, le diamètre d'entraînement est fixé à une valeur minimale 66.04 mm [78] et le diamètre de la poulie réceptrice doit être inférieur à l'entraxe,

Détermination le rapport de réduction de système poulie et courroie :

$$r_p = \frac{D_1}{D_2} \quad (16)$$



La valeur de D2 est donnée dans le tableau 3.5

**Tableau 3.5: Diamètre réceptrice**

Type de la courroie	Diamètre de poulie motrice (mm)	Rapport de transmission	Diamètre de poulie réceptrice (mm)
A	<b>66.04</b>	<b>0.34</b>	<b>194.86</b>

D'après le tableau 3. 5 et là [78] la valeur de diamètre réceptrice est satisfaite.

Angle d'enroulement ( $\theta_1 = 167.73^\circ$ ) est acceptable, car elle est supérieure à  $130^\circ$

La puissance brute est calculée par l'équation suivante :

$$P_r = \left[ C_1 - \frac{C_2}{D_1} - C_3(r \cdot D_1)^2 - C_4 \log(r \cdot D_1) \right] r \cdot D_1 + C_2 r \left[ 1 - \frac{1}{K_a} \right] \quad (17)$$

Avec C1, C2, C3 et C4 sont des constantes qui sont fonction de la section de la courroie et  $r$  représente la vitesse de petite poulie divisée par 1000,  $K_a$  est une constante qui dépend de rapport de transmission.

D'après le [78] la valeur de puissance brute est donnée dans le tableau 3. 6

**Tableau 3.6: Puissance brute**

c1	c2	c3	c4	r	Ka	Pr(KW)
<b>0.8542</b>	<b>1.342</b>	<b>2.436(10)<sup>-4</sup></b>	<b>0.1703</b>	<b>0.0118</b>	<b>1.1106</b>	<b>0.434</b>

La puissance nette transmise par chaque courroie  $P'_r$  est calculée par l'équation ci-dessous :

$$P'_r = K_1 \cdot K_2 \cdot P_r \quad (18)$$

Ou  $K_1$  est un facteur appliqué à l'angle d'enroulement et  $K_2$  est un facteur appliqué à la longueur de la courroie voir annexe, la valeur de cette puissance est donnée dans le tableau 3.7.

**Tableau 3.7: Puissance nette**

K1	K2	Pr(KW)	P'r(KW)
0.950	0.970	0.434	0.400

La puissance effective est donnée par la relation suivante :

$$P' = K_s \cdot P_u \quad (19)$$

Avec  $K_s$  facteur de service qui dépend de l'heur de fonctionnement et le type de machine à

entraîner voir annexe,  $P_u$  est la puissance utile à la sortie de motoréducteur, la valeur de cette puissance est donnée dans le tableau 3.8.

**Tableau 3.8: Puissance effective**

$K_s$	$P_u(KW)$	$P'(KW)$
<b>1.3</b>	0.324	0.421

Le nombre de courroies nécessaire pour la transmission de mouvement vers le tambour rotatif :

$$n_c = \frac{P'}{P'_r} \quad (20)$$

Le nombre de la courroie nécessaire à la transmission de mouvement est donné dans le tableau 3.9 :

**Tableau 3 9: Nombre de courroies**

$P'(KW)$	$P'_r(KW)$	nc calculé	nc réel
0.421	0.400	1.05	2

La fréquence de passage  $f$  est calculée par la relation suivante :

$$f = \frac{v_c}{L_p} \quad (21)$$

Avec :  $v_c$  est la vitesse de la courroie et  $L_p$  longueur de la courroie voir annexe, la valeur de la fréquence de passage est de  $0.025 \text{ s}^{-1}$ , elle est acceptable puisqu'elle inférieure à  $8 \text{ s}^{-1}$ .

Le choix d'une longueur normalisée entraîne obligatoirement une modification correspondante l'entraxe initial  $C$  par la relation suivant :

$$C'' = \left[ \frac{4.L_p - \pi.(d1 + d2)}{4} - \frac{(d2 - d1)^2}{4L_p - 2\pi(d1 + d2)} \right] \quad (22)$$

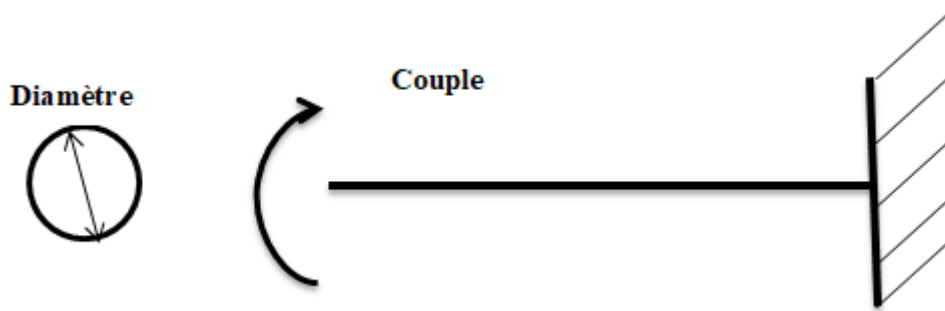
La valeur de l'entraxe corrigé  $C=600.01 \text{ mm}$

D'après cette étude on a choisi les poulies à deux gorges et une courroie trapézoïdale type A de largeur  $12.7 \text{ mm}$  et l'épaisseur  $7.874 \text{ mm}$

#### 4.2.5 Dimensionnement de l'arbre

L'arbre est lié au système de transmission et encastré avec la paroi latérale du tambour en suppose que la liaison entre l'axe et le palier liaison pivot parfaite sans frottement, la

modélisation de l'axe est donnée dans la figure ci-dessous



**Figure 3. 8: Modélisation de l'axe de rotation**

L'axe est soumis à la sollicitation de torsion donc la contrainte tangentielle de torsion s'écrit

$$\tau_{\max} = \frac{16C}{\pi d^3} \quad (23)$$

Le matériau de l'axe est acier inoxydable de limite élastique  $\sigma_e = 172MPa$  avec un coefficient de sécurité s égale 3 le diamètre nominal de l'arbre vaut :

$$d = \sqrt[3]{\frac{32.C.s}{\pi.\sigma_e}} \quad (24)$$

Le diamètre minimal de l'arbre est donné dans le tableau 3. 10

**Tableau 3.10 : Valeur de diamètre de l'arbre**

$\sigma_e$ (MPa)	s	C(N.mm)	d (mm)
172	4	<b>627000</b>	50

## 5 Étude du support de composteur rotatif

Le support de composteur rotatif est réalisé par des profilés mécano soudée de section carrée creuse, le matériau des profilés est l'acier noir S235, la structure est modélisée sous Solidworks© atelier mécano soudée, nous avons simulé la structure de support sous Solidworks© simulation pour déterminer les contraintes maximales et les déplacements maximale, nous avons pris comme facteur de sécurité s=3.

### 5.1 Modèle géométrique

La figure 3. 9 représente les numérotations des nœuds dans le support de composteur rotatif, la

Figure 3. 10 montres les numérotations des poutres de support de composteur.

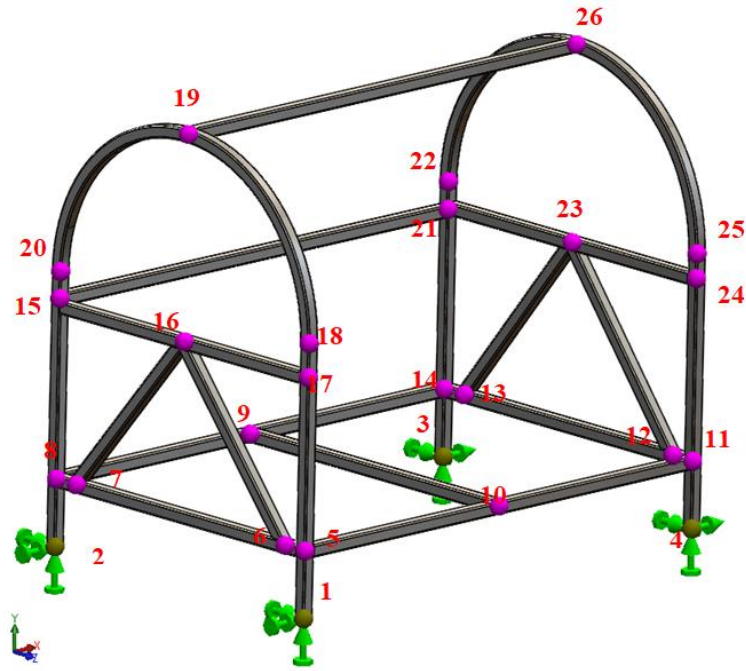


Figure 3. 9: Numérotation des nœuds de châssis

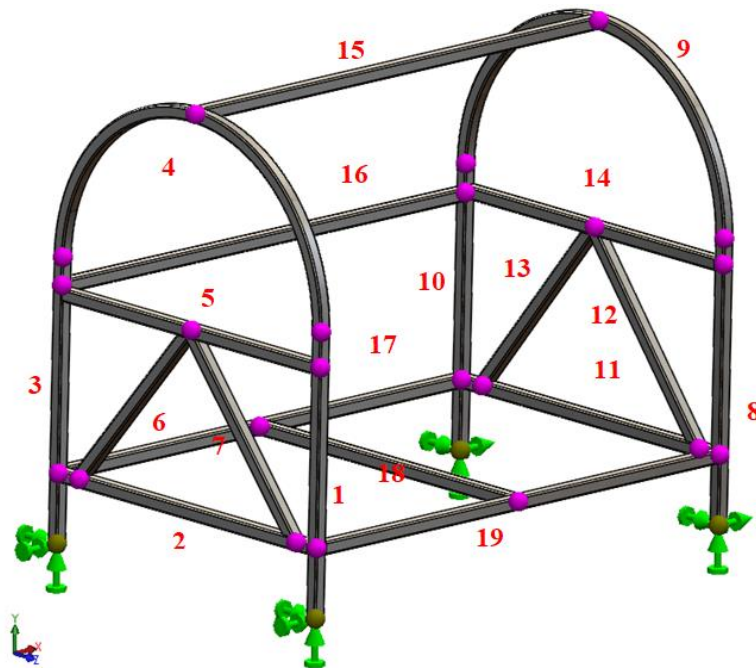
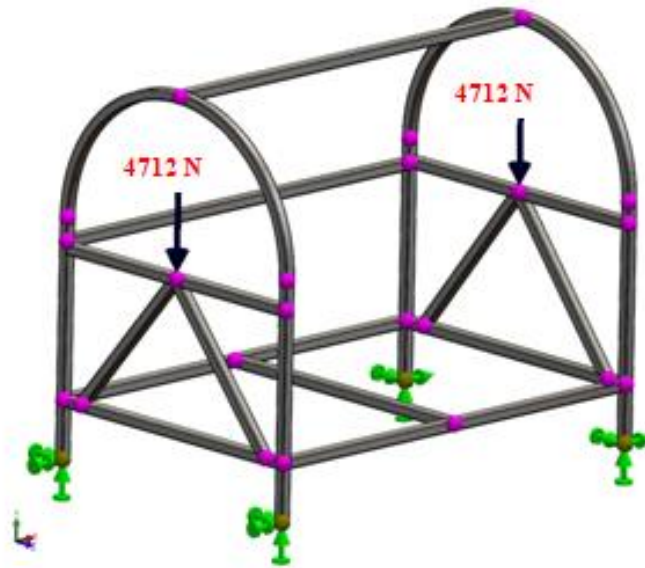


Figure 3.10: Numérotation des poutres de la structure

## 5.2 Conditions aux limites et chargements

Le support de composteur rotatif est encasté au niveau des nœuds (1, 2, 3,4) et soumis deux charges concentriques au niveau des paliers ces charges dues aux poids des déchets et la masse de tambour voire la figure 3. 11.

La figure ci-dessous représente les conditions aux limites et les charges.



**Figure 3. 11: Définition des conditions limites et charges**

- Définition des conditions aux limites :

Toutes les poutres sont soudées entre eux par soudage (hypothèse : la structure est considérée comme un bloc)

Noeud 1:  $dx = dy = dz = \text{rotx} = \text{roty} = \text{rotz} = 0$

Noeud 2:  $dx = dy = dz = \text{rotx} = \text{roty} = \text{rotz} = 0$

Noeud 3:  $dx = dy = dz = \text{rotx} = \text{roty} = \text{rotz} = 0$

Noeud 4:  $dx = dy = dz = \text{rotx} = \text{roty} = \text{rotz} = 0$

- Charges

Deux Charge(s) concentriques au niveau des paliers sont appliquées au milieu des deux poutres 17 et 10 en (N, N.m)

Poutre 10 :  $F_x = 0.00$   $F_y = 0.00$   $F_z = - 4712$  N

Poutre 17 :  $F_x = 0.00$   $F_y = 0.00$   $F_z = - 4712$  N

### **5.3 Définition du matériau de support**

Matériaux des poutres : S235

Module de Young = 210000 MPa

Coefficient de Poisson = 0.28

Module de cisaillement = 81712 MPa

Masse volumique = 7850 kg/m<sup>3</sup>

Coefficient de dilatation =  $1.25E-005$  1/K

#### 5.4 Définition de section de support

La section des poutres utilisées pour les supports de système est une section carrée creuse de dimension  $c=50$  mm et  $e=3.2$ , sauf la poutre 20 de dimension  $c=20$  et  $e=2$  mm.

#### 5.5 Déplacements et les contraintes

- Déplacements :

La figure 3.12 représente les déplacements dans le support de composteur rotatif, le déplacement maximal se trouve au milieu de la poutre 17 sa valeur maximale de  $1.45610^{-1}$  mm.

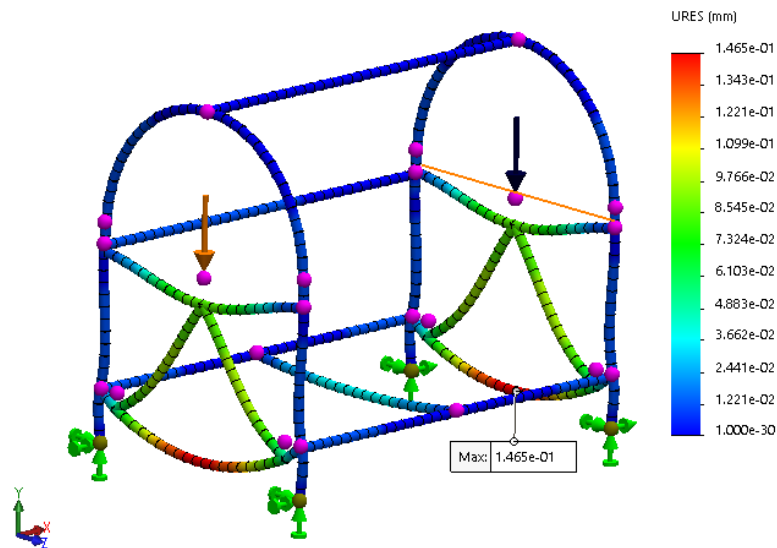


Figure 3.12: Les déplacements dans le support du composteur

- Contrainte normale dans le support :

La figure 3. 13 représente la distribution de la contrainte normale axiale et de flexion dans le support de composteur rotatif, la valeur maximale de cette contrainte se trouve dans les barres 2 et 11, pour plus de sécurité de la structure on a ajouté un coefficient de sécurité d'ordre 3 comme montre la figure 3.14, notre structure est vérifiée puisqu'elle affiche des niveaux de déplacements très faibles de l'ordre de  $1/10$  de mm et des niveaux des contraintes ne dépassant pas une valeur maximale.

La figure 3. 13 illustre la distribution des contraintes normales dans le support de composteur

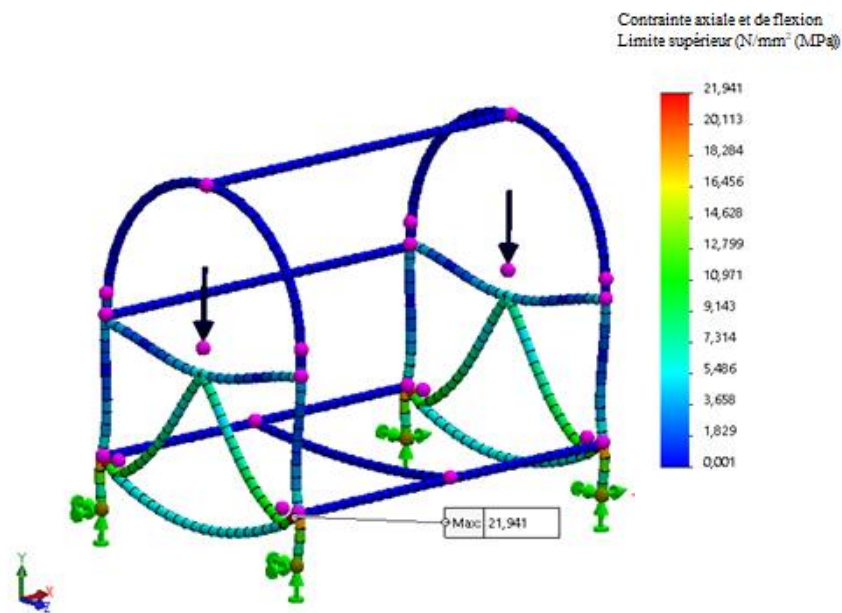


Figure 3.13: Diagramme de distribution des contraintes normales dans la structure  
contrainte maximale affichée égale 21.941 MPa

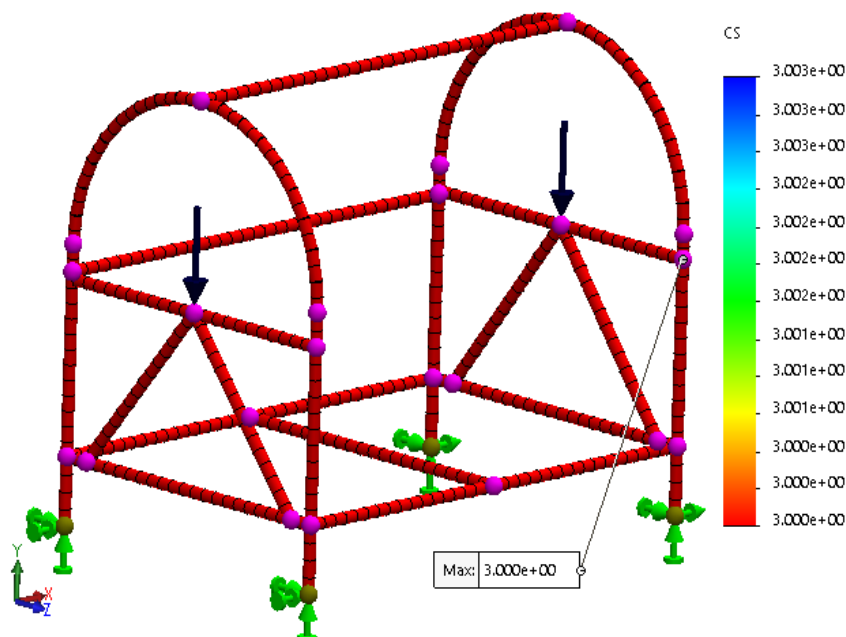


Figure 3.14: Coefficient de sécurité (cs)

## 6 Conceptions des composants de composteur rotatif sous Solidworks©

D'après l'étude et dimensionnement des dispositifs de composteur rotatif, nous avons passé à la phase de conception assistée par ordinateur afin de modéliser le système à partir les données

de dimensionnement pour générer les dessins de définitions de tous les composants de système à la fin nous avons réalisé l'assemblage de composteur pour générer le dessin d'ensemble et toutes les vues afin pour visualiser et simuler le système avant de passer la réalisation nous avons cité ci-dessous la modélisation des éléments essentiels de notre composteur rotatif .

### 6.1 Support ou châssis

le châssis est l'élément essentiel qui permet de supporter tous les éléments de système ,il est construit à partir des profils mécano soudé sous logiciel Solidworks© figure3.15,pour plus détail voir l'annexe B.

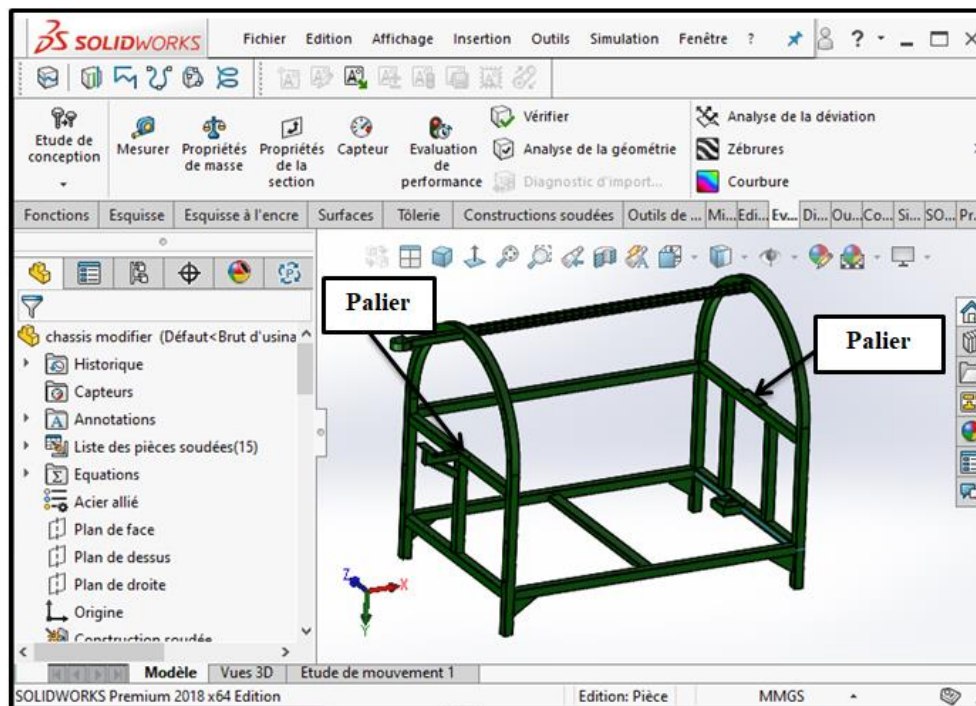


Figure 3.15: Vue 3D de châssis de composteur rotatif

### 6.2 Tambour rotatif

Le Tambour rotatif est un élément qui permet de contenir les déchets et le mélange grâce à la forme cylindrique et des chicanes soudées à l'intérieur, il est construit à partir une tôle d'acier passer par un procédé de roulage, sur les parois latérales on fixe un axe de système de transmission et d'autre paroi un arbre creux pour l'aération et l'extraction de l'odeur, la figure 3.16 représente la modélisation 3D de tambour rotatif sous Solidworks© pour plus de détail voir l'annexe B.



La figure suivante représente la modélisation du tambour sous Solidworks©

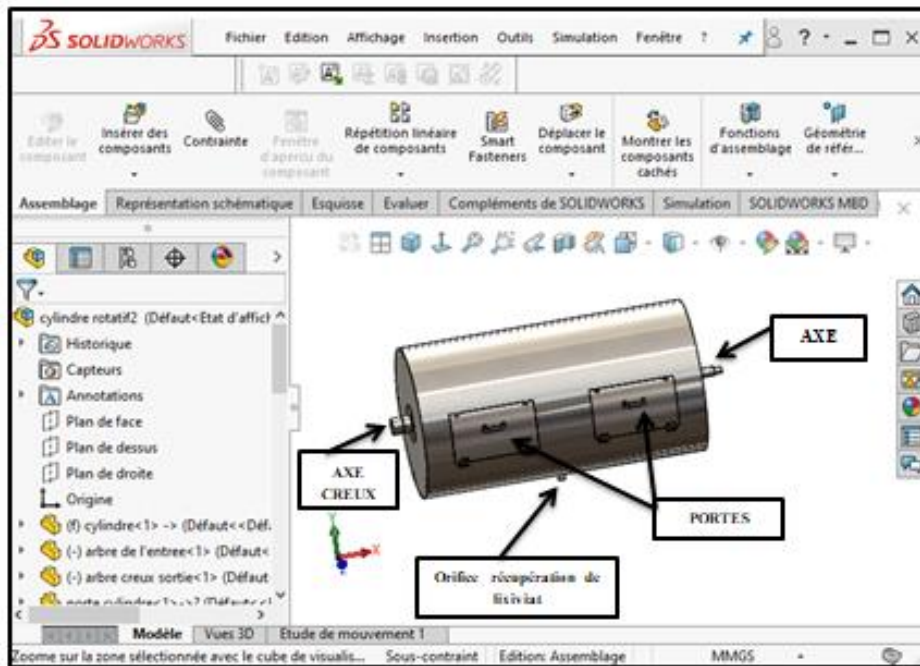


Figure 3.16: Vue 3D du tambour rotatif

### 6.3 Paliers

Les deux paliers à roulement gauche et droit permettent de guider en rotation le tambour est supporté les charges généralement les charges radiales dues aux charges des déchets organiques la figure 3.17 montre la modélisation 3D des deux paliers pour tous détails voire l'annexe

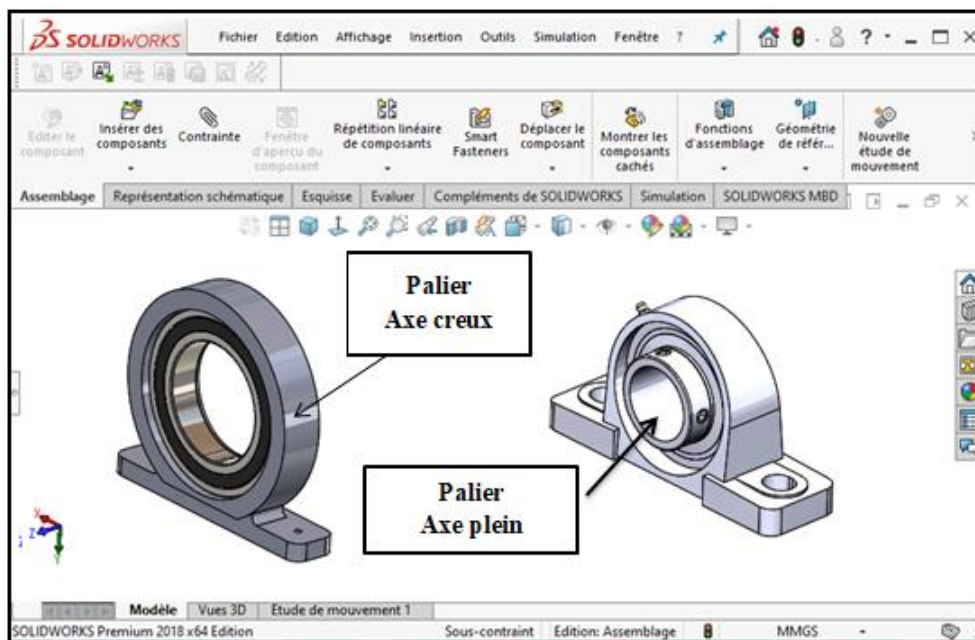


Figure 3.17: Vue 3D du palier

## 6.4 Extracteur de l'air

Aération est un paramètre essentiel pour un bon compostage, ce système est composée de 3 composants un ventilateur extracteur lié avec l'axe creux de e tambour par un joint tournant, l'air pollue est dirigé vers le bio filtre à l'aide de cheminée la figure 3. 19 représente la modélisation 3D pour plus détail voire l'annexe 1

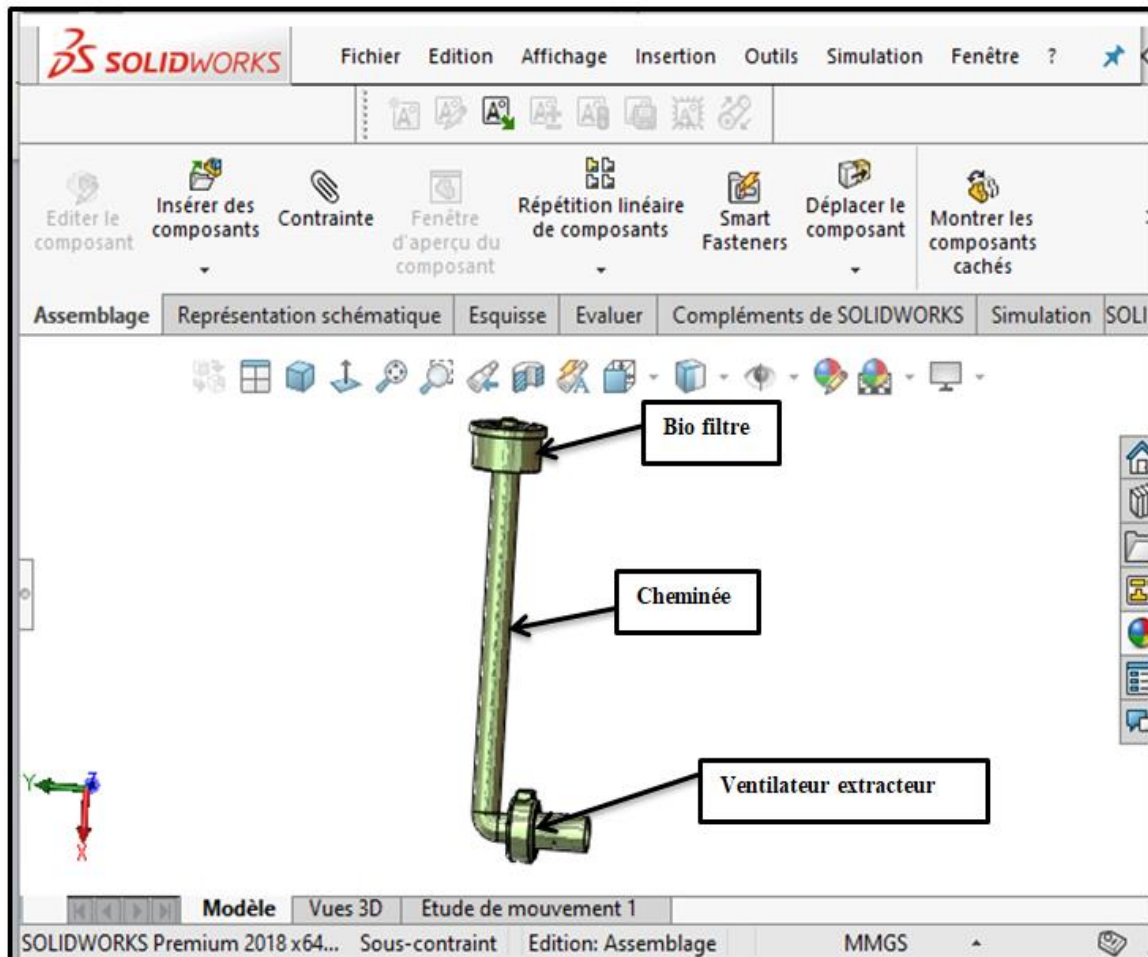


Figure 3.18: Vue 3 D Assemblage de système d'aération

## 6.5 Model 3 D de composteur rotatif

La figure suivante représente la modélisation 3D de l'assemblage de composteur sous Solidworks© de différents composants de système, à gauche se trouve le système d'entraînement de tambour, à droite se trouve le système d'aération et l'évacuation de l'odeur.

La figure suivante représente la vue en 3D du Composteur sous Solidworks©

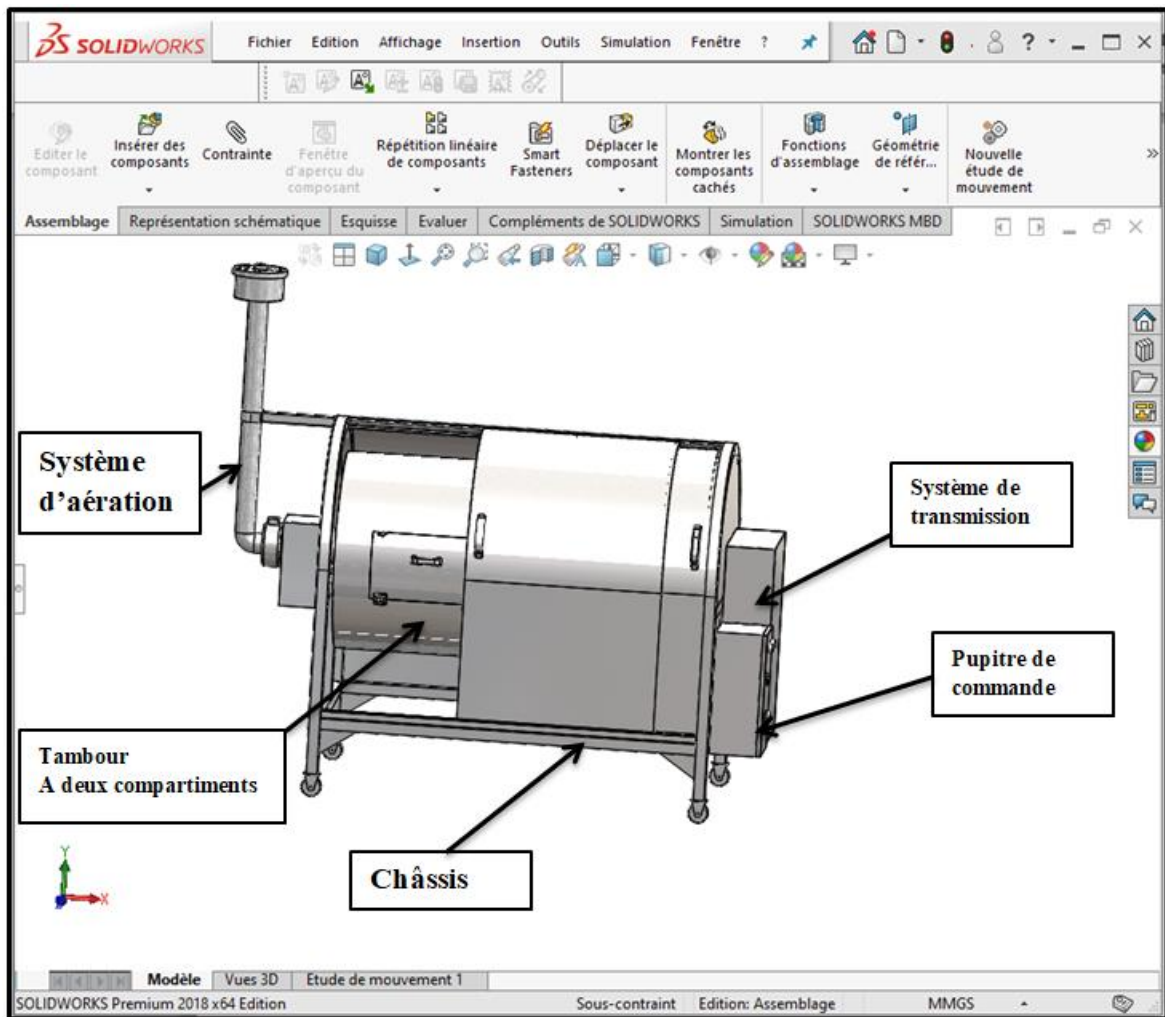


Figure 3.19: Vue 3D de composteur rotatif

## 6.6 Dessin d'ensemble

Le dessin d'ensemble [79] figure 3. 5 est un système de compostage à tambour rotatif (2) destiné à traiter les déchets organiques par un processus de fermentation aérobie, complètement mélangé par la rotation du tambour à chicanes soudées à l'intérieur, équipé d'une aspiration active. La capacité du prototype est de 0,954 m<sup>3</sup>. Le tambour rotatif est construit en tôle d'acier inoxydable, et supporté par le support de section carrée. Deux portes situées sur la partie longitudinale du tambour sont utilisées pour le chargement / déchargement des déchets organiques solides. L'aération du tambour est obtenue par l'utilisation d'un ventilateur centrifuge et de trous perforés situés dans la partie latérale du côté droit du tambour. Le cheminé d'extraction d'air est situé sur le côté du côté gauche du tambour.

Le tambour est guidé en rotation par deux paliers, tourne à une vitesse constante grâce à un motoréducteur et d'un système de poulies à courroie.

La température, l'humidité et le taux d'oxygène sont contrôlés par l'utilisation de capteurs régulièrement installés sur le tube rond soutenu par un palier lisse. la nomenclature des pièces de ce système est donnée dans l'annexe B.

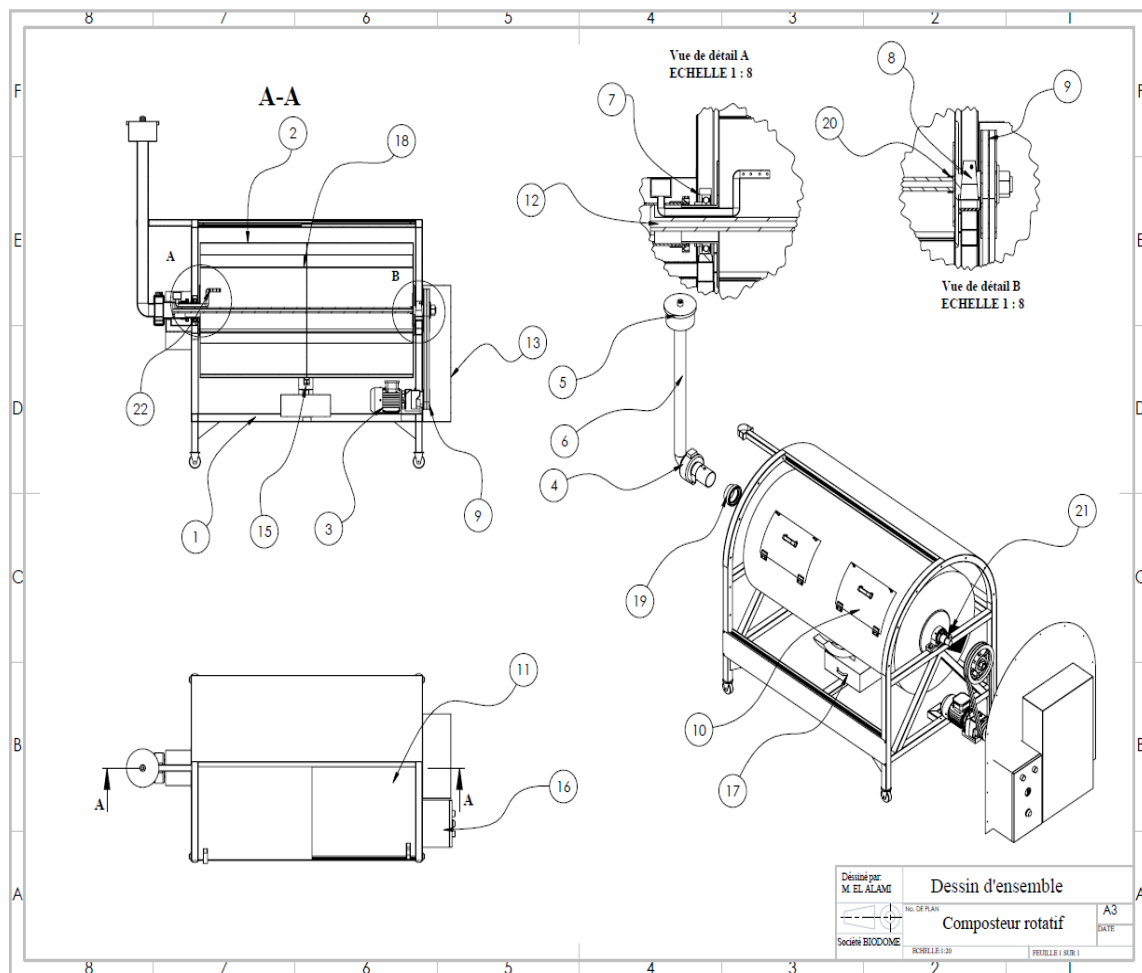


Figure 3 20: Dessin d'ensemble de composteur rotatif

## 7 Prototype de composteur rotatif à tambour

Nous avons réalisé le premier prototype de ce composteur en collaboration avec la société BIODÔME, le processus de fabrication de prototype passe plusieurs phases de fabrication, après génération des dessins de définition de chaque composant du système et élaboration de l'avant de projet d'étude de fabrication.

## **7.1 Le processus de fabrication**

- Roulage de la tôle et soudage les tôles du fond de tambour puis soudage de l'axe plein et l'axe creux
- Sciage des profilés carrés, assemblage par soudure pour former la structure du châssis
- Perçage des trous pour l'emplacement des paliers
- L'achat des pièces standards pas besoin de fabriqué sur l'atelier
- Fabrication d'un palier pour l'axe creux à l'aide de la machine d'usinage
- Réalisation de la cheminée de l'extraction de l'air
- L'assemblage de toute la composante de système

## **7.2 Réalisation de prototype**

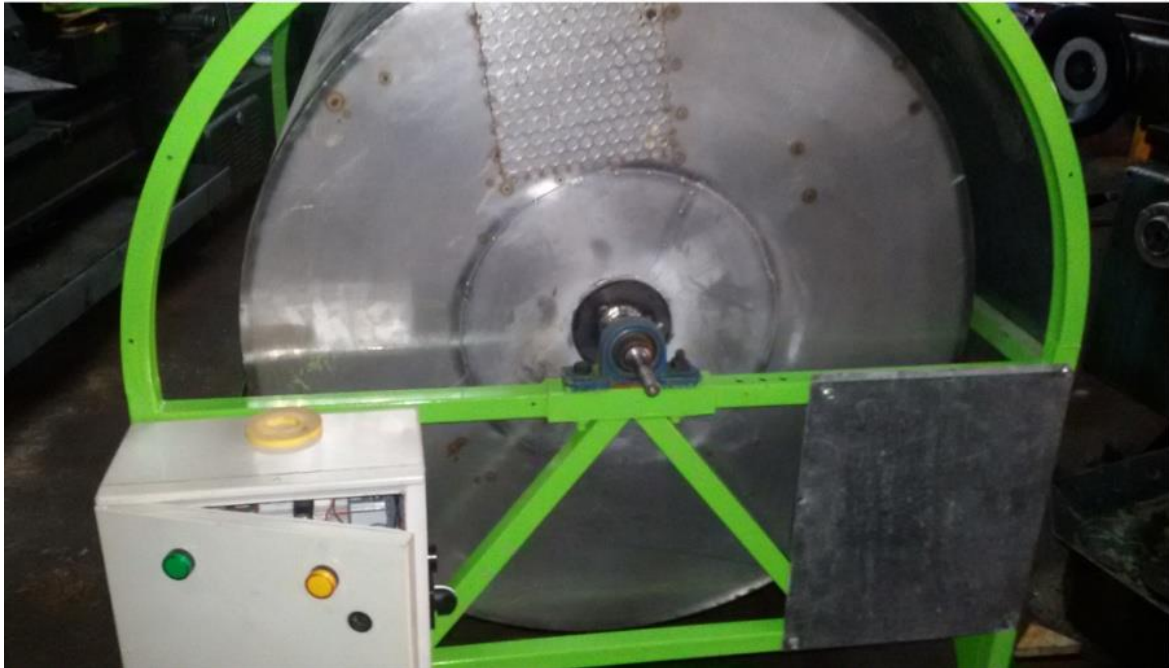
La figure 3. 21 représente le palier de l'axe creux monté sur le support de la machine de compostage



**Figure 3.21: Palier de l'axe creux**



La figure 3. 22 représente le palier de l'axe plein de la machine de compostage rotatif monté dans le support.



**Figure 3.22: Palier de l'axe plein**

Le prototype réel [79] figure 3.23 de composteur rotatif ou cours de test dans un établissement public pour tester le procédé de compostage et aussi tester la performance de ce prototype.



**Figure 3.23: Composteur à tambour rotatif rée**

## **8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exposé la méthode de dimensionnement de notre prototype de compostage rotatif qui sert à dimensionner tous les composants de composteur rotatif tel que le tambour, l'arbre de tambour, système de l'entraînement et les paliers de guidage dans le but de préciser les dimensions exactes et de choisir un système de l'entraînement adéquat.

La deuxième partie de ce chapitre présente la conception de prototype du système par l'utilisation de logiciel Solidworks© afin de générer les dessins 2D et 3D de chaque composant de tambour rotatif en détaillant pour chaque composant les formes et les dimensions. Ensuite suite aux dessins détaillés des composants on fait l'assemblage de dessins d'ensemble on respecte les liaisons entre les composants.

La dernière partie de ce chapitre nous avons parlé sur les étapes de fabrication de ce prototype notamment, roulage de la tôle, soudage de paroi perforée qui sépare les deux compartiments et les parois latérales du tambour, fabrication de support de composteur par des profilés mécanosoudés. En effet après la fabrication de composteur rotatif en recours à un test global pour tester le fonctionnement du système.

## **CHAPITRE - IV : AMÉLIORATION DE PROTOTYPE DE COMPOSTEUR ROTATIF**



## 1 Introduction

Comme nous avons évoqué dans le chapitre 3, le système proposé à de plusieurs contraintes à savoir, l'agrandissement de la taille du système pour traiter grande quantité, l'évacuation de compost, l'alignement des paliers cause des problèmes au niveau fabrication locale.

Pour cela, la nouvelle approche vue dans le chapitre 4 concernant un nouveau système semi-industriel performant qui peut supporter une grande quantité des déchets. Pour un composteur rotatif industriel de grande taille, le dimensionnement des éléments qui se compose ce système est très important et aussi le choix du système d'entraînement de l'unité rotative est très important. En s'appuyant sur un modèle mécanique qui permet de calculer la puissance de déplacement des déchets on peut et le principe de dimensionnement.

Le composteur industriel se distingue donc par un volume plus important des déchets traités, mais également par son processus normé. En effet pour le développement d'un composteur robuste l'étude des composants essentiels de ce système est primordiale notamment, le support avec les galets, tambour rotatif et ventilateur soufflant et extracteur de l'air.

## 2 Schéma cinématique de système proposé

La figure 4. 1 représente le schéma cinématique de système proposé qui contient trois classes d'équivalences définies ci-dessous :

- Classe 1 : Tambour rotatif
- Classe 2 : Support de système
- Classe 3 : galet support

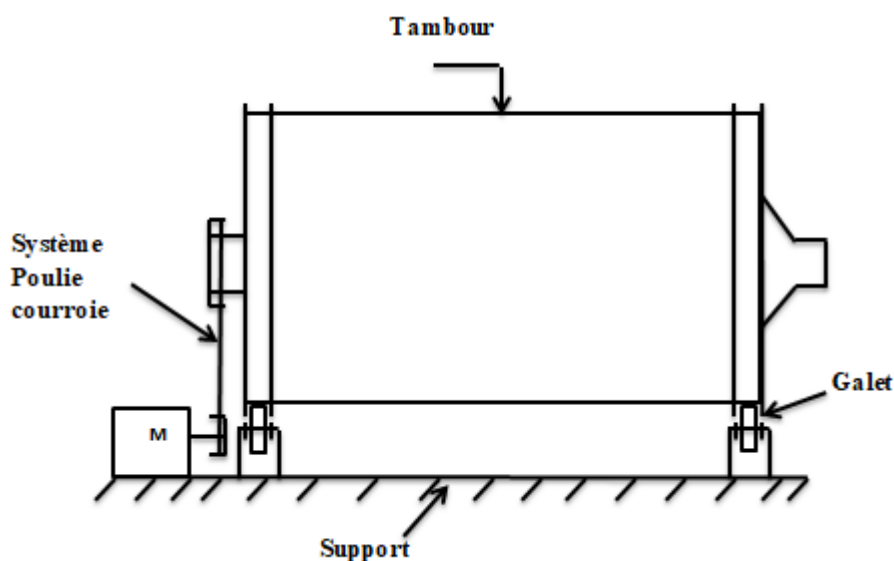


Figure 4.1: Schéma cinématique de Système proposé

Le système de transmission par poulie courroie a été choisi pour des raisons de la souplesse, possibilité de varier l'entraxe et éviter le bruit, la liaison entre la classe 1 et classe 2 est une liaison pivot.

### 3 Dimensionnement des dispositifs de composteur rotatif

Afin de dimensionner le composteur rotatif, vous avez fixé les dimensions de tambour (diamètre, longueur) et la densité des déchets organiques.

- Longueur de tambour 2 m
- Diamètre intérieur 1 m
- La densité de déchets organiques  $\rho_d = 900 \text{Kg} / \text{m}^3$

#### 3.1 Détermination de l'épaisseur de tambour

D'après le chapitre 3 paragraphes 4.1 l'épaisseur minimale est calculée par l'équation :

$$e = \frac{p_i \cdot d_i \cdot s}{2\sigma_e} \quad (1)$$

Où :

$\sigma_t$  : Contrainte transversale en (MPa)

L: longueur du tambour rotatif en (mm)

$p_i$ : Charge appliquée sur le tambour (N / mm<sup>2</sup>)

s : Coefficient de sécurité

$\sigma_e$  : Limite élastique en (MPa)

Tableau valeur de l'épaisseur :

**Tableau 4. 1: Valeur de l'épaisseur**

$p_i$ (MPa)	$d_i$ (mm)	$\sigma_e$ (MPa)	e(mm)
0.00441	1000	172	0.038

D'après le calcul de l'épaisseur on a trouvé une valeur inférieure à 1 mm et pour des raisons de la déformation à cause des soudures des chicanes à l'intérieur, on a choisi une épaisseur de 2 mm pour le tambour rotatif.

### 3.2 Dimensionnement du système d'entraînement du tambour rotatif

Le tambour rempli de déchets organiques d'une densité (900 kg/m<sup>3</sup>), est guidé en rotation par quatre galets supports à roulement, la vitesse de rotation est lente de 4 tours par minute, oblige de l'utilisation d'un motoréducteur avec d'autre système de transmission poulie courroie, le choix de motoréducteur et dimensionnement de poulie courroie nécessite de calculer la puissance mécanique pour déplacer les déchets dans le tambour.

#### 3.2.1 Modèle mécanique de la puissance pour déplacer les déchets

Les composteurs rotatifs fonctionnent généralement à faible vitesse de rotation, où le mouvement de la matière est limité au "glissement" ou au "roulement". La matière est soulevée par la paroi du composteur comme un corps rigide jusqu'à ce qu'elle atteigne son angle critique de repos  $\theta$  et commence à culbuter Figure 4. 2 ce point définit généralement la puissance absorbée la plus élevée (notée  $P_m$ ) pour surmonter l'énergie potentielle gravitationnelle de la matière couchée.

$$P_m = m.g.v \quad (2)$$

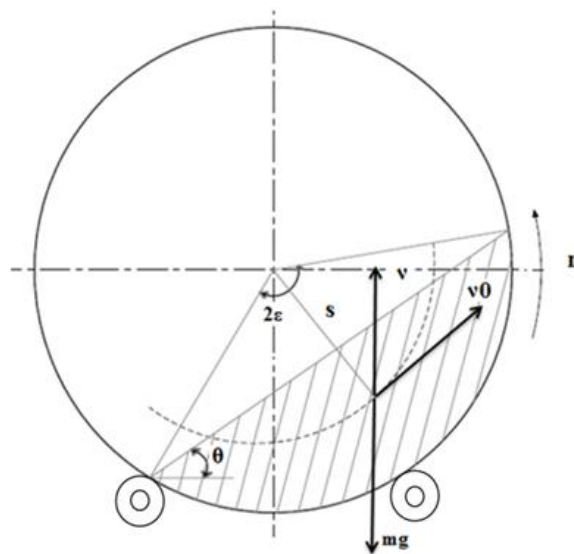


Figure 4.2: Mouvement des matières dans la section transversale du composteur

Où  $g$  est l'accélération gravitationnelle ( $g = 9,81 \text{ m / s}^2$ ) ;  $m$  est la masse de la matière à l'intérieur du composteur, calculée comme le produit de la densité de la matière  $\rho_d$ , de la longueur du composteur  $L$  et de la surface  $S_c$  occupée par la matière se trouvant dans la section transversale du composteur.

$$m = \rho L S_c \quad (3)$$

La vitesse  $v$  dans l'équation est la composante verticale de la vitesse  $v_0$  pour soulever les

Déchets organiques.

$$v = v_0 \cdot \sin\theta = \frac{\pi \cdot s \cdot n \cdot \sin\theta}{30} \quad (4)$$

Où  $n$  est la vitesse de rotation du composteur,  $s$  est la distance entre l'axe de rotation et le centre de masse du matériau couché, qui peut être calculée sur la base d'une relation géométrique.

$$s = \frac{D^3 \sin^3 \varepsilon}{12 S_c} \quad (5)$$

Où  $D$  est le diamètre intérieur du tambour kit ;  $\varepsilon$  est l'angle de remplissage défini comme l'angle circonférentiel couvrant la moitié du matériau couché Figure 2. L'angle de remplissage est géométriquement corrélé avec le degré de remplissage  $f$  (le rapport entre la surface du matériau couché et la section transversale du composteur) par :

$$f = \frac{(\varepsilon - \sin\varepsilon \cos\varepsilon)}{\pi} \quad (6)$$

La substitution de l'équation 3 et l'équation 4 dans l'équation 2 donne :

$$P_m = 0.086 \cdot 10^{-3} \cdot n \rho L D^3 \sin^3 \varepsilon \sin\theta \quad (7)$$

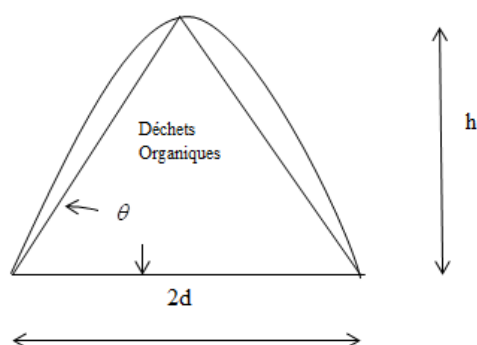
Dans l'équation ci-dessus [ $D$ ,  $L$ ,  $n$ ,  $\rho$ ] sont généralement donnés comme des paramètres connus, en revanche, il suffit de déterminer les deux paramètres inconnus : l'angle de repos  $\theta$  et l'angle de remplissage  $\varepsilon$  qui est dans l'équation 6 [80].

- Angle de repos

L'angle statique de repos des déchets organiques a été mesuré à l'aide de la méthode de coulée [81]. L'angle de repos a été déterminé en utilisant un cylindre métallique sans fond de 250 mm de haut et 150 mm de diamètre. Le cylindre a été placé sur la surface du fer et rempli de déchets organiques en vrac. Le cylindre a été soulevé très lentement. Un appareil photo numérique a été placé exactement devant le cylindre pour prendre des images numériques, qui ont ensuite été analysées pour l'angle de repos statique à l'aide d'un logiciel informatique. L'angle de repos statique a été calculé à l'aide de l'équation suivante par [82] figure 4. 3

$$\theta = \arctan\left(\frac{2h}{d}\right) \quad (8)$$

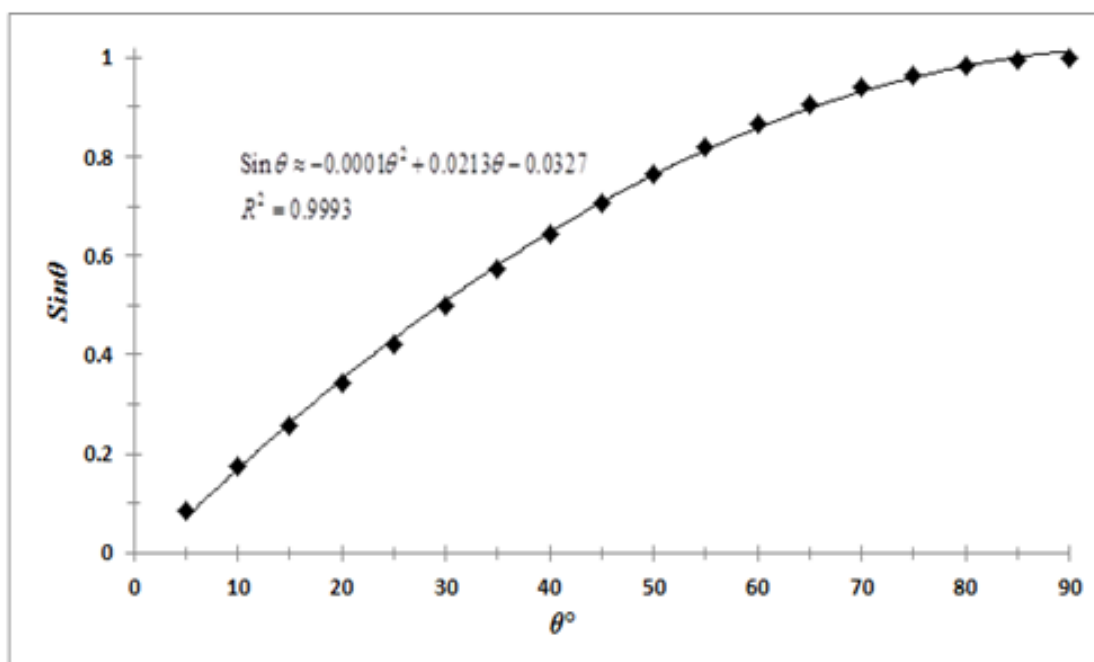
La figure ci-dessous illustre l'angle de repos des déchets organiques



**Figure 4.3: Angle de repos des déchets organiques**

Où :  $\theta$  est l'angle de repos ; h est la hauteur du cône ; d est la base du cône. La mesure de l'angle de repos a été répétée dix fois. L'angle de repos peut varier de  $5^\circ$  à  $90^\circ$ , la relation peut être un modèle de régression bien approximé avec une valeur R au carré élevée de 0,9993 ; voir figure 4. 4.

$$\sin\theta \approx -0.0001\theta^2 + 0.0213\theta - 0.0327 \quad (9)$$



**Figure 4.4: Régression de  $\sin\theta$  on  $\theta$  (for  $5^\circ < \theta < 90^\circ$ )**

- Angle de remplissage  $\varepsilon$

La détermination de l'angle de remplissage  $\varepsilon$  dans l'équation 6, peut être calculée puisque la quantité totale de matière organique à l'intérieur du composteur est connue comme une

constante. Cependant, les composteurs rotatifs fonctionnent généralement comme des composteurs par lots, car la sortie du composteur a un orifice plus petit qui ne laisse sortir que de petits grains de compost.

La puissance mécanique sera maximale à la moitié du tambour on prend le niveau de remplissage  $0 < f < 0,5$ . Dans la figure 4. 5, le degré de remplissage  $f$  est lié au niveau des sinus<sup>3</sup> $\varepsilon$  selon leur relation géométrique décrite dans l'équation 6. Pour la plage d'intérêt ( $0 < f < 0,5$ ), la relation peut être un modèle de régression bien approximé avec une valeur élevée de R au carré de 0,9995.

$$\sin^3 \varepsilon \approx f(-4.33f + 4.15) \quad (10)$$

Comme le montre la figure 4. 5 par la ligne continue

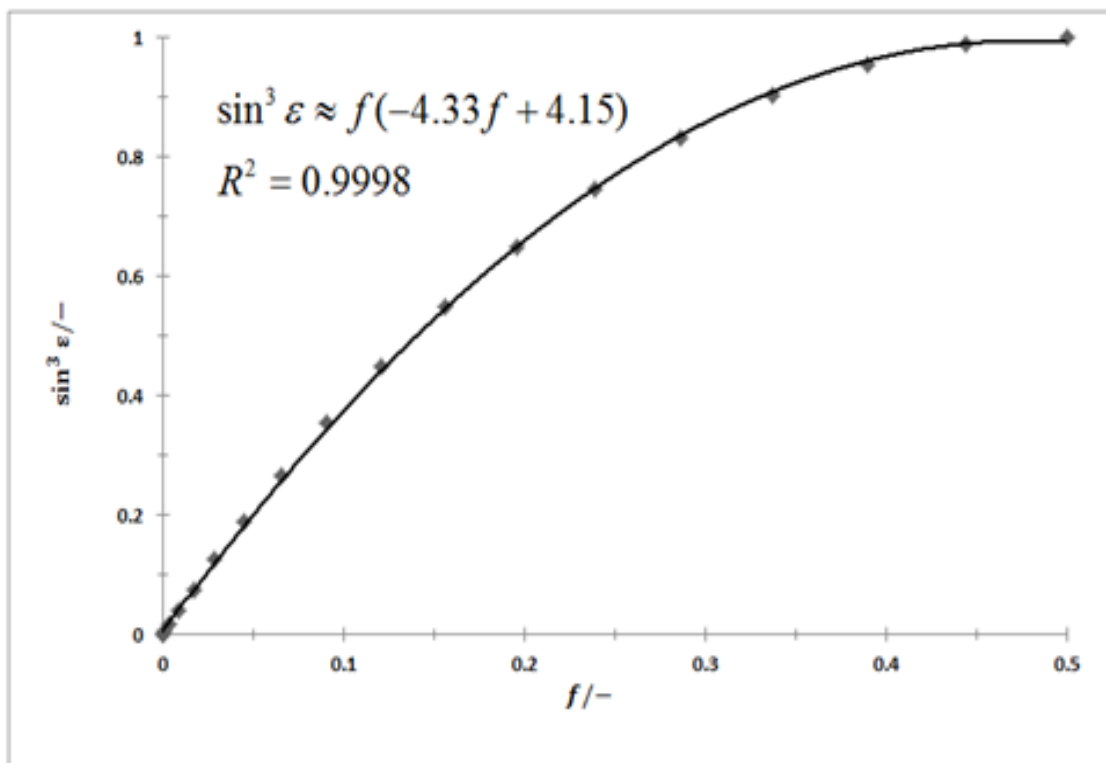


Figure 4.5: Régression de  $\sin^3 \varepsilon$  sur  $f$  (pour  $0 < f < 0,5$ ).

- Modèle proposé

À partir d'équation 3, on peut obtenir la surface des déchets organiques dans la section transversale du composteur rotatif. En divisant  $S$  par la surface de la section transversale du composteur rotatif  $\pi D^2 / 4$ , le degré de remplissage peut être calculé comme suit.

$$f = 1.27m / \rho_d L D^2 \quad (11)$$

La substitution de l'équation 9, l'équation 10 et l'équation 11 dans l'équation 7 donne

$$P_m = \left[ \frac{10^{-4} n.m(4.15\rho_d.D^2.L-5.50m)(-0.0001\theta^2 + 0.0213\theta - 0.0327)}{\rho_d.D.L} \right] \quad (12)$$

L'équation (12) décrit la puissance absorbée pour le mouvement des déchets organiques comme une fonction explicite de la taille du composteur rotatif (L, D), de la masse à introduire dans le composteur (m), de la vitesse de rotation et des propriétés des déchets organiques ( $\theta$ ,  $\rho_d$ ), et est donc très utile pour la conception de la machine ainsi que pour le dimensionnement du système moteur/entraînement. Il convient de souligner que, comme les propriétés des matériaux (angle de repos, densité apparente) peuvent changer en raison des propriétés des déchets organiques, il est suggéré, dans ce cas, d'utiliser leur valeur moyenne. Pour calculer la puissance mécanique à partir de l'équation 12 nous avons ajouté un coefficient de sécurité de l'ordre 10% de la valeur de puissance calculée voir tableau 4. 2

**Tableau 4. 2: Puissance mécanique pour déplacer les déchets organiques**

n (tr/min)	M (Kg) Pour f=0.5	$\rho_d$	$\theta$ (°)	$D_i$ (m)	L(m)	$P_m$ (KW) majoré de 10%
4	706.5	900	45°	1	2	0.445

### 3.2.2 Détermination de la puissance de moteur

D'après le chapitre 3 paragraphe 4.2.2, la puissance motrice peut être calculée en fonction de la puissance mécanique pour déplacer les déchets et les rendements par la relation suivante

$$P_u = \frac{P_m}{\eta_p \cdot \eta_r} \quad (13)$$

La valeur de la puissance motrice est donnée dans le tableau 3. 3.

**Tableau 4. 3: Puissance motrice**

$\eta_d$	$\eta_r$	$P_m$ (KW)	$P_u$ (KW)
<b>0.9</b>	0.9	0.447	0.555

D'après nos calculs on choisit un motoréducteur de marque compabloc 3233 pour plus détail voir annexe C, les caractéristiques de ce moteur est donné dans le tableau 4.4

**Tableau 4. 4: Caractéristique technique de motoréducteur CB 3233**

Vitesse de sortie en (tr/min)	Rapport de réduction	Puissance en (KW)
11.8	<b>123</b>	<b>0.55</b>

#### 4 Étude du support de composteur rotatif

Le support de composteur rotatif est réalisé par des profilés mécano soudée de section rectangulaire creuse, le matériau des profilés est l'acier noir S235, la structure est modélisée sous Solidworks© atelier mécano soudée, nous avons étudié la structure comme des poutres assemblées par soudage.

Objectif de cette simulation numérique sous Solidworks© simulation est de déterminer les contraintes maximales et les déplacements maximale, nous avons pris comme facteur de sécurité  $s=3$ .

- Conditions aux limites et chargements

Le support de composteur rotatif est encastré avec le sol est soumis à des charges concentriques au niveau des galets, ces charges sont la masse de tambour et la masse de déchets organiques On suppose que le tambour complètement rempli.

- Définition des conditions aux limites :

Noeud 1:  $dx = dy = dz = \text{rotx} = \text{roty} = \text{rotz} = 0$

Noeud 2:  $dx = dy = dz = \text{rotx} = \text{roty} = \text{rotz} = 0$

Noeud 3:  $dx = dy = dz = \text{rotx} = \text{roty} = \text{rotz} = 0$

Noeud 4:  $dx = dy = dz = \text{rotx} = \text{roty} = \text{rotz} = 0$

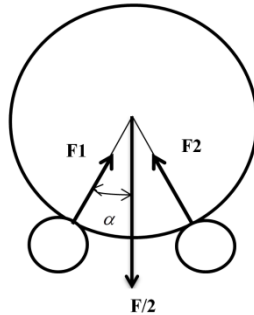
- Définition des conditions des charges :

Les quatre charges concentriques sont appliquées au niveau des galets, la masse des déchets organiques égale 1413 Kg et la masse estimée de tambour 120 Kg ce qui implique que la masse totale appliquée sur les galets est égale 1533 kg.

Chaque galet supporte une charge figure 4. 6



$$F_2 = F_1 = \frac{15038}{4 \cdot \cos \alpha} \quad (13)$$



**Figure 4.6: charge appliquée sur un galet**

Avec  $\alpha = 36^\circ$ , chaque galet supporte une charge de 4647 N

- Définition du matériau de support

Matériaux des poutres : S235four

Module de Young = 210000 MPa

Coefficient de Poisson = 0.28

Module de cisaillement = 81712 MPa

Masse volumique = 7850 kg/m<sup>3</sup>

Coefficient de dilatation = 1.25E-005 1/K

- Définition de section de support

La section des poutres utilisée pour les supports du système est une section rectangulaire creuse de dimension (h=60mm, b=40mm, e=2.6mm), pour les profilés de support de moteur et le système d'extraction de l'air nous avons choisi une section carrée de dimension (h=40, e=2.6). La Simulation numérique sous Solidworks© figure 4.7 représente la distribution de la contrainte normale axiale et de flexion dans le support de composteur rotatif, la valeur maximale de cette contrainte se trouve au niveau le contact avec le support de galet d'une valeur de 47. 831 MPa.

La figure 4.8 illustre les déplacements dans le support, la valeur maximale de ce déplacement de l'ordre de 1/20 mm.

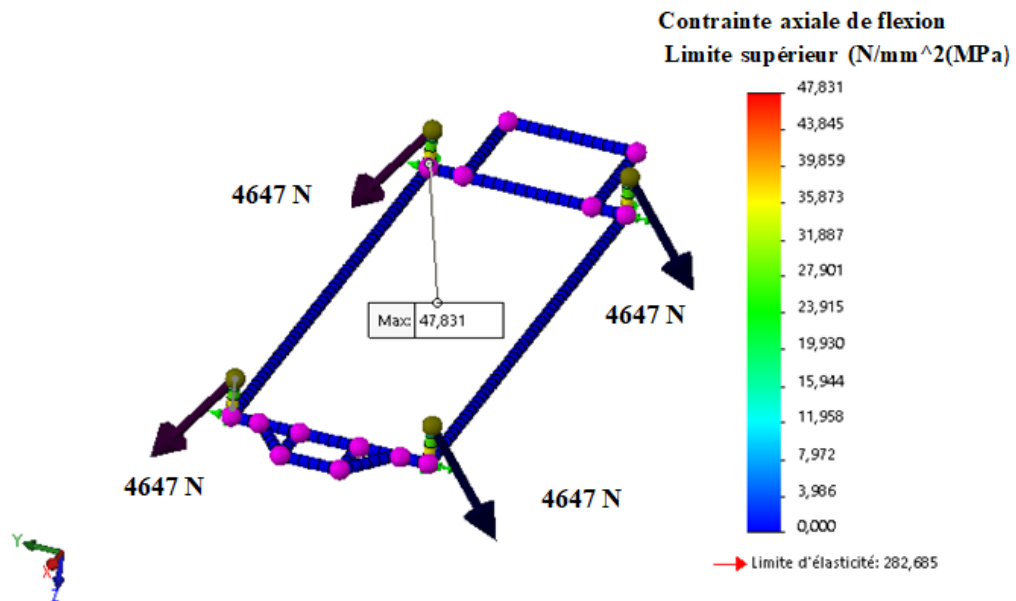


Figure 4.7: Diagramme de distribution des contraintes axiales de flexion, la contrainte maximale affichée égale 47.83

re

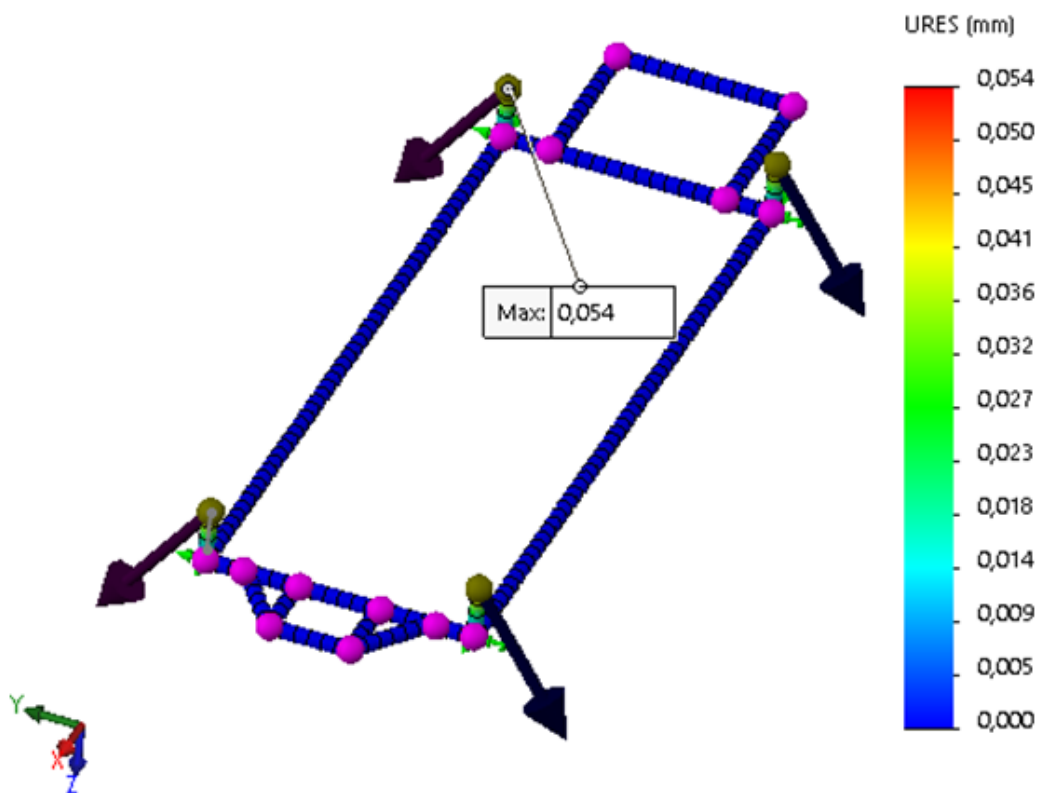


Figure 4.8: Les déplacements dans le support du composteur

## 5 Conceptions des composants de composteur rotatif sous Solidworks©

D'après l'étude et dimensionnement des dispositifs de composteur rotatif, nous avons passé à la phase de conception assistée par ordinateur afin de modéliser le système à partir des données de dimensionnement pour générer les dessins de définitions de tous les composants du système, à la fin nous avons réalisé l'assemblage de composteurs pour générer le dessin d'ensemble et toutes les vues afin de visualiser et simuler le système avant de passer la réalisation, nous avons cité ci-dessous la modélisation des éléments essentielle de notre composteur rotatif .

### 5.1 Support avec les galets

Le support est l'élément essentiel qui permet de supporter tous les éléments de système ,il est construit à partir des profils mécano soudé ,les quatre galets à roulement sont montés dans le support ,la figure 4.9 représente la modélisation de l'ensemble support et les galets sous Solidworks© ,le dessin de définition de support est donné dans l'annexe D.

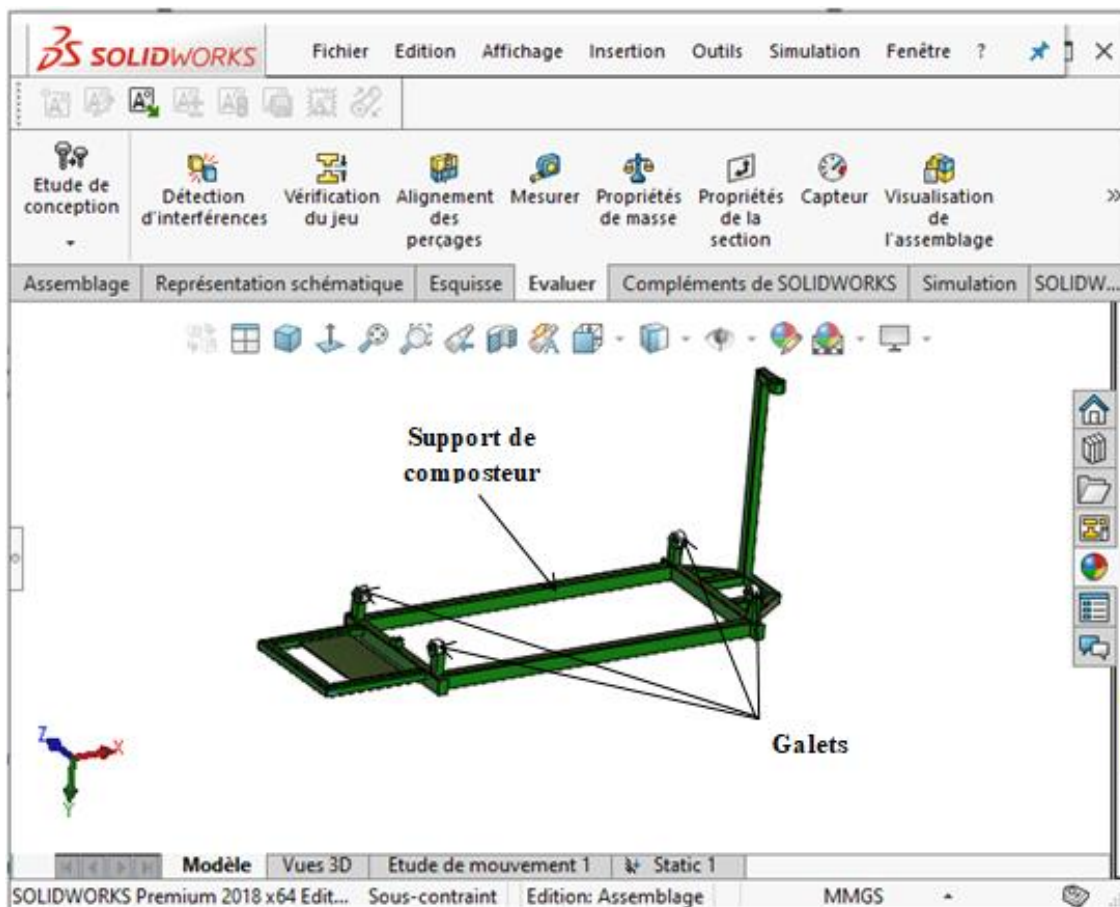


Figure 4.9: Vue 3D de châssis de composteur rotatif

## 5.2 Tambour rotatif

Le tambour rotatif est un élément qui permet de contenir les déchets et le mélange grâce à la forme cylindrique et des chicanes soudées à l'intérieur, il est construit à partir une tôle d'acier passer par un procédé de roulage, sur la paroi gauche on a fixé une poulie à deux gorges la sortie du compost se trouve sur la paroi latérale droite du tambour. Nous avons laissé un trou à gauche pour installer le système d'aération ainsi une pompe d'injection de l'eau en cas où la température dépasse la valeur limite. La figure 4. 10 illustre la modélisation 3D de tambour rotatif sous Solidworks©. Pour plus de détail voire l'annexe D.

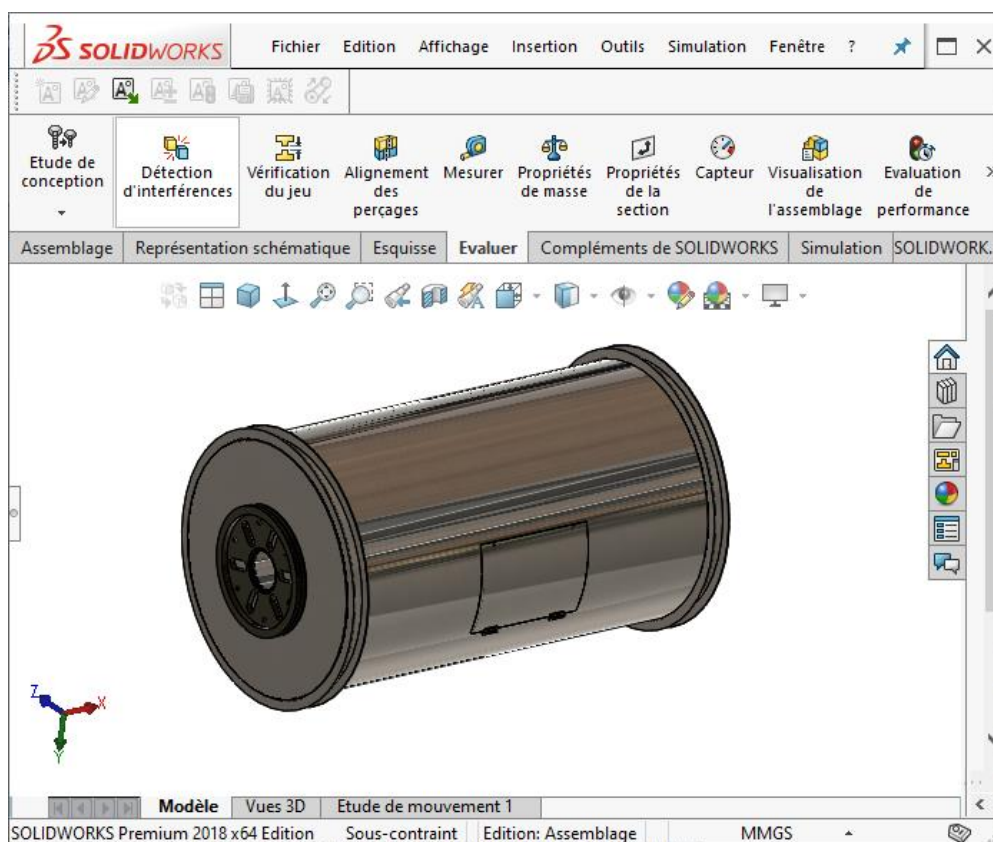


Figure 4.10: Vue 3D du tambour rotatif

## 5.3 Ventilateur soufflant et Extracteur de l'air

Aération est un paramètre essentiel pour un bon compostage, ce système est composé de deux systèmes de ventilation, ventilateur soufflant pour aérer les déchets compostables placés dans l'entrée du système et ventilateur d'extraction permet l'extraction de l'odeur vers le bio filtre à charbon.

La figure 4. 11 Représente l'emplacement des deux ventilateurs dans le système.

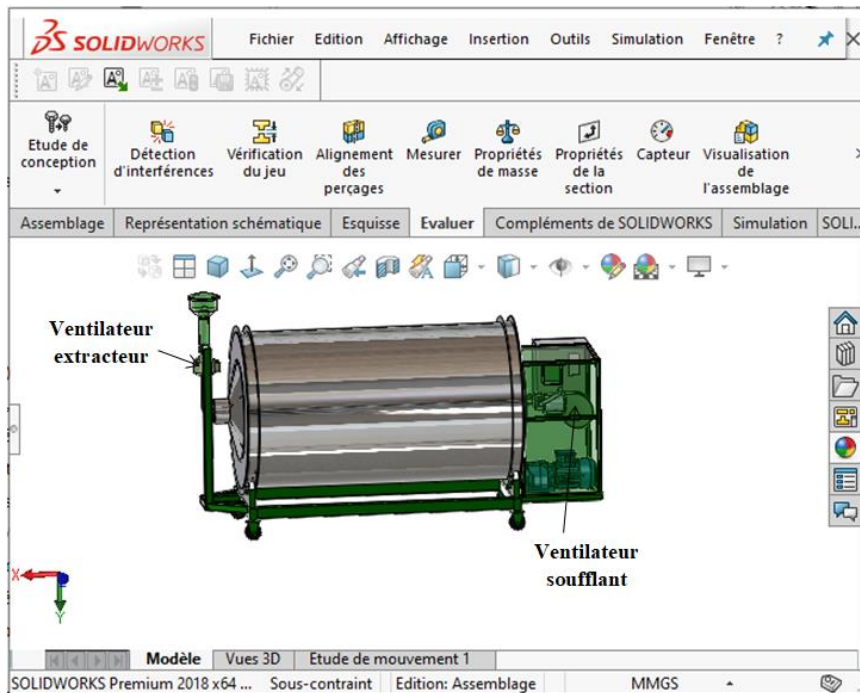


Figure 4.11: Vue 3 D Assemblage de système d'aération

#### 5.4 Model 3 D de composteur rotatif

La figure 4.12 représente la modélisation 3D de l'assemblage de composteur sous Solidworks© de différents composants de système, à gauche la sortie du système et l'évacuation de l'odeur, à droite se trouve le système d'entraînement.

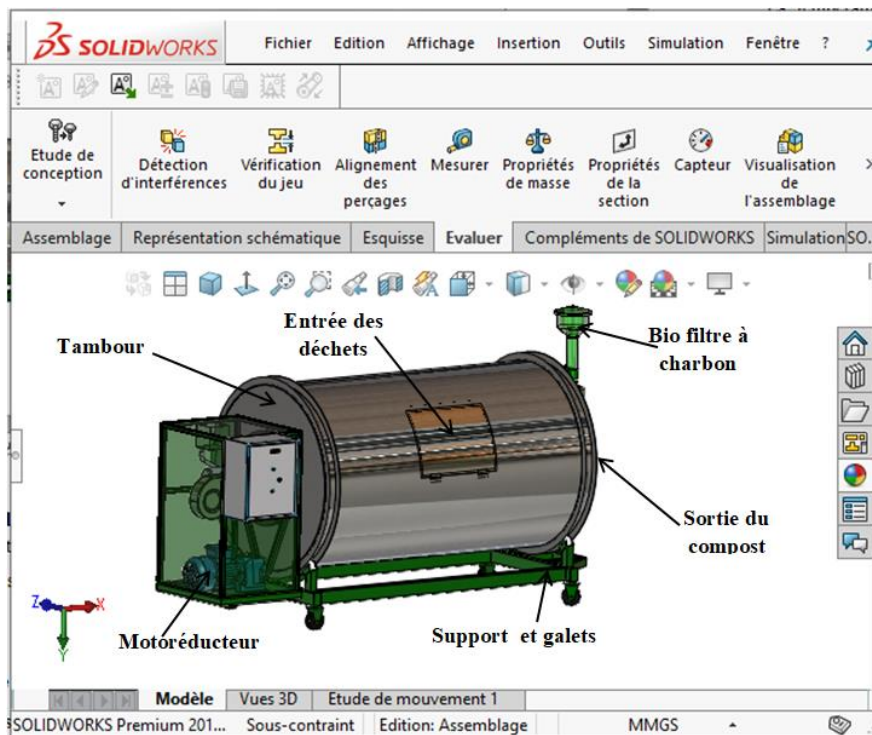


Figure 4.12: Vue 3D de composteur rotatif

## **5.5 Dessin d'ensemble**

Le système de compostage à tambour rotatif [83] figure 4. 13 est utilisé pour traiter les déchets alimentaires, les déchets agricoles et tout autre déchet organique par un processus de compostage aérobie, complètement mélangé par la rotation du tambour et les feuilles d'acier soudées à l'intérieur. Le tambour rotatif est fabriqué en tôle d'acier inoxydable et soutenu par un support (2) avec des rouleaux (11), il a une porte à charnière (12) située sur la partie longitudinale du tambour qui est utilisée pour le chargement des déchets organiques solides. La sortie du compost est continue grâce à la forme conique sur le côté droit et aux tôles soudées sur celui-ci.

L'introduction d'air homogène dans le tambour se fait par aération qui est réalisée au moyen d'un ventilateur centrifuge (3) L'évacuation de l'odeur vers l'extérieur est réalisée par le ventilateur centrifuge à gain (7) et un filtre à charbon installé dans la cheminée afin d'absorber cette odeur (8). Le tambour est guidé en rotation par quatre rouleaux (11) qui tournent à une vitesse de (4 rpm) grâce à un motoréducteur (9) et un système de poulie à courroie (10). La température, l'humidité et la teneur en méthane CH<sub>4</sub> sont contrôlées par des capteurs (6) qui sont installés sur le tube rond (5). L'eau est injectée par une pompe (4) si nécessaire, les données collectées sont traitées à l'aide d'une carte de commande installée dans le panneau de contrôle (13).la nomenclature des pièces est donnée dans l'annexe D.

La figure suivante représente le dessin d'ensemble de composteur innovant

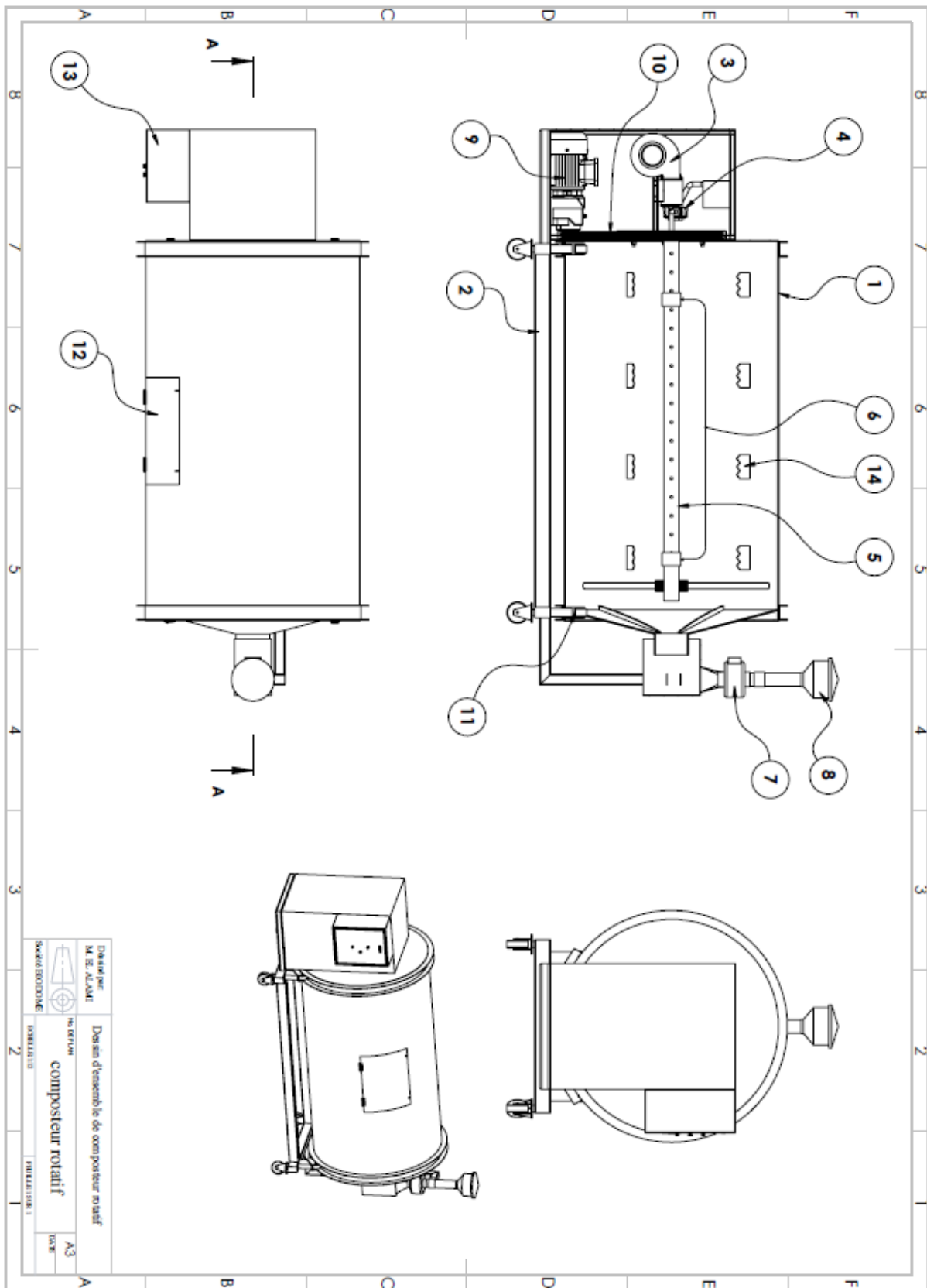


Figure 4.13: Dessin d'ensemble de composteur rotatif



## 6 Partie de commande du système

Le système collecte les données (température, humidité, gaz CH<sub>4</sub>) du composteur rotatif et les envoie à un serveur via un module Wi-Fi (EPS 8266). Après le traitement des données par une carte à microcontrôleur, ces données sont stockées dans le Cloud, qui est accessible par l'utilisateur figure 2 afin de les visualiser en temps voulu, ce qui peut apparaître sous forme de tableau ou de graphique. Ci-dessous sont présentés les composants utilisés dans le système.

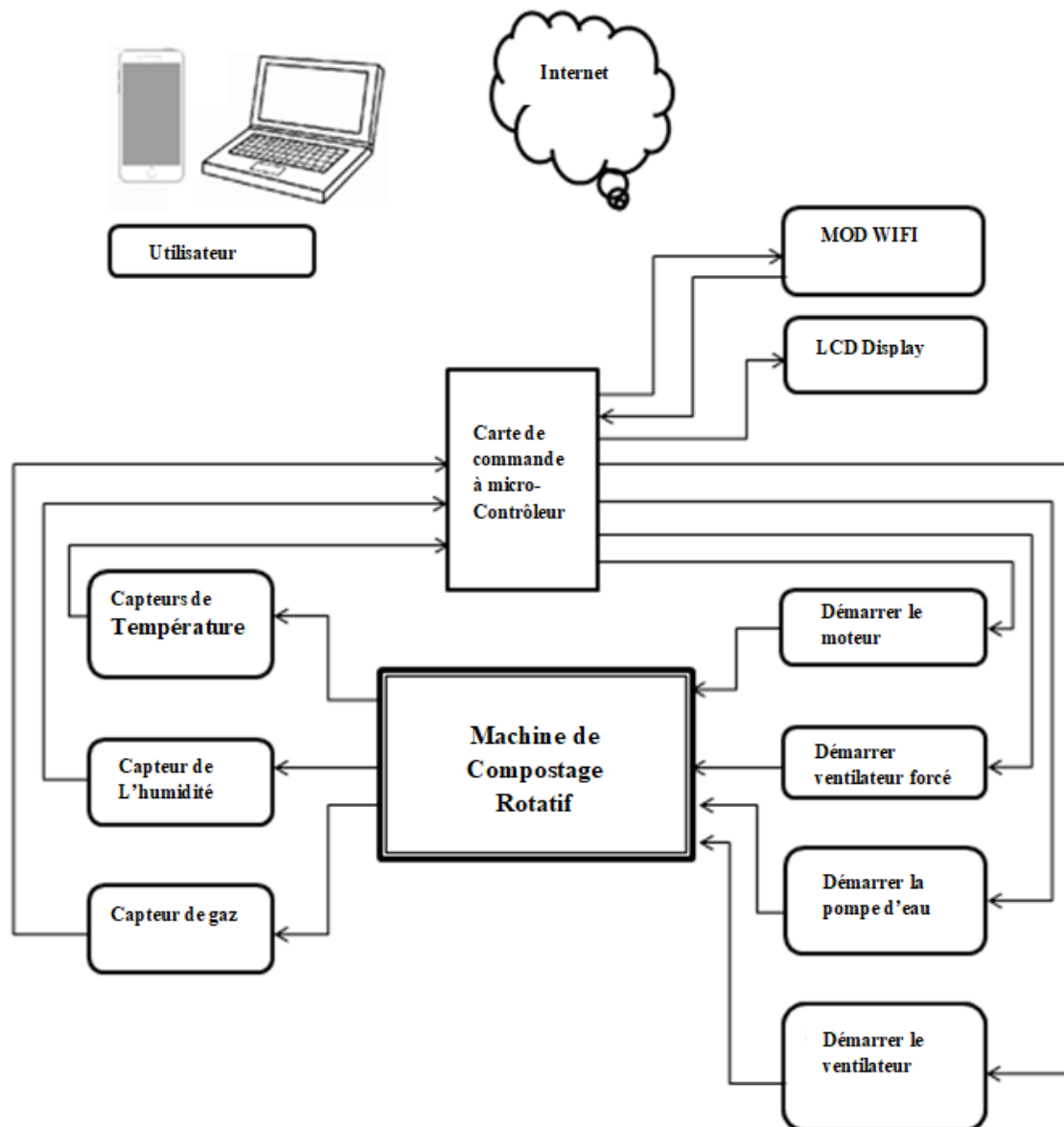


Figure 4.14: Schéma fonctionnel du système mécatronique

### 6.1 Capteurs de température

Pour la mesure de la température dans le tambour figure 4. 13 nous avons utilisé deux capteurs DS18B20 installés dans la machine il fonctionne sur le 3 à 5.5 V dc. La plage de température



(-55°C à +125°C). C'est un boîtier à 3 broches avec une seule ligne ; il résiste bien en milieu agressif.

## **6.2 Capteurs d'humidité**

Le capteur d'humidité possède 6 broches, dont 2 sont utilisées pour l'émission et la réception. Les capteurs d'humidité sont utiles pour mesurer l'humidité du compost. Si les mesures d'humidité sont inférieures, des mesures appropriées peuvent être prises. Il est doté d'une longue sonde qui plonge à l'intérieur du compost dans la machine. La teneur en humidité peut être déterminée à l'aide de la constante diélectrique. Le constant diélectrique est calculé par la capacité de l'électrode placée sur la sonde. Il possède un triple mode de sortie qui est analogique et numérique en série.

## **6.3 Capteur de gaz**

Pour mesurer l'émission de méthane, nous pouvons utiliser le capteur de gaz MQ 2 et MQ 4. MQ 2 a une bonne sensibilité au méthane et au GPL, à l'hydrogène et au propane. Il fonctionne avec une tension comprise entre 3.3 et 5 V.

MQ 4 sont des capteurs à 6 broches, les distributions de 6 broches sont pour récupérer le signal. Deux broches servent à chauffer le courant, car il est peu sensible à la fumée et à l'alcool.

## **6.4 Carte à microcontrôleur**

Une carte à microcontrôleur Atmega328 et 14 broches pour les entrées et sorties numériques. A bord, il dispose d'un port de connexion USB, d'une prise de courant, d'un bouton de réinitialisation, d'un résonateur de 16 MHz. En plus de cela, il dispose également de SDA, SCL et AREF. Il possède 6 broches d'entrée analogique. Il possède également une mémoire flash de 14 Ko. À la broche numérique 0 et 1, il dispose d'une communication série UART. La tension de fonctionnement de cette carte est de 5V. Nous pouvons l'alimenter par un adaptateur ou en connectant un câble USB au PC.

Il possède une SRAM de 2 Ko et une EEPROM de 1 Ko.

### **3.5 Carte à microcontrôleur Wifi**

L'ESP8266 est un microcontrôleur doté d'une carte WIFI. Il peut donc se comporter comme un point d'accès WIFI, et permettre à l'utilisateur de s'y connecter directement depuis un appareil connecté.

Ce composant dispose d'une grande capacité de stockage et de traitement suffisamment puissante pour être intégré à des capteurs et des applications web.

## **6.5 Système proposé pour la partie contrôle**

Le système proposé [83] contrôle le processus de compostage pour former un compost mature pendant 4 semaines. En utilisant le système de surveillance et le système mécanique de la figure ci-dessous, nous pourrions faire un compost complet de nutriments avec moins d'émissions de méthane et moins d'odeurs pendant l'opération de compostage.

Il existe trois paramètres principaux du compost, à savoir la température, la teneur en humidité et la teneur en oxygène pour le compostage aérobic. Nous pouvons visualiser ces mesures acquises en temps réel sur le serveur web.

Les étapes de la surveillance de la machine à composter sont les suivantes figure 4. 6 :

Étape I : Mise sous tension, attente de l'initialisation de la machine.

Étape II : Attendre l'initialisation des capteurs.

Étape III : surveiller tous les paramètres individuellement ; vérifier les conditions d'aération, le niveau d'humidité et le niveau de température.

Étape IV : Si le taux d'humidité baisse de 40 %, l'injection d'eau par une pompe démarre automatiquement. Lorsque le taux d'humidité dépasse 40%, la pompe d'injection d'eau est fermée. Si le taux d'humidité dépasse 60 %, le ventilateur se met en marche.

Étape V : si le degré de température dépasse 60°, la pompe à eau et le ventilateur d'aération se mettront en marche pour abaisser le degré de température dans le compost ; si le degré de température diminue de 20°, l'air chaud sera activé par le ventilateur et la résistance chauffante installée en aval du ventilateur.

Étape VI : si le taux d'aération diminue, le ventilateur soufflant se mettra automatiquement en marche et le ventilateur aspirant sera activé pour absorber l'odeur.

Étape VII : Après avoir vérifié tous les paramètres, ils seront affichés sur l'écran LCD.

Étape VIII : Toutes les données sont envoyées la carte de commande à microcontrôleur Wi-Fi ESP8266 au serveur, ces données seront affichées sur l'application web. Étape du cycle : Cette étape consiste à décrire le cycle de démarrage de la machine.

La figure ci-dessous illustre l'organigramme de fonctionnement

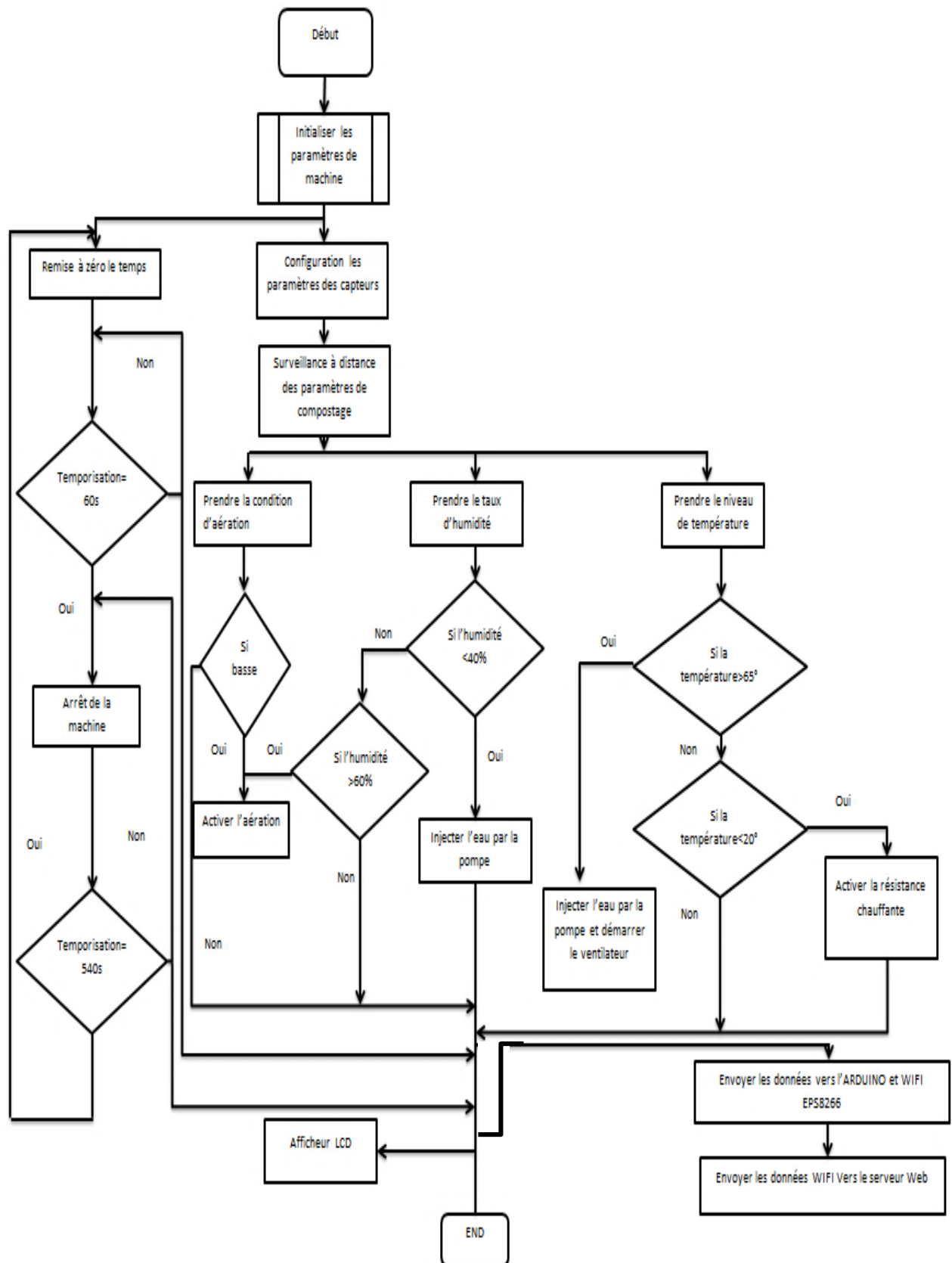


Figure 4.15: Organigramme de fonctionnement

## **7 Prototype de composteur rotatif à tambour**

Nous avons réalisé le premier prototype de ce composteur [83] en collaboration avec la société BIODÔME, le processus de fabrication de prototype passe plusieurs phases de fabrication, après génération des dessins de définition de chaque composant du système et élaboration de l'avant de projet d'étude de fabrication.

### **7.1 Le processus de fabrication**

- Roulage de la tôle et soudage les tôles du fond de tambour, sciage
- Sciage des tôles pour former quatre bandes circulaires pour le guide des galets
- Soudage de la forme conique à la sortie du composteur rotatif
- Sciage des profilés rectangulaire, assemblage par soudure pour former la structure du châssis puis placer les galets à roulement dans leur emplacement
- L'assemblage de toute la composante de système

### **7.2 Réalisation de prototype de composteur rotatif semi-industriel**

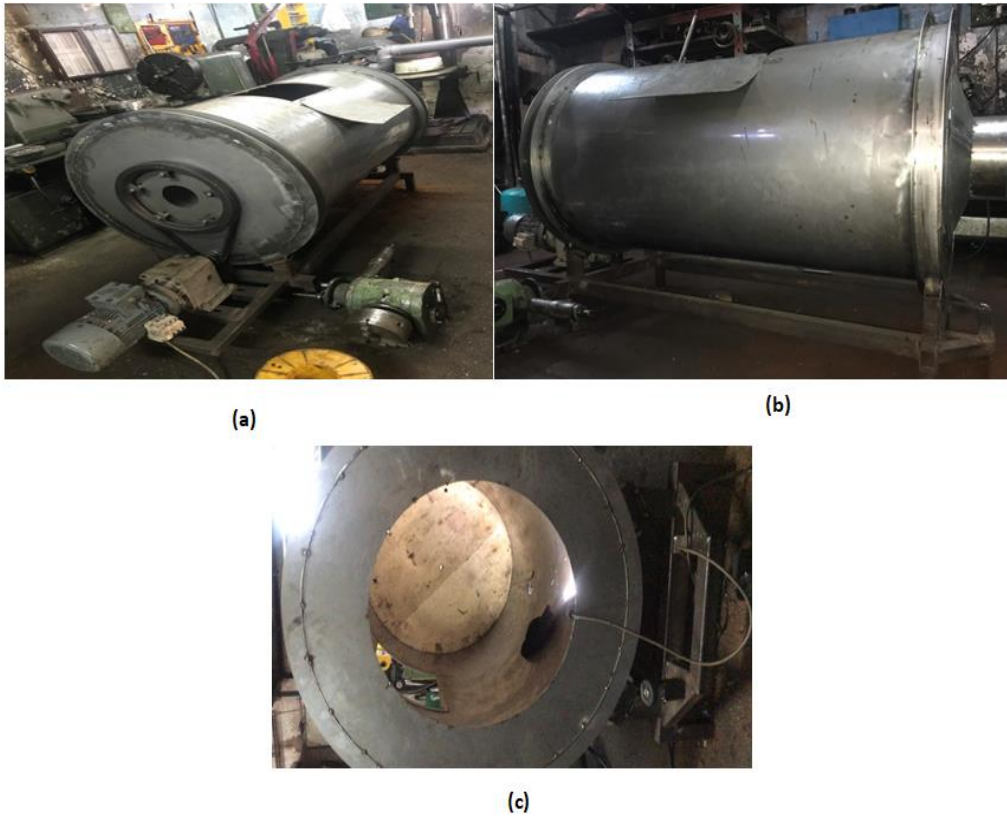
La réalisation de ce prototype a été faite dans un atelier classique qui ne nécessite pas d'équipements de haute performance grâce à des solutions simples et un design simple.

Le système de l'entraînement poulie courroie à deux gorges est assemblé dans la partie latérale du tambour par assemblage vis écrou, le trou situé sur la partie latérale gauche du tambour c'est pour installer le système d'aération ainsi les capteurs pour contrôler les paramètres de compostage figure 4.16.a.

La forme conique située la paroi latérale droite c'est pour faciliter la récupération de compost figure 4.16.b.

Durant la phase de soudage pour construire un tambour nous avons utilisé des disques en bois pour que la forme cylindrique du tambour ne déforme pas figure 4.16.c, par la suite nous avons soudé les chicanes à l'intérieur de tambour.

Le prototype réel figure 4. 17 de composteur rotatif ou cours de test dans un établissement public pour tester le procédé de compostage et aussi tester la performance de ce prototype.



**Figure 4. 16 : réalisation de prototype dans l'atelier**



**Figure 4.17: Prototype Réel de composteur rotatif à tambour**

## **8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons proposé d'autre solution pour le composteur rotatif pour améliorer les performances et de traiter les déchets organiques avec une méthode continue pour cela nous avons dimensionné le système d'entraînement utilisé tous les techniques et les remarques de la conception de composteur rotatif supporté par des paliers ainsi proposés un modèle pour gérer la consommation de l'énergie électrique durant la phase de compostage.

La deuxième partie de ce chapitre présente la conception de nouveau prototype du système par l'utilisation de logiciel Solidworks© afin de générer les dessins 2-D et 3D de chaque composant de tambour rotatif en détaillant pour chaque composant les formes et les dimensions. Ensuite suite aux dessins détaillés des composants on fait l'assemblage de dessins d'ensemble on respecte les liaisons entre les composants.

La troisième partie de ce chapitre présente la partie de commande du système nous avons élaboré un algorithme de fonctionnement du système.

La dernière partie de ce chapitre nous avons parlé sur les étapes de fabrication de ce prototype et le résultat de travail c'est la réalisation de deuxième composteur rotatif en effet après la fabrication de composteur rotatif en recours à un test global pour tester le fonctionnement du système.

## **Conclusion générale et perspective**

Il est bien connu que les pays en développement ne contribuent pas en grande partie au réchauffement climatique, ne serait-ce qu'à travers les décharges et les déchets non traités qui causent un important dégagement de méthane, ayant un pouvoir sur l'effet de serre 21 fois plus que celui du CO<sub>2</sub>. Dans cette recherche l'intérêt est porté sur l'étude des solutions durables à base de déchets organiques faisant partie intégrante d'une gestion rationnelle et contribuant à la préservation de l'environnement par le compostage qui reste la meilleure solution à adopter, vu les avantages qu'il procure vis-à-vis de l'environnement, et de l'écosystème en général.

Le travail présenté dans ce mémoire aborde la conception et la réalisation d'un composteur rotatif à tambour décentralisé qui est un moyen qui assure la dégradation de la matière organique dans des conditions saines, sans avoir besoin d'intervention des connaisseurs en compostage, cette technologie connaît un grand essor, pour répondre au développement de pays et la protection de l'environnement. En outre, ce composteur semi-industriel, destiné exclusivement au grand producteur des déchets organiques dont le taux de production arrive à 30% du total de la fraction organique collectée tel que les cantines des entreprises dans les zones industrielles, les restaurants, hôpitaux, les hôtels ....

Dans cette thèse, nous avons procédé à la mise en œuvre de développement d'un composteur rotatif semi-industriel conçu pour l'accélération du compostage de la matière organique à la source, sans aucune nuisance sonore ni d'odeur, le composteur rotatif à tambour pourra être alimenté quotidiennement par des déchets organiques et permettra d'avoir du compost de haute qualité agronomique quotidiennement. Ce système a été réalisé en parfaite cohérence avec les besoins nécessaires de traitement des déchets en répondant aux contraintes et exigences rencontrées.

Cette fabrication a été réussie grâce aux techniques de conception, modélisation et simulation via logiciel et le test sur le terrain pour valider la conception et améliorer les solutions ainsi que de tirer les meilleurs avantages. Le système que nous avons proposé et testé à petite échelle a été breveté auprès de l'office marocain des propriétés intellectuelles.

En perspectives, notre objectif tout d'abord est d'étaler ce travail sur d'autres modèles passant par la réalisation des prototypes sophistiqués des composteurs domestiques autonomes, en

essayant d'abord d'étudier la performance du système, dont le but général est l'utilisation de l'énergie renouvelable à travers des panneaux photovoltaïques .Ensuite, garantir l'utilisation des matériaux faible coût pour la conception, et rendre le système démontable avec l'application des capteurs sans fils pour le contrôle des paramètres de compostage, l'analyse des propriétés physico –chimique , développement d'une application web et mobile pour gérer et stocker les informations provenant d'un réseau à fin de faire le suivi et le contrôle à distance des composteurs rotatifs.



## Référence

- [1]. E.B.A. Guttman World Archaeology, "Midden Cultivation in Prehistoric Britain -- Arable Crops in Gardens".
- [2]. Professor Jules Janick Purdue University: Lectures 12-13 History of Agricultural and Horticultural Technology in Asia ).
- [3]. Hershey, D.R., "Sir Albert Howard and the Indore process", HortTechnology 2(2):267–269, 1992.
- [4]. Peireira-Neto, J.T., "Controlled composting developing countries." Biocycle 42 (2): 2, 2001.
- [5]. M. De Bertoldi. et al., "The Biology of Composting", 1983  
<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0734242X8300100118>
- [6]. Haruta, S., Nakayama, T., Nakamura, K., Hemmi, H., Ishii, M., Igarashi, Y., Nishino, T., "Microbial diversity in biodegradation and reutilization processes of garbage", Journal of Bioscience and Bioengineering 99, 1-11, 2005.
- [7]. Parkinson, R., Gibbs, P., Burchett, S., Misselbrook, T., "Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure" Bioresour. Technol. 91 (2), 171-178, 2004
- [8]. Awasthi, M.K., Pandey, A.K., Khan, J., Bundela, P.S., Wong, J.W.C., Selvam, A., "Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting", Bioresour. Technol. 168, 214-221, 2014.
- [9]. Zhou Jiang-ming, "Effect of turning frequency on co-composting pig manure and fungus residue", Journal of the Air & Waste Management Association, 2006  
DOI:10.1080/10962247.2016.1232666
- [10]. Ogunwande, G.A., Osunade, J.A., Adekalu, K.O., Ogunjimi, L.A.O., "Nitrogen loss in chicken compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency" Bioresour. Technol. 99 (16), 7495-7503, 2008.
- [11]. Getahun, T., Nigusie, A., Entele, T., Van Gerven, T., Van der Bruggen, B., "Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality", Resour. Conserv. Recycl. 65, 79-84, 2012.
- [12]. Zhang, Y., Lashermes, G., Houot, S., Doublet, J., Steyer, J.P., Zhu, Y.G. E. Barriuso, Garnier, "Modelling of organic matter dynamics during the composting process", Waste Management 32, 19-30, 2012.

- [13]. Lazcano, C., Gomez-Brandon, M., Domínguez, J., ''Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure'', *Chemosphere* 72, 1013-1019, 2008.
- [14]. Xiu-lan, Z., Bi-qiong, L., Jiu-pai, N.I., De-ti, X.I.E., ''Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting'', *J. Integr. Agric.* 15, 232-240, 2016.
- [15]. Chen, M.P., William, S.M.P.P., Bhattacharyya, J.K., Chakrabarti, T., Devotta, S., ''Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste -a compost maturity analysis perspective'', *Bioresour. Technol.* 99, 6512-6519, 2008.
- [16]. Chen, R., Wang, Y., Wang, W., Wei, S., Jing, Z., Lin, X., ''N<sub>2</sub>O emissions and nitrogen transformation during windrow composting of dairy manure'', *J. Environ. Manage* 160, 121-127, 2015.
- [17]. Turan, N.G., ''The effects of natural zeolite on salinity level of poultry litter compost'', *Bioresour. Technol.* 99, 2097-2101, 2008.
- [18]. Zhang, H., Li, C., Li, G., Zang, B., Yang, Q., ''Effect of spent air reusing (SAR) on maturity and greenhouse gas emissions during municipal solid waste MSW composting with different pile height'' *Procedia Environ. Sci.* 16, 59-69, 2012.
- [19]. Kulikowska, D., ''Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting'', *Waste Manage* 49, 196-203, 2016.
- [20]. Qin, X.S., Huang, G.H., Zeng, G.M., Chakma, A., Xi, B.D., '' A fuzzy composting process model'', *Air Waste Manage. Ass* 57, 535-550. 2007.
- [21]. Ryckeboer, J., Mergaert, J., Coosemans, J., Deprins, K., Swings, J., ''Microbiological aspects of biowaste during composting in monitored compost bin'', *J. Appl. Microbiol.* 94, 127-137, 2003.
- [22]. Sundberg, C., Smars, S., Jonsson, H., ''Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting'' *Bioresour. Technol.* 95, 145-150, 2004.
- [23]. Ravindran, B., Sekaran, G., ''Bacterial composting of animal fleshing generated from tannery industries'', *Waste Manage* 30, 2622-2630, 2010.
- [24]. Zhang, L., Sun, X., ''Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar'' *Bioresour. Technol.* 171, 274-284, 2014.

- [25]. Chan, M., Selvam, A., Wong, J.W.C., 'Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment' 'Bioresour. Technol. 200, 838-844, 2016.
- [26]. Cempirkova, R., Soch, M., 'The analysis of real microbiological risks for dissociated slurry', Agric. Trop. Subtrop. 40, 164-171, 2007.
- [27]. Vuorinen, A.H., Saharinen, M.H., 'Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting in a drum composting system' 'Agric. Ecosyst. Environ. 66, 19-29, 1997.
- [28]. Paradelo, R., Moldes, A.B., Barral, M.H., 'Evolution of organic matter during the Mesophilic composting of lignocellulosic winery wastes', Environ. Manage. 116, 18-26, 2013.
- [29]. Rich, N., Bharti, A., 'Assessment of different types of in-vessel composters and its effect on stabilization of MSW compost', Int. Res. J. Eng. Technol. 2 (3), 1-6, 2015.
- [30]. Miyatake, F., Iwabuchi, K., 'Effect of high compost temperature on enzymatic activity and species diversity of culturable bacteria in cattle manure compost', Bioresour. Technol. 97, 961-965, 2005.
- [31]. Vuorinen, A.H., Saharinen, M.H., 'Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting in a drum composting system', Agric. Ecosyst. Environ. 66, 19-29, 1997.
- [32]. Huang, G.F., Wong, J.W.C., Wu, Q.T., Nagar, B.B., 'Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust', Waste Manage. 24, 805-813, 2004.
- [33]. Imbeah, M., 'Composting piggery waste, a review', Bioresour. Technol. 63, 197-203, 1998.
- [34]. Sudharsan, V.V., Kalamdhad, A.S., 'Evolution of chemical and biological characterization during thermophilic composting of vegetable waste using rotary drum composter', Int. J. Env. Sci. Technol. 12, 2015-2024, 2015.
- [35]. Chen, L., De Haro, M.M., Moore, A., Falen, C., 'The Composting Process: Dairy Compost Production and Use in Idaho CIS 1179', University of Idaho, 2011.
- [36]. Petric, I., Helic, A., Avdic, E.A., 'Evolution of process parameters and determination of kinetics for co-composting of organic fraction of municipal solid waste with poultry manure', Bioresour. Technol. 117, 107-116, 2012.
- [37]. Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral, M., 'Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review', Bioresour. Technol. 100, 5444-5453, 2009.

- [38]. Luangwilai, T., Sidhu, H.S., Nelson, M.I., Chen, X., "Modelling the effects of moisture content in compost piles", In: CHEMECA, Australian Chemical Engineering Conference Australia, Engineers Australia, 2011.
- [39]. Mohammad, M., Alam, M., Kabbashi, N.A., Ahsan, A., "Effective composting of oil palm industrial waste by filamentous fungi, a review", *Resour. Conserv. Recycl.* 58, 69-78, 2012.
- [40]. Makan, A.H., Assobhei, O., Mountadar, M., "Effects of initial moisture content on in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid wastes in Morocco", *Iran. J. Environ. Health Sci. Eng.* 10 (1), 3, 2013.
- [41]. Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y., "Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost", *Bioresour. Technol.* 112, 171-178, 2012.
- [42]. Kulikowska, D., "Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting", *Waste Manage* 49, 196-203, 2016.
- [43]. Petric, I., Selimbasic, V., "Development and validation of mathematical model for aerobic composting process", *Chem. Eng. J.* 139 (2), 304-317, 2008.
- [44]. Ros, M., Klammer, S., Knapp, B., Alchberger, K., Insam, H., "Long term effects of Compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity.", *Soil Use Manage* 22, 209-218, 2006.
- [45]. Abdullah, N., Chin, N.L., "Simplex-centroid mixture formulation for optimised Composting of kitchen waste", *Bioresour. Technol.* 101, 8205-8210, 2010.
- [46]. Haug, R.T. "The practical handbook of compost engineering", Boca Raton, Florida. 717, 1993.
- [47]. Damien, A., "Guide du traitement des déchets, 3ème édition." Paris, France. 431, 2004.
- [48]. Pace, M.G., "The Composting Process", Utah State University Cooperative Extension, pp. 1-2, 1995.
- [49]. Iqbal, M.K., Nadeem, A., Sherazi, F., Khan, R.A., "Optimization of process parameters for kitchen waste composting by response surface methodology", *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12 (5), 1759-1768, 2015.
- [50]. Igoni, H.A., Ayotamuno, M.J., Eze, C.L., Ogaji, S.O.T., Probert, S.D., "Design of Anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste", *Appl. Energy* 85 (6), 430-438, 2008.

- [51]. Yang, F., Li, G., Shi, H., Wang, Y., "Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting", *Waste Manage* 36, 70-76, 2015.
- [52]. Petric, I., Avdihodzic, E., Ibric, N., "Numerical simulation of composting process for mixture of organic fraction of municipal solid waste and poultry manure", *Ecol. Eng.* 75, 242-249, 2015.
- [53]. Zhang, L., Sun, X., "Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc", *Bioresour. Technol.* 218, 335-343, 2016.
- [54]. Zhang, L., Sun, X., "Influence of bulking agents on physical, chemical, and Microbiological properties during the two-stage composting of green waste", *Waste Manage* 48, 115-126, 2016.
- [55]. Mohee, R., Boojhawon, A., Sewhoo, B., Rungasamy, S., Somaroo, G.D., Mudhoo, A., "Assessing the potential of coal ash and bagasse ash as inorganic amendments during composting of municipal solid wastes", *J. Environ. Manage* 159, 209-217, 2015.
- [56]. Wang, K., He, C., You, S., Liu, W., Wang, W., Zhang, R., Qi, H., Ren, N., "Transformation of organic matters in animal wastes during composting", *J. Hazard. Mater* 300, 745-753, 2015.
- [57]. Tinôco, A. A. P., Azevedo, I. C. D., Azevedo, R., Marques, E. A. G., "Separation and composting plant in small cities of Zona Da Mata Minas Gerais, Brazil. Sardinia 2009 Symposium", XII International WM and Landfill Symposium, 2009.  
Page109.[www.sardiniasymposium.it/sardinia2009/](http://www.sardiniasymposium.it/sardinia2009/).
- [58]. Commission européenne DG ENV, "Brochure sur le compostage. Expériences réussies de compostage et de collectes sélectives", 2002.
- [59]. Drescher, S., Müller, C., Kubrom, T., Mehari, S., Zurbrügg, C., Kyzia, S., "Decentralised composting – Assessment of viability through combined material flow analysis and cost accounting", *Proceedings, Orbit 2006 Conference, Weimar*, pp. 1215–1227, 2006.
- [60]. Kubrom, T., Mehari, S., Wegmann, M., "Economic valuation of Decentralized composting – Case study report of Asmara, Eritrea", University of Asmara, College of Asmara, 80 p, 2004.
- [61]. Grossmann, J., "Mesures d'urgences pour une remise à niveau de la station de Compostage de Blida", *Rapport de la coopération technique algero-allemand entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et la Deutsche*

- Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH – Programme Gestion de l'Environnement. Mars 2003. 56 p.
- [62]. Rytz, A., "Assessment of a decentralized composting scheme in Dhaka, Bangladesh", Technical, operational, organizational and financial aspects. SANDEC. p.19, 2001.
- [63]. Milliet, J., "Le lombricomposteur d'appartement, les déchets et la terre urbaine. Le cas de la Suisse romande", *Revue d'ethnoécologie*, (8), (2015).
- [64]. Compost ooreka, "https://compost.ooreka.fr/comprendre/bac-a-compost", consulté le (12/07/2021)
- [65]. Manu, M. K., Kumar, R., Garg, A., "Effect of Microbial Inoculum and Leachate Circulation on the Performance of Rotary Drum Composter Used for Household Wet Biodegradable Waste", *Waste and Biomass Valorization*, 1-19, 2021.
- [66]. Fernández, F. J., Sánchez-Arias, V., Rodríguez, L., & Villaseñor, J., "Feasibility of composting combinations of sewage sludge, olive mill waste and winery waste in a rotary drum reactor", *Waste Management*, 30(10), 1948-1956, 2010.
- [67]. Kalamdhad, A. S., Pasha, M., Kazmi, A. A., "Stability evaluation of compost by respiration techniques in a rotary drum composter", *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 829-834, 2008.
- [68]. Kalamdhad, A. S., Kazmi, A. A., "Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter", *Chemosphere*, 74(10), 1327-1334, 2009.
- [69]. Adhikari, B. K., Trémier, A., Martinez, J., Barrington, S., "Home composting of organic waste—part 1: effect of home composter design", *International Journal of Environmental Technology and Management*, 15(3-6), 417-437, 2012.
- [70]. Lecointre, G., Bonnet, M. L., "Comprendre et enseigner la classification du vivant", Paris : Belin, p. 311.
- [71]. Conseil pour le développement pour l'agriculture de Québec, "Guide d'utilisation du composte rotatif de compost système".
- [72]. Global composting "https://www.globalcomposting.solutions", consulté le 07/07/21
- [73]. Proix, R., Rosso, M., "Les dispositifs de compostage électromécanique de Petite capacité", 2008.
- [74]. Joraform, "https", consulté le 19/06/2021
- [75]. Big Hanna, "http://www.bighanna.com/references", consulté le 19/06/2021
- [76]. KOLLVIK Advanced composting solutions", <http://www.kollvik.com/produits/> ", consulté le 19/06/2021.

- [77]. Juvenall, R. C., and K. M. Marshek, 'Fundamentals of Machine Component Design'', 5th ed. NJ. Wiley, 2011.
- [78]. Drouin. G., Gou. M, Thiry. P, Vinet. R, ''machine elements''Montréal: Polytechnic School of Montreal, 1986.
- [79]. M. Elalami, Y. Baskoun, F. Z. Beraich, M. Arouch, M. Taouzari, and S.D Qanadli. Design and Test of the Smart Composter Controlled by Sensors, 2019 7thInternational Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC),Agadir,morocco,pp.1-6.<https://doi.org/10.1109/IRSEC48032.2019.9078197>
- [80]. M. Elalami, F. Z. Siti, M. M. Lahmadi, Y. Baskoun, M. Arouch, and F. Z. Beraich, A Simplified Model to Calculate the Power Absorbed for the Movement of Organic Waste in a Rotary Composter: Industrial Case Study, International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, vol. 9, no. 5, pp. 6927 – 6930, 2020. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/141872020>.
- [81]. Fraczek. J, Złobecki.A, and Zemanek.J, ''Assessment of angle of repose of granular plant material using computer image analysis'', Journal of Food Engineering, vol. 83, no. 1, pp. 17–22, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.11.028>.
- [82]. Mirzabe, A. H, Khazaei.J, J and Chegini.G. R, ''Physical properties and modeling for sunflower seeds'', Agric.Eng. Int. CIGR J, vol. 14, no. 3, pp. 190–202, 2012.
- [83]. M. Elalami, M. M. Lahmadi, F. Z. Siti, Y. Baskoun, M. Arouch, and F. Z. Beraich, Innovative design and realization of a smart rotary composter with a remote management system, International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, vol. 8, no. 7, pp.3777–3783, 2020.<https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/141872020>.

## Annexes

### Annexe A

La figure A.1 représente la fiche technique de motoréducteur CB3233 de puissance 0.37KW

La vitesse de sortie de réducteur est de 11.8 tr/min et le rapport de transmission  $r=123$ .

Tableau de sélection

		Exemple de commande: <sup>10</sup>																		
		Référence	Fixaion	Rapport de réduction	Type de montage	Nombre de pôles	Puissance (kW) / Hauteur d'axe					Puissance								
		CB3233	SB3	86,5	MI	4P	0,25	0,37	0,55	0,75	0,9	1,1	1,5	1,8	2,2	3	4	5,5	0,37kW	
Vitesse de sortie (tr/min)	Rapport de réduction	Puissance (kW) / Hauteur d'axe													Choix de montage					
		0,25	0,37	0,55	0,75	0,9	1,1	1,5	1,8	2,2	3	4	5,5							
		Facteur de service													Socle	Bride				
7,12	204	1,48	0,97																	
8,31	174	1,72	1,14																	
9,11	159	1,89	1,25	0,82																
10,1	144	2,09	1,38	0,9																
11,8	123	2,45	1,62	1,06	0,8															
13,3	109	2,75	1,82	1,19	0,89															
14,8	98,2	3,06	2,02	1,32	1	0,82														
16,8	86,5	3,48	2,3	1,5	1,13	0,93														
18,6	77,9	3,86	2,55	1,67	1,26	1,03	0,85								Nous consulter					
21,1	68,6	4,38	2,9	1,89	1,43	1,17	0,97													
22,6	64,2	4,68	3,09	2,02	1,52	1,25	1,03													
26	55,7	5,4	3,57	2,33	1,76	1,44	1,19	0,87												
28,9	50,2	5,93	3,92	2,56	1,93	1,58	1,31													
29,7	48,9	Nous consulter		2,66	2	1,64	1,36	0,99	0,82											
33,7	43	6,91	4,56	2,99	2,25	1,84	1,52	1,11	0,92											
37	39,2	7,56	5	3,27	2,46	2,01	1,67	1,22	1,01	0,82										
40,8	35,5	8,33	5,5	3,6	2,71	2,22	1,84	1,34	1,11	0,91										
47,9	30,3	9,73	6,43	4,21	3,16	2,59	2,14	1,57	1,3	1,06										

Figure A. 1 : Fiche technique de motoréducteur CB3233 de 0.37 KW

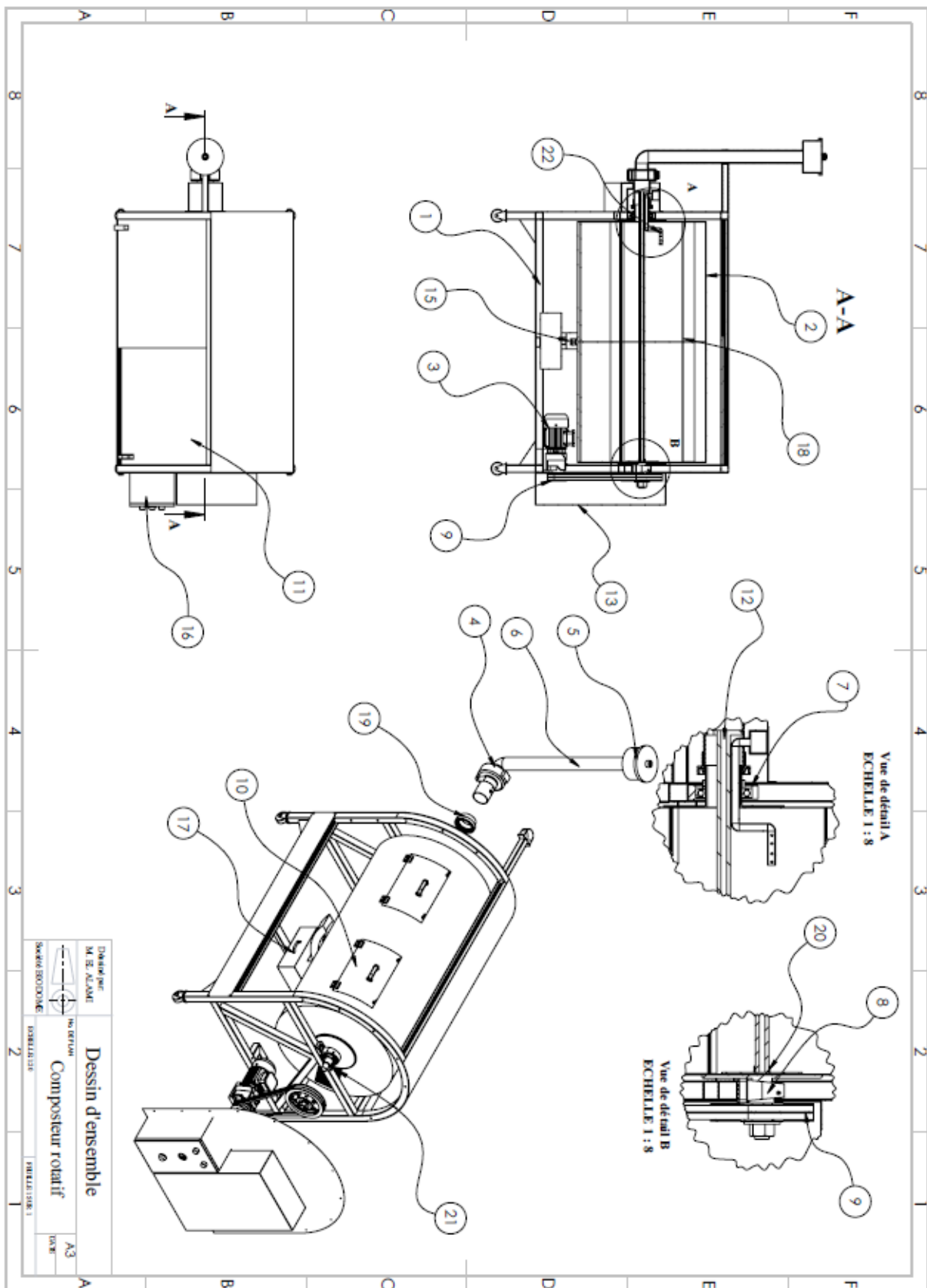
#### Référence :

[A.1]. Michaud chailly, " https://www.michaud-chailly.fr/custom/docs/produit/mot\_d/gamme-motorisation-2016-mot-lgam1.pdf".



**Annexe B : Dessin de composteur rotatif contribution 1 :**

✓ Dessin d'ensemble



✓ Figure B. 1: Dessin d'ensemble de composteur rotatif

- ✓ La nomenclature des pièces de composteur rotatif

**Tableau B. 1: Nomenclature des pièces**

23	1	Porte coulissante
22	1	Pupitre de commande
21	1	Tube d'injection de l'eau
20	1	Trous d'aération
19	1	Coussinet
18	1	Joint tournant
17	1	Chicane de mélange
16	1	Réservoir de lixiviat
15	1	Orifice de récupération de lixiviat
14		Pompe d'injection de l'eau
13	1	Couvercle de système d'entraînement
12	1	Tube rond perforé
11	1	Porte à charnière
10	1	Poulie Courroie motrice
9	1	Poulie Courroie réceptrice
8	1	Palier UCP
7	1	Palier gauche à roulement
6		Cheminée
5	1	Bio filtre à charbon
4	1	Ventilateur d'aspiration
3	1	Motoréducteur CB3233
2	1	Tambour
1	1	Support
<b>Repère</b>	<b>Nombre</b>	<b>Désignation</b>

✓ Dessin de définition de support de composteur

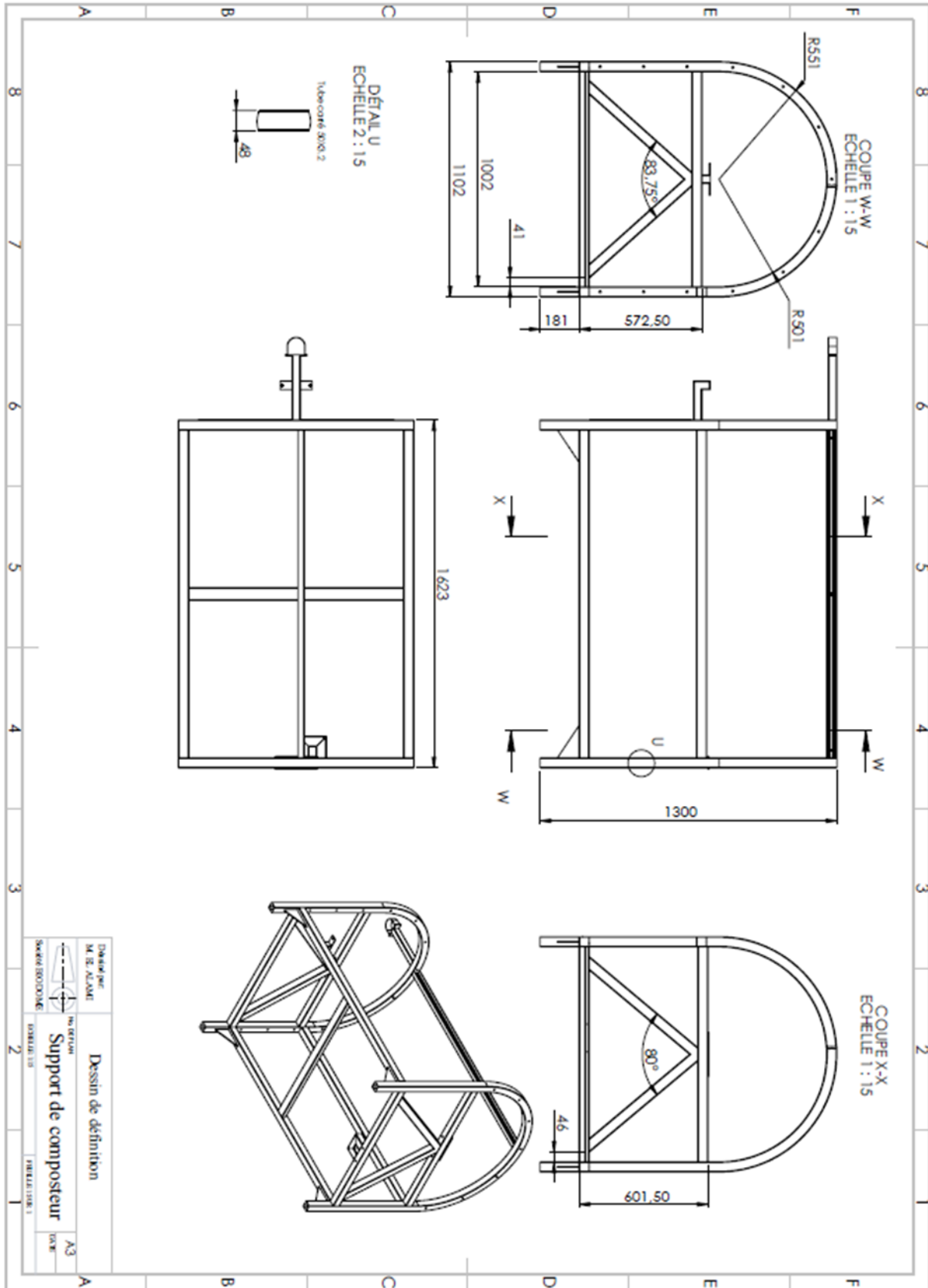


Figure B. 2: Dessin de définition de support

✓ Dessin de sous-ensemble tambour plus les deux axes et deux portes

Annexe C

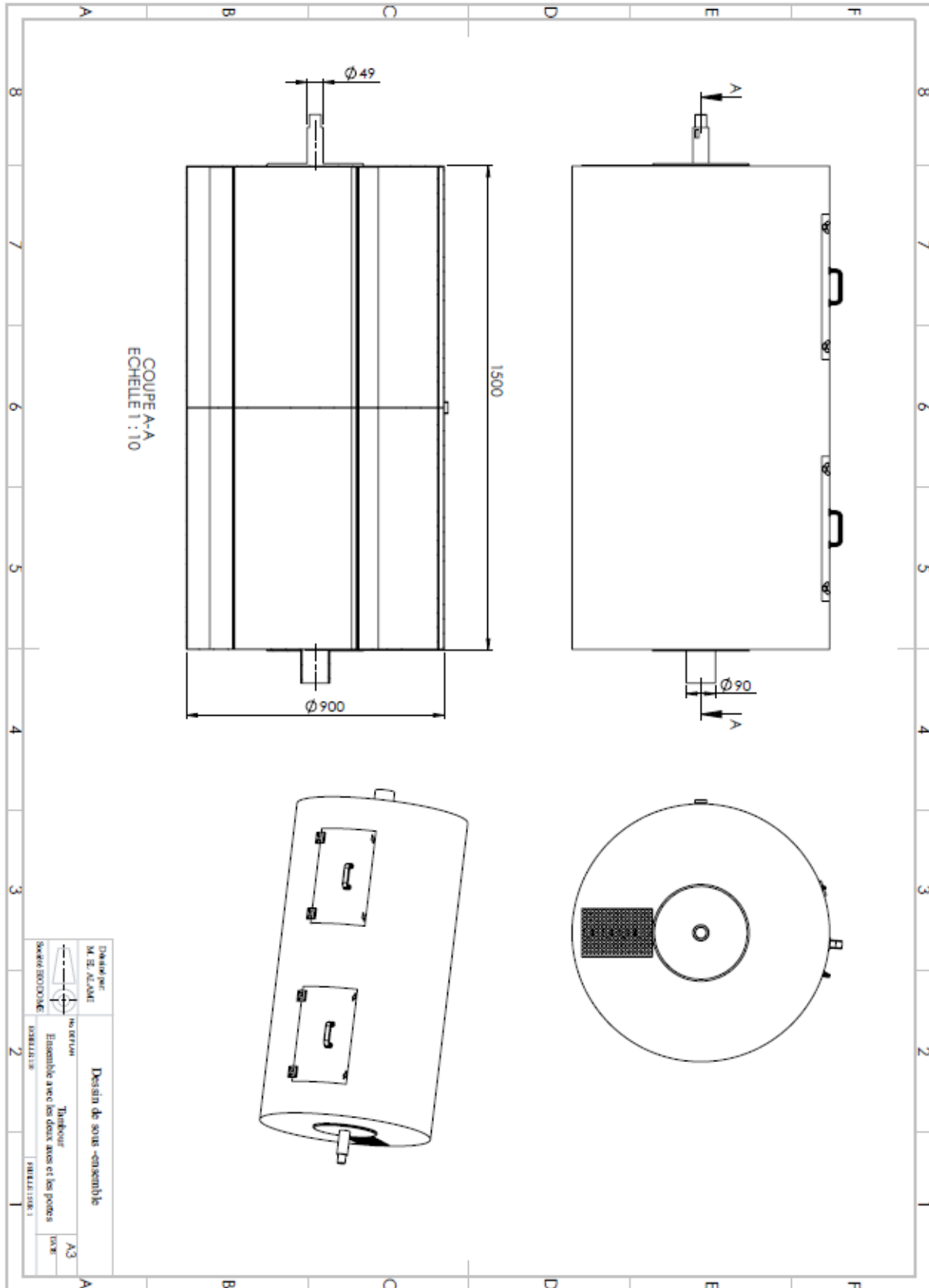


Figure B.3: Dessin de sous-ensemble tambour

La figure A.1 représente la fiche technique de motoréducteur CB3233 de puissance 0.37KW  
La vitesse de sortie de réducteur est de 11.8 tr/min et le rapport de transmission  $r=123$ .

Tableau de sélection

		Exemple de commande: <sup>(1)</sup> <b>CB3233 SB3 86,5 MI 4P 0,37kW</b>																
Vitesse de sortie (tr/min)	Rapport de réduction	Puissance (kW) / Hauteur d'axe											Choix de montage					
		0,25	0,37	0,55	0,75	0,9	1,1	1,5	1,8	2,2	3	4			5,5			
		71	71	71	80	80	90	90	90	100	100	112	132	Facteur de service				
													Socle	Bride				
7,12	204	1,48	0,97												SB3	BT*		
8,31	174	1,72	1,14															
9,11	159	1,89	1,25	0,82														
10,1	144	2,09	1,38	0,9														
11,8	123	2,45	1,62	1,06	0,8													
13,3	109	2,75	1,82	1,19	0,89													
14,8	98,2	3,06	2,02	1,32	1	0,82												
16,8	86,5	3,48	2,3	1,5	1,13	0,93												
18,6	77,9	3,86	2,55	1,67	1,26	1,03	0,85	Nous consulter										
21,1	68,6	4,38	2,9	1,89	1,43	1,17	0,97											
22,6	64,2	4,68	3,09	2,02	1,52	1,25	1,03											
26	55,7	5,4	3,57	2,33	1,76	1,44	1,19	0,87										
28,9	50,2	5,93	3,92	2,56	1,93	1,58	1,31											
29,7	48,9	Nous consulter		2,66	2	1,64	1,36	0,99	0,82									
33,7	43	6,91	4,56	2,99	2,25	1,84	1,52	1,11	0,92									
37	39,2	7,56	5	3,27	2,46	2,01	1,67	1,22	1,01	0,82								
40,8	35,5	8,33	5,5	3,6	2,71	2,22	1,84	1,34	1,11	0,91								
47,9	30,3	9,73	6,43	4,21	3,16	2,59	2,14	1,57	1,3	1,06								

Figure C. 1 : Fiche technique de motoréducteur CB3233 de 0.55 KW

## Référence :

[C.1]. Michaud chailly, " [https://www.michaud-chailly.fr/custom/docs/produit/mot\\_d/gamme-motorisation-2016-mot-lgam1.pdf](https://www.michaud-chailly.fr/custom/docs/produit/mot_d/gamme-motorisation-2016-mot-lgam1.pdf) ".

Annexe D : Dessin de composteur rotatif contribution 2 :

✓ Dessin d'ensemble

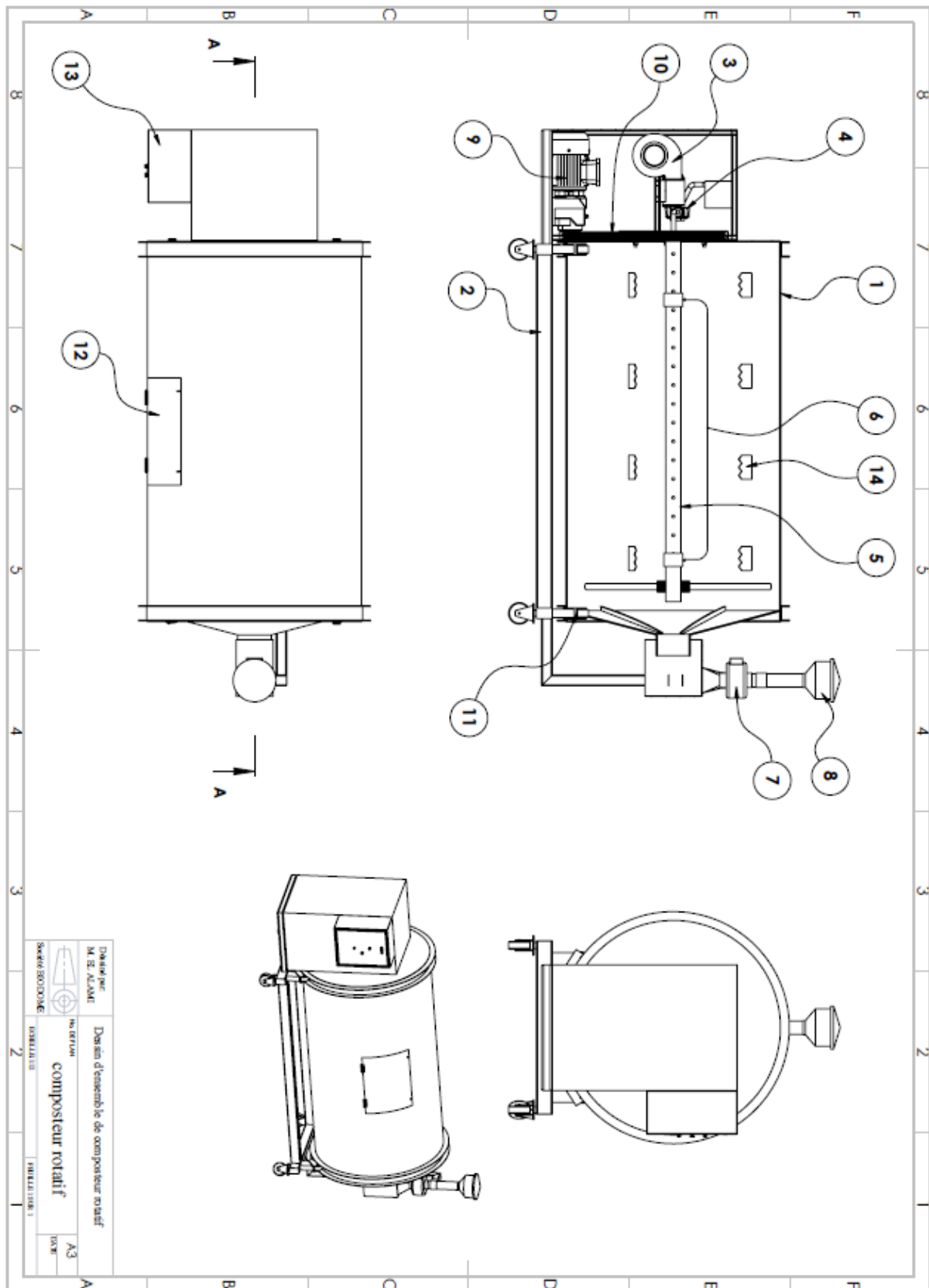


Figure D. 1: Dessin d'ensemble composteur rotatif contribution 2

- ✓ La nomenclature des pièces de composteur rotatif

Le tableau D.1 représente les composants de composteur rotatif contribution 2

**Tableau D. 1: Nomenclature des pièces**

14	24	Chicane de mélange
13	1	Pupitre de commande
12	1	Porte de chargement
11	4	Galet
10	1	Système poulie courroie à deux gorges
9	1	Motoréducteur CB3233
8	1	Bio filtre à charbon
7	1	Ventilateur d'aspiration
6		Emplacement des capteurs
5	1	Tube rond perforé
4	1	Pompe d'injection de l'eau
3	1	Ventilateur soufflant
2	1	Support
1	1	Tambour
<b>Repère</b>	<b>Nombre</b>	<b>Désignation</b>

✓ Dessin de définition de tambour

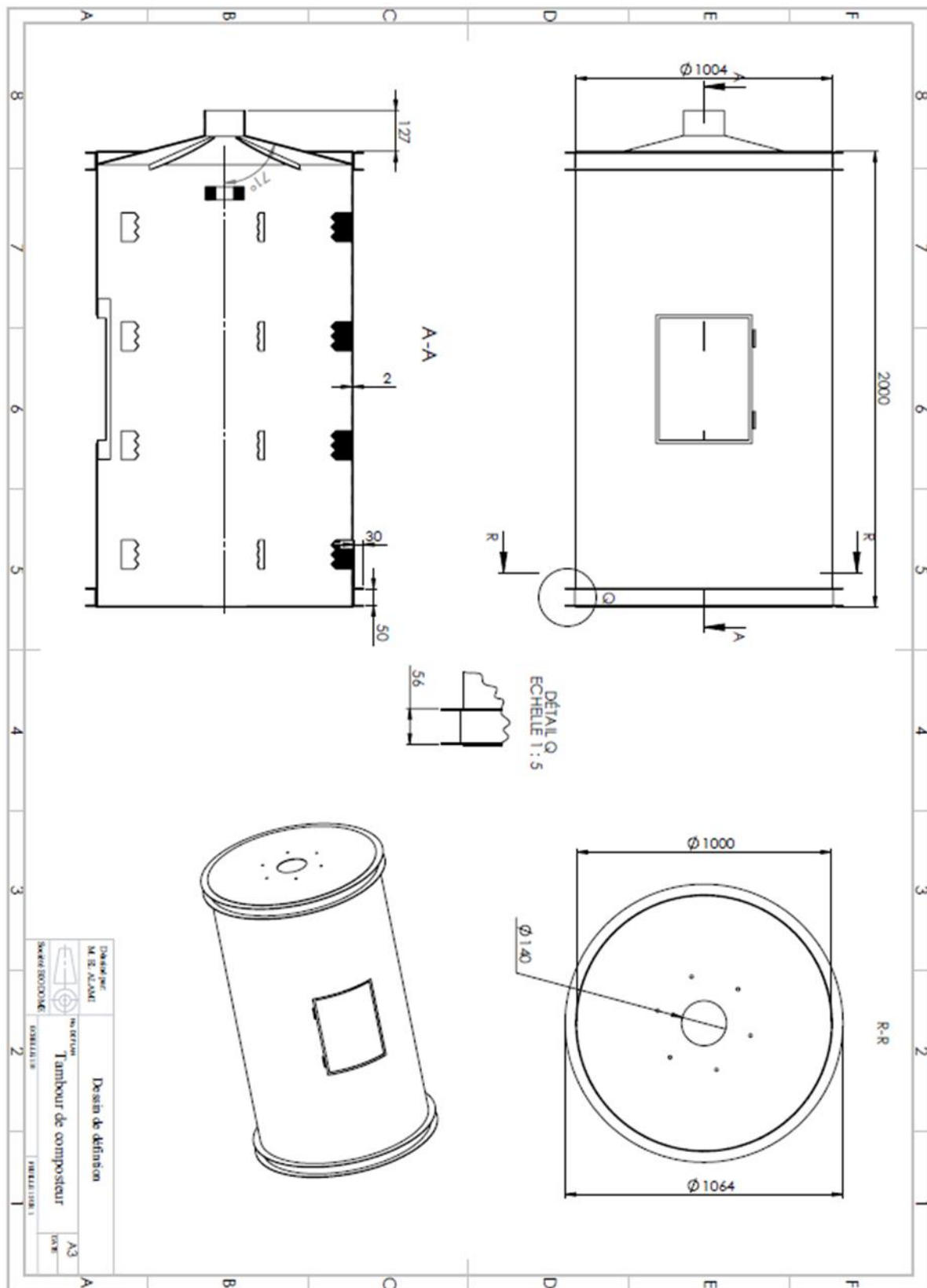


Figure D. 2 : Dessin de définition de tambour



✓ Dessin de définition de support de composteur

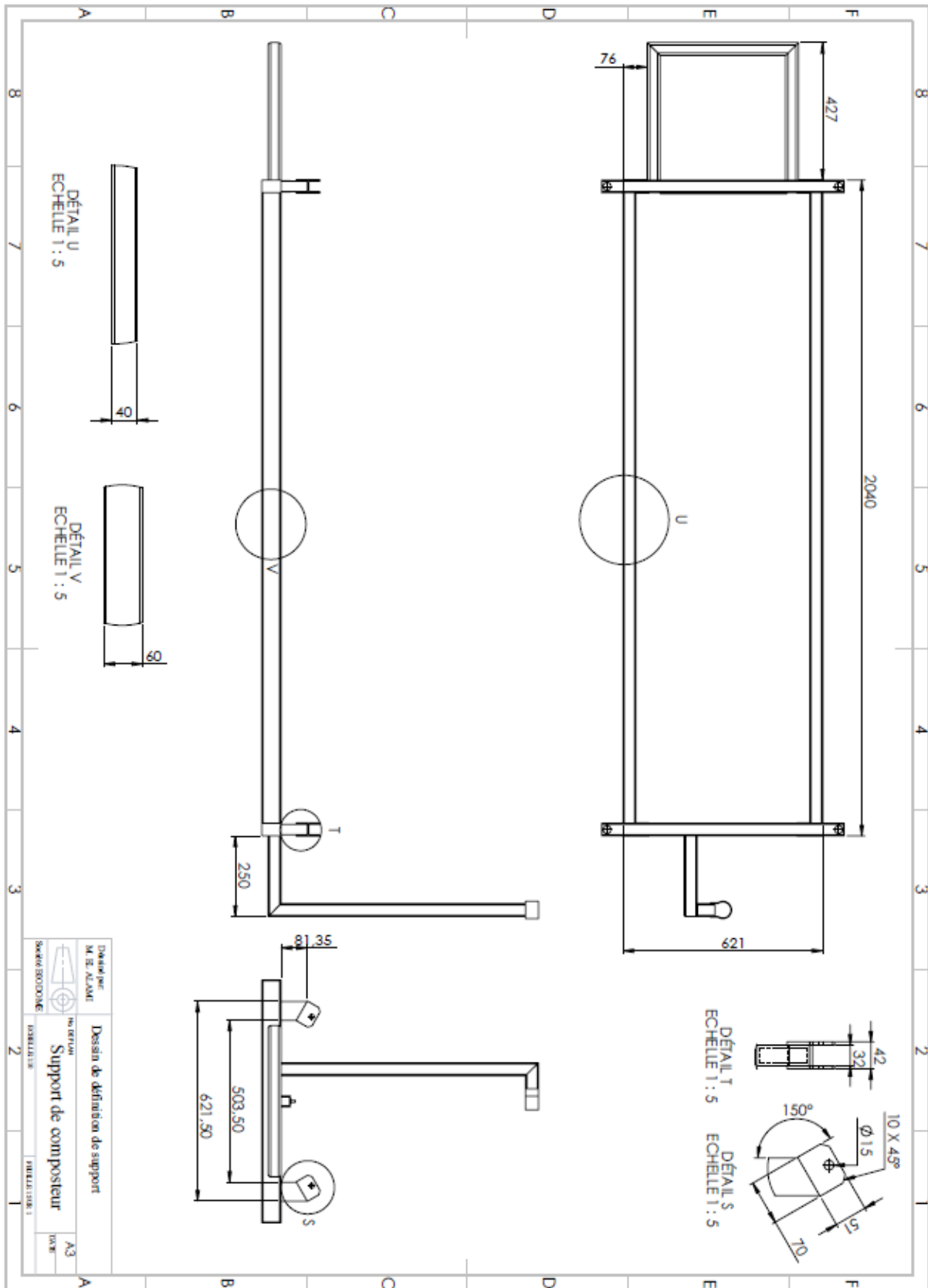


Figure D. 2: Dessin de définition de support de composteur rotatif contribution 2

## **Publications scientifiques**

### **1. Publications dans des revues internationales**

#### **1.1. Travaux de recherche personnelle**

1. M. El alami, M. M. Lahmadi, F. Z. Siti, Y. Baskoun, M. Arouch, and F. Z. Beraich, Innovative design and realization of a smart rotary composter with a remote management system, International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, vol. 8, no. 7, pp.3777–3783, 2020.<https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/141872020>.
2. M. El alami, F. Z. Siti, M. M. Lahmadi, Y. Baskoun, M. Arouch, and F. Z. Beraich, A Simplified Model to Calculate the Power Absorbed for the Movement of Organic Waste in a Rotary Composter: Industrial Case Study, International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, vol. 9, no. 5, pp. 6927 – 6930, 2020. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/141872020>.
3. F.Z. Beraich, M. El alami, AROUCH MOHA, S.D. Qanadli, DISPOSITIF AUTOMATIQUE A TAMBOUR ROTATIF POUR LE COMPOSTAGEDES PRODUITS ORGANIQUES, Patent MA 46311 A1, Date de publication : 29.01.2021(Brevet)
4. M. El alami, Y. Baskoun, F. Z. Beraich, M. Arouch, M. Taouzari, and S.D Qanadli. Design and Test of the Smart Composter Controlled by Sensors, 2019 7thInternational Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC),Agadir,morocco,pp.1-6.<https://doi.org/10.1109/IRSEC48032.2019.9078197>

#### **1.2. Travaux de recherche en collaboration**

5. Y. Baskoun, M. El alami, S. D. Qanadli, M. Arouch and M. Taouzari. An Innovative Adapter to use Smartphone flashlight as a light source for endoscopy in emergency and LMICs, International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, Vol.8, No.3, March 2020.
6. Y. Baskoun, S. D. Qanadli, M. Arouch, M. Taouzari, M. El alami, and A. Hraiba, Development of a new diagnostic tool in the field of endoscopy and telemedicine applications, vol. 914. Springer International Publishing, 2019.
7. FATIMA ZAHRA SITI, MUSTAFA ELALAMI, MOHA AROUCH, Design and Production of an Autonomous Rotary Composter Powered by Photovoltaic Energy, International Journal of Engineering Trends and Technology, Volume 68 Issue 10, 1-4, October 2021.

### **2. Communications Internationales avec actes et comité de lecture**

8. M. Elalami, Y. Baskoun, F. Z. Beraich, M. Arouch, M. Taouzari, and S.D Qanadli. Design and Test of the Smart Composter Controlled by Sensors, 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 27-30 November 2019.

9. Y. Baskoun, S. D. Qanadli, M. Arouch, M. Taouzari, M. Elalami, and A. Hraiba, Development of a new diagnostic tool in the field of endoscopy and telemedicine applications, International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (11-14 July A12SD'2018).
10. M.Elalami, M. Arouch, ''adaptateur ajustable avec les smartphones et les cameras numeriques pour endoscope et biomedicale''5ème édition de la « Journée Doctorant », CeDoc Sciences et Techniques fst settat mars2017.