

---

## LISTE DES ABREVIATIONS

ABREVIATION	DESIGNATION
CPS	Résolution des problèmes par la créativité
RDM	Résistance des matériaux
CAD	Conception assistée par ordinateur
SNEP	Société nationale d'électrolyse et de pétrochimie
PVC	Polychlorure de vinyle
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AFNOR	Association française de normalisation
OTUA	Office technique pour l'utilisation de l'acier

## TABLE DES MATIERES

RESUME.....	1
REMERCIEMENT .....	2
INTRODUCTION.....	7
Chapitre 1. PRESENTATION DU GROUPE NEXANS .....	9
1.1 Historique .....	9
1.2 Implantation .....	9
1.3 Nexans au cœur de la technologie .....	10
1.4 Sites industriels de Mohammedia .....	12
1.5 Fiche technique .....	13
Chapitre 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE PVC.....	15
2.1 Introduction .....	15
2.2 La démarche CPS .....	15
2.3 Processus de fabrication du PVC .....	17
2.3.1 Historique .....	17
2.3.2 Description du processus.....	17
2.4 Le système de refroidissement .....	19
2.4.1 Introduction .....	19
2.4.2 Description .....	20
2.4.3 Conclusion .....	24
Chapitre 3. ANALYSE DE LA SITUATION ACTUELLE .....	26
3.1 Introduction .....	26
3.2 Définition du cahier de charge .....	26
3.3 Conclusion.....	27
Chapitre 4. ETUDE ET POPODITION DE SOLUTION .....	29
4.1 Introduction .....	29
4.2 Etude thermique .....	29
4.3 Etude du lit fluidisé .....	32
4.4 Solutions proposées.....	36
4.5 Convergence vers la solution optimale .....	39
4.6 Conclusion.....	39
Chapitre 5. VIBRATIONS .....	43
5.1 Introduction .....	43
5.2 Etude RDM .....	47
5.2.1. Introduction .....	47
5.2.2. Calcul .....	49
5.2.3. Conclusion.....	53
5.3 Choix du type de transmission .....	54
CONCLUSION .....	54
BIBLIOGRAPHIE .....	67
ANNEXE .....	68

# INTRODUCTION

L'énergie électrique, pour être transportée nécessite des câbles métalliques, produits essentiellement fabriqués par l'unité de Nexans de Mohammedia ; ceux-ci permettent une bonne conduction des électrons, phénomène que nous appelons courant électrique. Lorsque ce transport se fait pour des réseaux à haute tension, le câble reste non couvert pour transport aérien et il nécessite un revêtement dans le cas du transport souterrain.

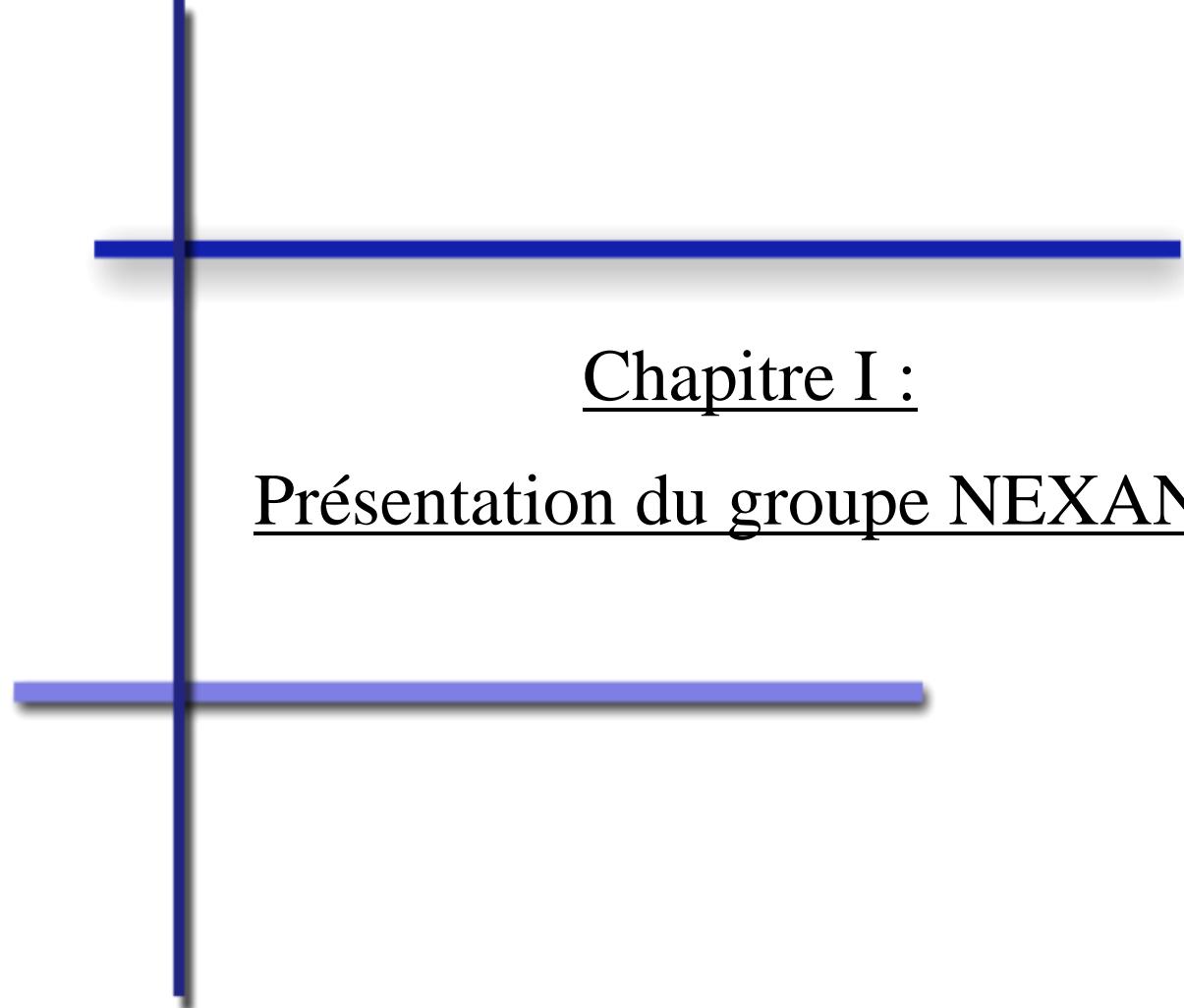
Nous pouvons aussi remarquer que plus le câble est dans un environnement fréquenté par l'homme, il devient indispensable de le revêtir d'un isolement pour la sécurité de celui-ci. Ainsi tous les câbles domestiques sont toujours isolés et de même pour les câbles automobiles ou aéronautiques, à fin d'éviter d'éventuels accidents (court-circuit dans les installations, électrocution).

Pour procéder à l'isolation du câble, techniquelement appelé gainage, cela nécessite un bon matériau pour garantir une isolation à long terme. Le PVC, de son nom scientifique polychlorure de vinyle, est la matière à adéquate et il est disponible chez des fabricants spécialisés tel que la société SNEP, qui figure parmi les fournisseurs de Nexans Mohammedia.

En 1994, suite à une production importante des câbles, la centrale PVC vit le jour à fin d'amortir le coût de fabrication ; mais la demande interne en PVC ne cessant de croître, en 2008 la société a décidé d'augmenter la quantité produite en s'équipant d'une nouvelle extrudeuse de pouvant doubler le débit de matière produite par jour.

Ce changement d'outil a généré un déséquilibre dans l'installation au sein de la centrale PVC et pouvant conduire à l'arrêt de celle-ci. Dans le pire des cas, cette situation implique un retour à l'état initial (c'est-à-dire l'achat du PVC chez des fournisseurs externes), or vu la taille actuelle de la production en câble, il devient impératif de trouver une solution à ce problème.

Le chapitre suivant nous donne les détails sur la société Nexans, ses activités et différents produits fabriqués.



Chapitre I :

Présentation du groupe NEXANS

## Chapitre 1. PRESENTATION DU GROUPE NEXANS

### 1.1. HISTORIQUE

Fondé il y a plus de soixante ans, Nexans Maroc perpétue la diversité des métiers initiés par CGE Maroc sur le marché de l'électricité. Cette force développée sur le marché marocain lui permet de mettre en avant son savoir-faire autour des métiers du câble et de consolider sa position de leader dans les secteurs de l'infrastructure, de l'industrie et du bâtiment.

Présents dans la vie quotidienne de millions d'individus, ses produits recouvrent les secteurs les plus divers tels que le transport et la distribution d'énergie, le bâtiment, l'automobile ou encore l'aéronautique. Attentif aux besoins de ses clients, Nexans Maroc intègre les technologies les plus avancées dans le respect des normes de qualité et d'environnement ; Le confort, la sécurité des biens et des personnes sont au centre de ses préoccupations.

### 1.2. IMPLANTATION

Avec un effectif d'environ 850 salariés dont 100 cadres et ingénieurs, Nexans Maroc offre la gamme de produits la plus large et la plus complète en câbles, en transformateurs et en équipements électriques.

Sa production est repartie sur les deux sites industriels, celui de Casablanca qui regroupe les unités des équipements électriques, des postes préfabriqués, des transformateurs et des batteries ; et celui de Mohammedia entièrement dédié aux câbles.



**Figure 1.** Situation géographique

### 1.3. NEXANS AU CŒUR DE LA TECHNOLOGIE

Le leadership de Nexans Maroc découle de sa vision globale du marché, de sa maîtrise des réseaux de production et de sa capacité à fournir des produits et services adaptés à l'extrême variété des marchés des câbles.



#### AU CŒUR DU BATIMENT

Nexans Maroc fournit des câbles et solutions réseau destiné à différents types de constructions domestiques, industrielles et tertiaires. Au-delà des câbles pour l'éclairage, l'alimentation électrique et autre équipements, il propose des solutions intégrées en cuivre et fibre optique pour la sécurité du bâtiment marocain, il commercialise une gamme étendue de câbles différenciés, à très forte valeur ajoutée respectant les normes internationales.

Nexans Maroc fournit des câbles et systèmes de câblage cuivre/fibre pour les entreprises et organisations les plus consommatrices de bande passante : centres de données, services de sécurité et réseaux de stockage.

Les solutions sophistiquées de Nexans permettent de gérer les données, de protéger les systèmes, de transmettre à haut débit et de sauvegarder des informations viables.

#### AU CŒUR DES INFRASTRUCTURES

Nexans Maroc propose une gamme complète de Câble et solution de câblage pour la production, le transport et la distribution de l'énergie ainsi que les télécoms.

Employant les technologies nouvelles. Il œuvre pour le renforcement de la sécurité, l'efficacité et la fiabilité des infrastructures électriques, ferroviaires ou de télécommunication, à travers la fourniture des solutions adaptées aux différents besoins évolutifs de ces marchés. Nexans Maroc est non seulement un acteur majeur dans l'électrification rurale, mais aussi dans l'épanouissement des réseaux périurbains à travers l'offre de la solution la plus globale en câbles MT et BT, en transformateurs de distribution et de puissance en cellules électriques et en postes préfabriquées.





## AU CŒUR DE L'AUTOMOBILE

Depuis le démarrage de son activité des câbles automobiles en 2003, Nexans Maroc ne cesse de progresser pour accompagner un monde automobile en révolution permanente.

Il propose aux constructeurs automobiles une large gamme de câbles fiables et à haute performance apportant aux clients une réelle valeur ajoutée en terme de technologie de pointe.

Pour accompagner le besoin évolutif de ses clients, Nexans Maroc bénéficie de ressources R&D du groupe et affine sans cesse ses systèmes logistiques pour assurer des livraisons dans les délais impartis et dans les meilleures conditions.

L'offre automobile s'étend également aux batteries électriques ; dans ce marché de plus en plus concurrentiel, Nexans Maroc est un acteur majeur offrant une gamme de produits diversifiés, innovants et de qualité.

## AU CŒUR DE L'AERONAUTIQUE

Dans le cadre du transfert de technologie entre filiales du groupe, Nexans Maroc offre une gamme de câbles high-tech destinés au secteur aéronautique.

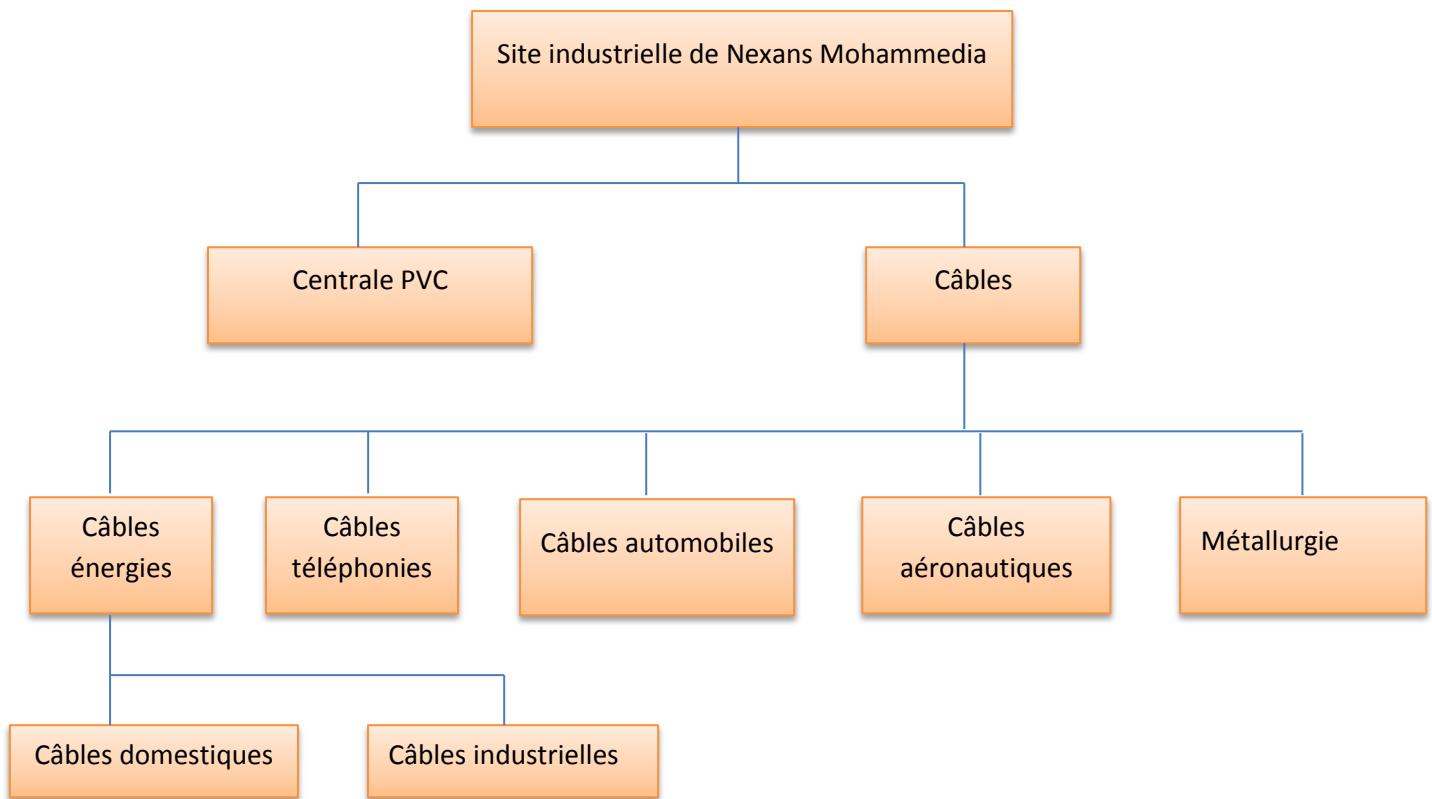
Grace à ses compétences confirmées et à sa compétitivité dans des produits à forte valeur ajouté, son site de Mohammedia a été désigné pour produire des câbles aéronautiques de haute technologie destinés à des fabricants internationaux de faisceaux implantés dans le monde entier.

Cette production affirme encore une fois, le leadership de Nexans Maroc dans les domaines les plus pointus qui requièrent une grande maîtrise des process industriels en matière de qualité, de sécurité, et de fiabilité.



#### 1.4. SITE INDUSTRIEL DE MOHAMMEDIA

Nexans Mohammedia comprend deux grands secteurs de base: la centrale PVC et les unités câbles qui sont illustrés selon le diagramme ci-dessous:



**Figure 2.**organigramme du site industriel

## 1.5. FICHE TECHNIQUE

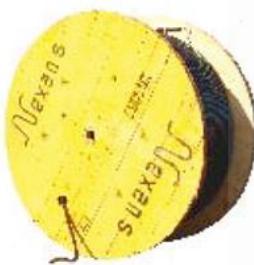
Site web : [www.nexans.ma](http://www.nexans.ma)

Tel : (00212) 5 23319000

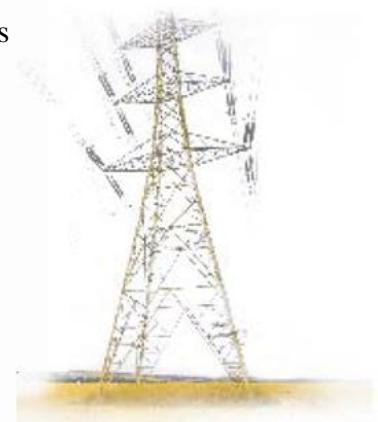
Fax : (00212) 5 23324995

Siège : Nexans Maroc rue Fatima Zohra 20650 Mohammedia

Nexans Mohammedia a su garder un métier diversifié destiné à un marché unique, celui de l'électricité. C'est ce qui a fait sa force sur le marché marocain en lui permettant d'opérer dans différents secteurs d'activités.

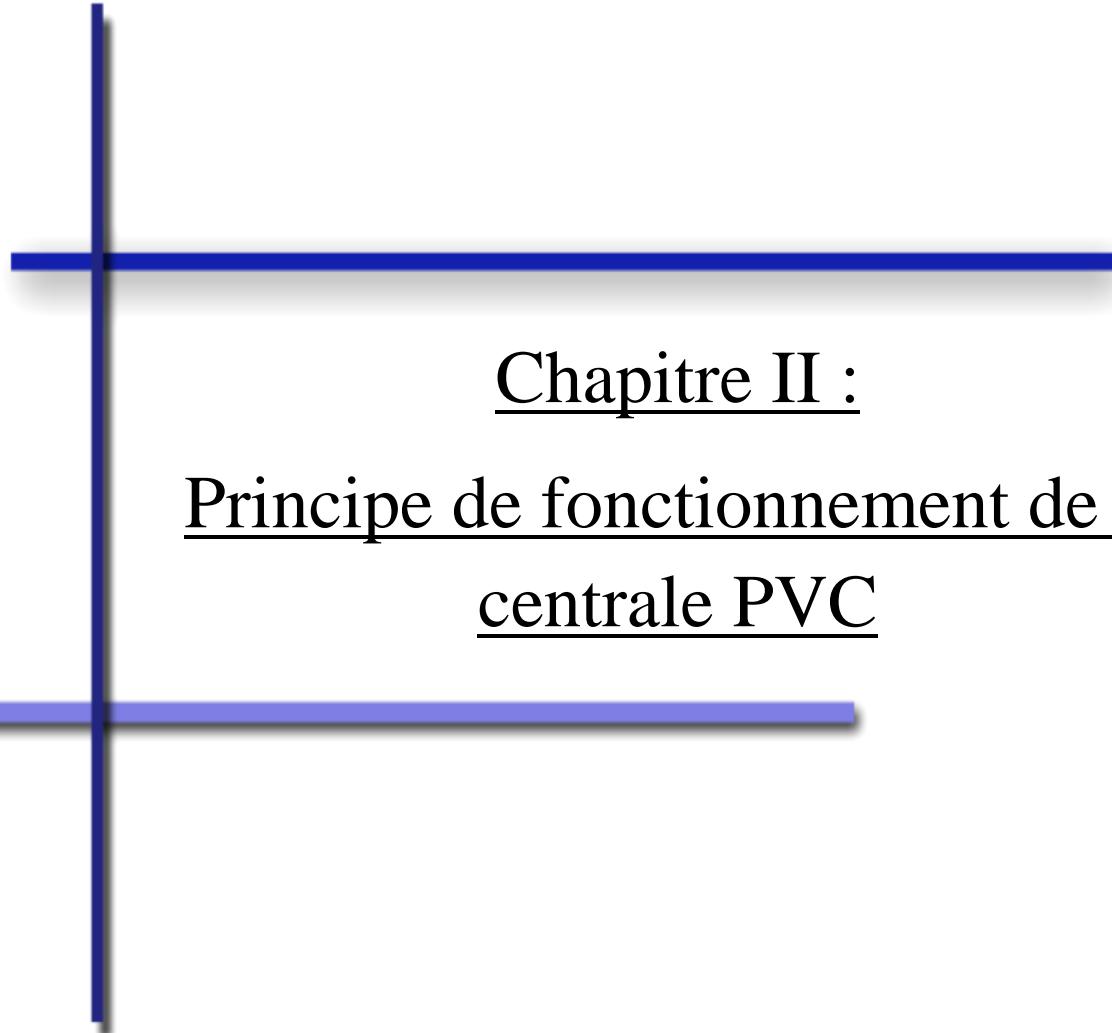


- Câbles en alliage d'aluminium Jusqu'à la section 570mm permettant de satisfaire les besoins du réseau de 60KV à 400KV.
- Câbles H07 et RV pour bâtiments et industrie, câbles aériens torsadés.
- Pré câblage informatique à travers les gammes LAN Mark et Essentials.
- câbles multi paires enterrés et aériens.
- câbles de branchement et installation intérieur (réseau public et privé)



**Figure 3.**câble assemblé et isolé par gainage





Chapitre II :

Principe de fonctionnement de la  
centrale PVC

## Chapitre 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CENTRALE PVC

### 2.1. INTRODUCTION

Comme nous l'avons déjà signalé à l'introduction, la centrale PVC a été ouverte pour approvisionner les unités de fabrication en matière d'isolation des câbles fabriqués. Ce fut une décision qui relève de la stratégie de la direction de la société et en ce qui concerne notre sujet, nous allons nous contenter comprendre son fonctionnement en vue de l'application de la démarche CPS que nous avons choisi comme méthode car elle constitue un schéma de réflexion, de résolution de problème et de gestion de changement le mieux adapté en conception.

### 2.2. LA DEMARCHE CSP

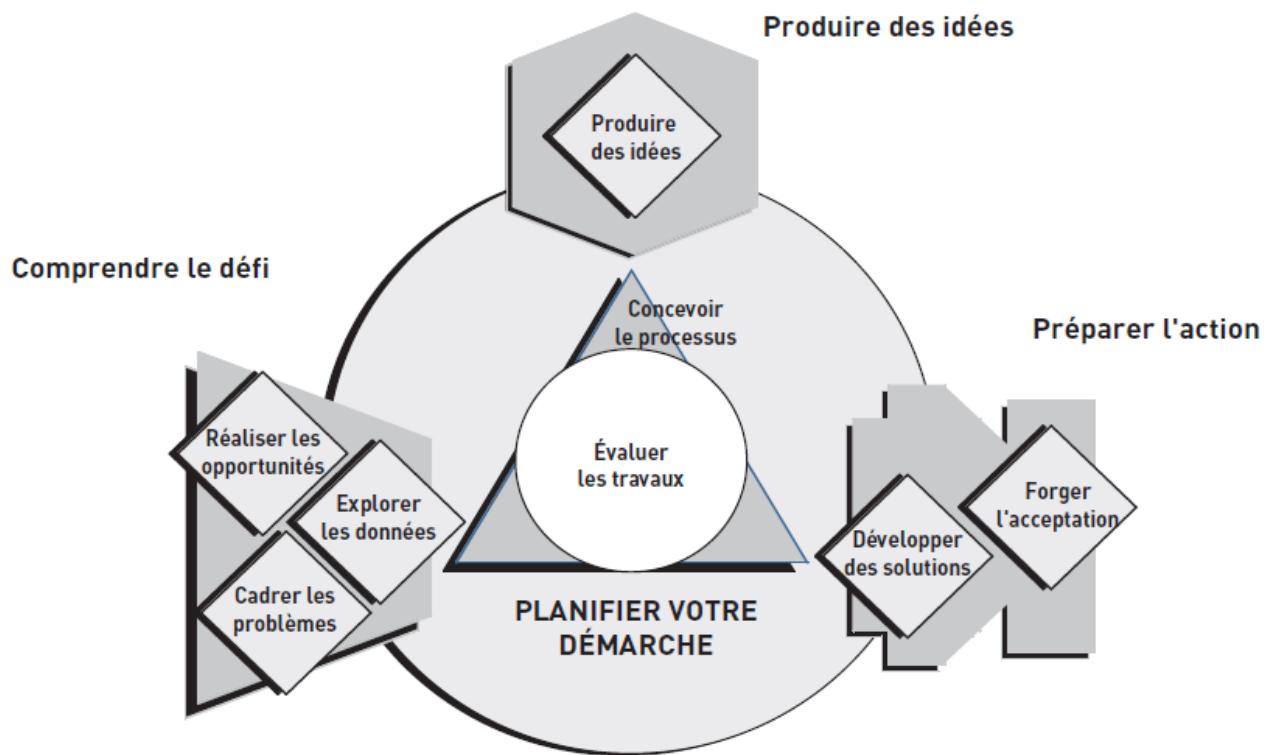
La CPS, abréviation de « Creative Problem Solving », est une démarche de résolution de problème par la créativité initié par Alex F. Osborn vers les années 1930. Il est bien connu pour avoir été à l'origine du *brainstorming*.

La CPS permet aux personnes et aux groupes de d'identifier des opportunités et d'agir sur elles à fin de répondre aux défis et de trouver réponse à leurs préoccupations ; c'est aussi un processus pour aborder un problème de façon imaginative se traduisant par une action efficace.

Les différentes étapes de la méthode sont :

- Comprendre le défi
- Planifier la démarche
- Produire des idées
- Développer les solutions
- Préparer l'action

L'image suivant résume tout ce qui pourrait être dit à propos de cette démarche :



**Figure 4.** Le schéma de la CPS

Ainsi avec cette méthode, nous allons aborder les composantes :

- *Comprendre le défi* : obtenir une compréhension claire des éléments sur lesquels nous allons concentrer nos efforts de résolution de problème.
- *Explorer les données* : nous allons examiner la situation pour réunir informations, impressions, perceptions et sentiments en adoptant une série de point de vue ; cela nous permettra de déterminer les données essentielles pour une meilleure compréhension du problème.
- *Produire les idées* : ici les outils d'ingénierie nous seront d'une nécessité pour s'assurer qu'on est dans la bonne direction.
- *Préparer l'action* : ici on traduit les idées intéressantes en action utile, acceptable et applicable. Cela se fera avec les points de vue et regards des responsables de la société pour valider les solutions.

## 2.3. PROCESSUS DE FABRICATION DU PVC

### 2.3.1. HISTORIQUE

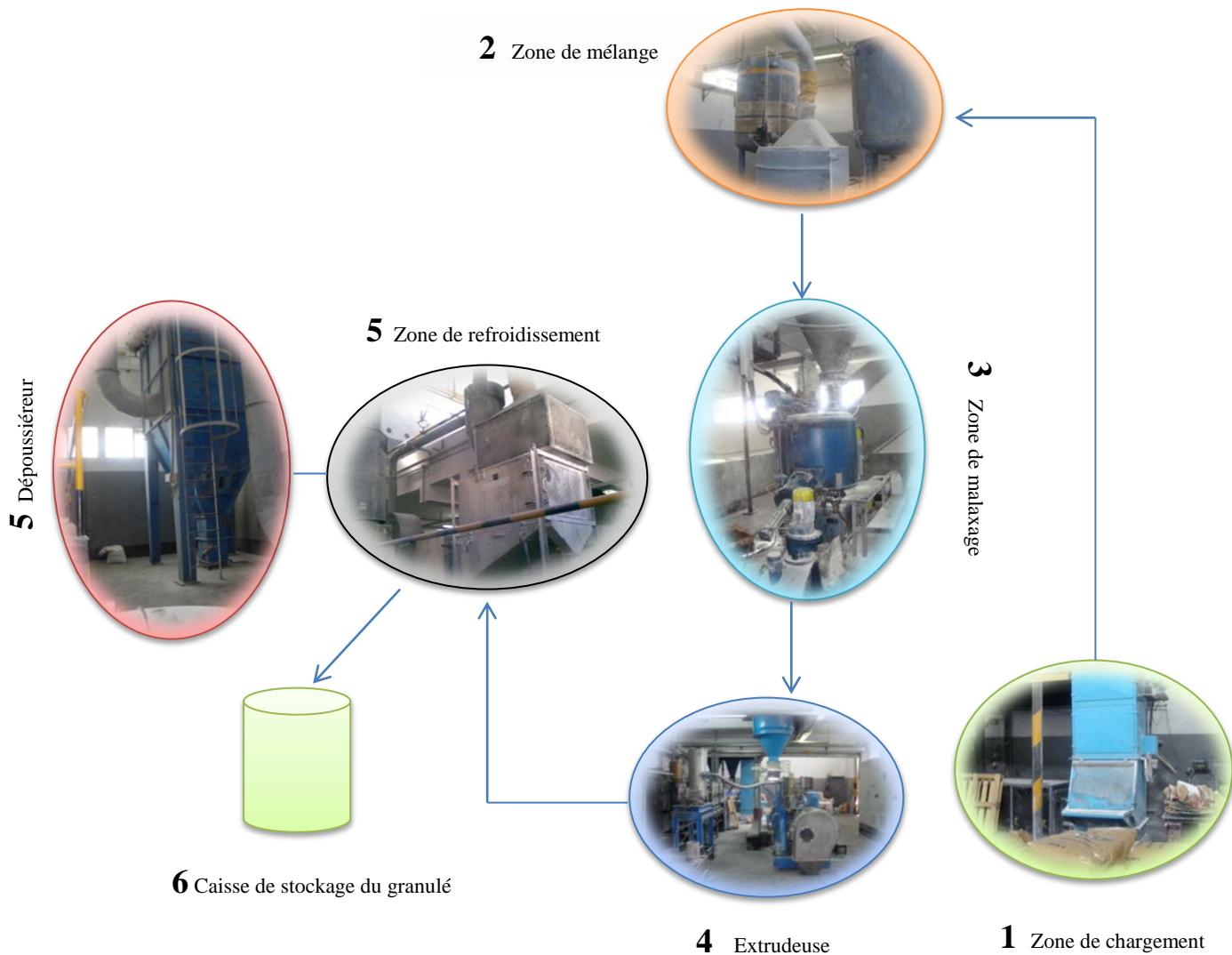
Le polychlorure de vinyle a été découvert par accident à au moins deux occasions au cours du 19ème siècle, d'abord en 1835 par *Henri Victor Regnault* et en 1872 par *Eugen Baumann*. Dans les deux cas, le polymère est apparu comme un solide blanc dans des bouteilles de chlorure de vinyle après exposition à la lumière solaire. Au début du 20ème siècle, les chimistes russes *Ivan Ostromislensky* et *Fritz Klatte* ont tous deux tenté d'utiliser le PVC dans des produits commerciaux, mais leurs efforts ne furent pas couronnés de succès à cause des difficultés de transformation du polymère. En 1926, *Waldo Semon*, en collaboration avec la société B.F. Goodrich, a développé une méthode de plastification du PVC en le mélangeant avec des additifs. Ceci a permis de rendre le matériau plus flexible et plus facile à fabriquer, genèse du succès commercial du PVC.

### 2.3.2. DESCRIPTION DU PROCESSUS

La centrale PVC est divisée en 5 blocs ou zones remplissant chacune une fonction particulière :

- ***La zone de chargement*** : l'opérateur charge la matière première dans la cabine de charge ; un circuit pneumatique conduit cette matière vers la zone de mélange.
- ***La zone de mélange*** : à ce niveau, la matière première se mélange à l'eau et à l'huile selon un dosage bien programmé par l'opérateur. Une trémie canalise les produits mélangés vers la zone de malaxage.
- ***La zone de malaxage*** : ici, le malaxeur converti le mélange en patte à haute température qui est acheminée vers l'extrudeuse via une trémie doseuse.
- ***La zone d'extrusion*** : à cette étape, l'extrudeuse découpe la patte en granulé cylindrique. un conduit reliant la sortie de l'extrudeuse et l'aspirateur permet d'acheminer les grains vers le système de refroidissement.
- ***La zone de refroidissement + dépoussiérage*** : cette zone joue le rôle d'échangeur de chaleur ; le granulé se croise avec l'air dans la zone de refroidissement et lui cède sa chaleur pour retomber dans la caisse de stockage tout en étant refroidi. Le dépoussiéreur a pour rôle d'aspirer tout déchet mêlé au granulé.

Le schéma suivant montre les différentes étapes, dans l'ordre d'enchainement, par lesquelles passe la matière première pour être transformée en PVC :



**Figure 5.**processus de fabrication du PVC

Afin d'obtenir plus d'informations sur le processus de fabrication du PVC, plusieurs séances d'assistance à la centrale en fonctionnement ont été réalisées; nous avons consulté également les documents relatifs aux constructeurs des différentes machines de cette installation afin d'élargir la phase d'exploration des données de notre méthode CPS et passer à l'étape suivante, celle de l'étude du système de refroidissement.

## 2.4. SYSTEME DE REFROIDISSEMENT

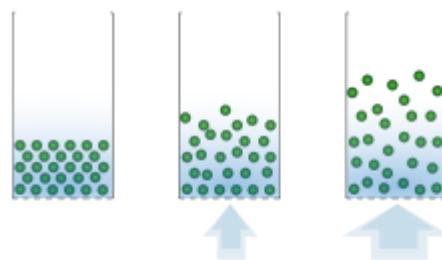
### 2.4.1. INTRODUCTION

Le système de refroidissement de Nexans utilise le principe de refroidissement par lit fluidifié. En physique, dans l'étude de la matière molle, le concept de lit fluidisé (ou de lit fluidifié) permet de donner à une catégorie de solides- dits matériaux granulaires- certaines propriétés des fluides : liquides ou gaz. Son invention est attribuée au chimiste allemand *Fritz Winkler*, qui l'avait appliquée en 1926 à la combustion de charbon réduit en poudre.

Depuis cette période la technique du lit fluidisé circulant s'est considérablement développée. Aujourd'hui, elle est reconnue par les producteurs d'électricité comme l'une des filières de combustion propre du charbon les plus performantes et les plus fiables. Tous constructeurs confondus, elle représente une part importante du marché mondial des chaudières à charbon. Ses domaines d'application sont variés :

- ▶ génération d'eau surchauffée pour réseau de chauffage.
- ▶ génération de vapeur BP/MP pour procédés.
- ▶ cogénération chaleur/électricité.
- ▶ génération pure d'électricité (centrales thermiques).

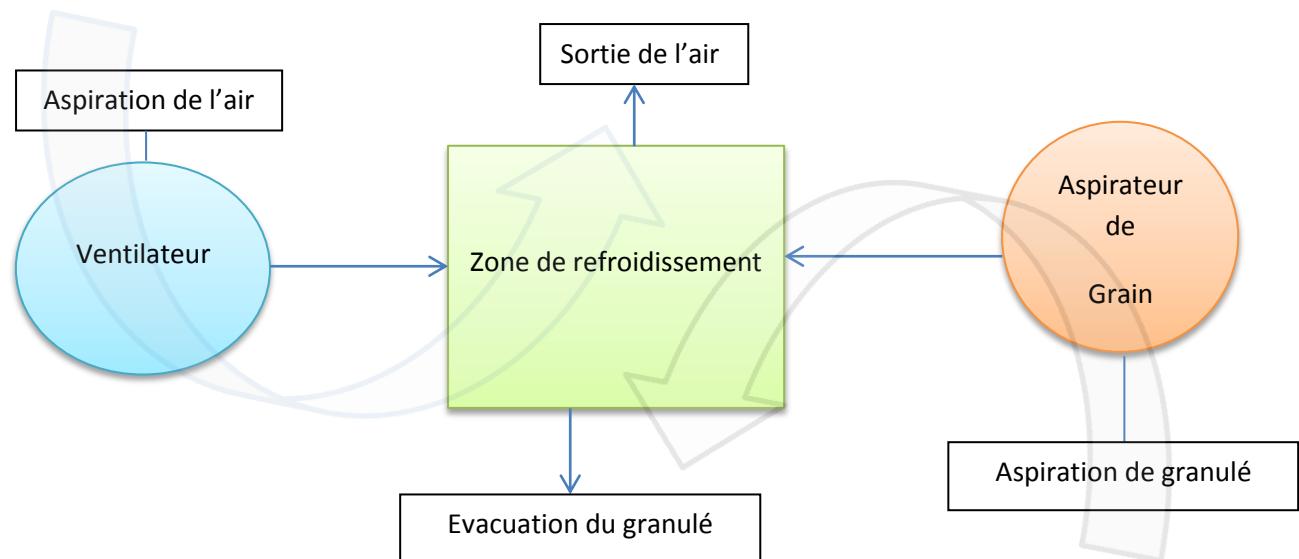
Typiquement pour réaliser un tel dispositif pour les grains de PVC, le principe est d'injecter de l'air par dessous, qui va soulever les grains, selon la vitesse et la nature de l'écoulement. Le but de la fluidisation est d'augmenter le contact air-solide pour faciliter le transfert de chaleur.



**Figure 6.** Illustration d'un lit fluidifié

#### 2.4.2. DESCRIPTION

Le système de refroidissement comprend deux circuits dont l'un est constitué du chemin de l'air, puisé de l'extérieur et accéléré grâce à un ventilateur ; l'autre est constitué des granulés aspirés à la sortie de l'extrudeuse et les deux circuits se croisent en une zone où se passe un transfert de chaleur entre air et granulés, appelée zone de refroidissement.



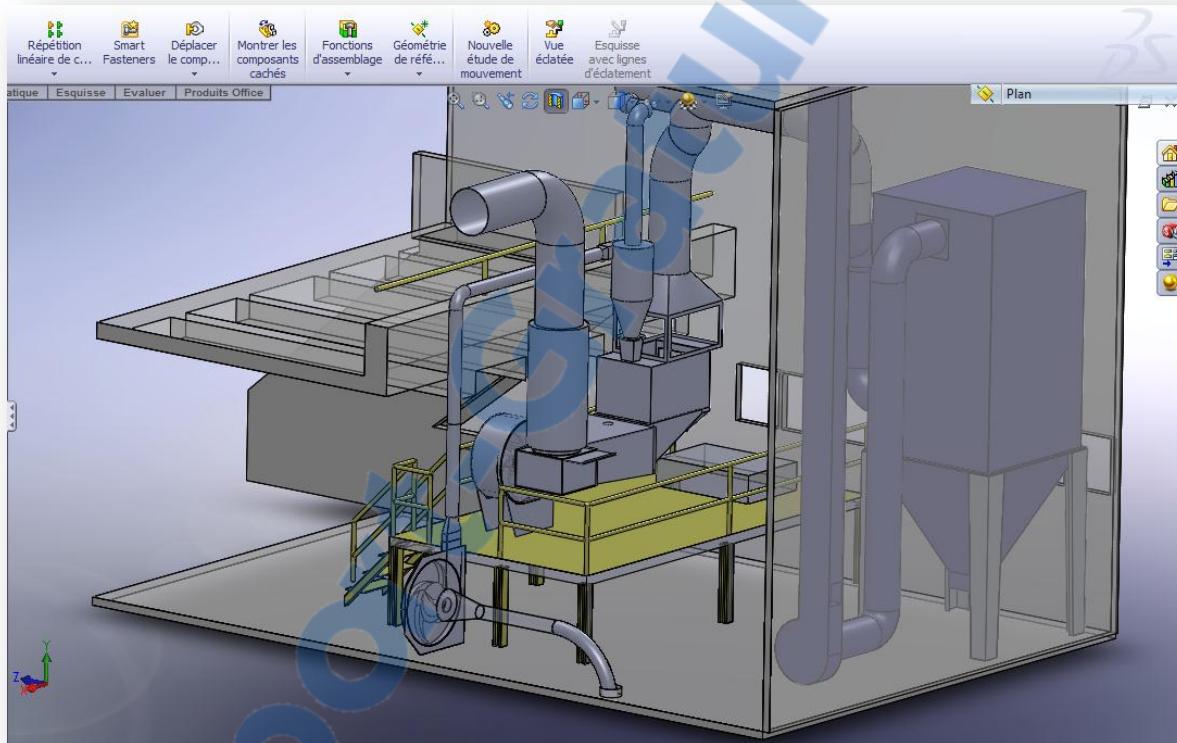
**Figure 7.** Schéma fonctionnel du système de refroidissement



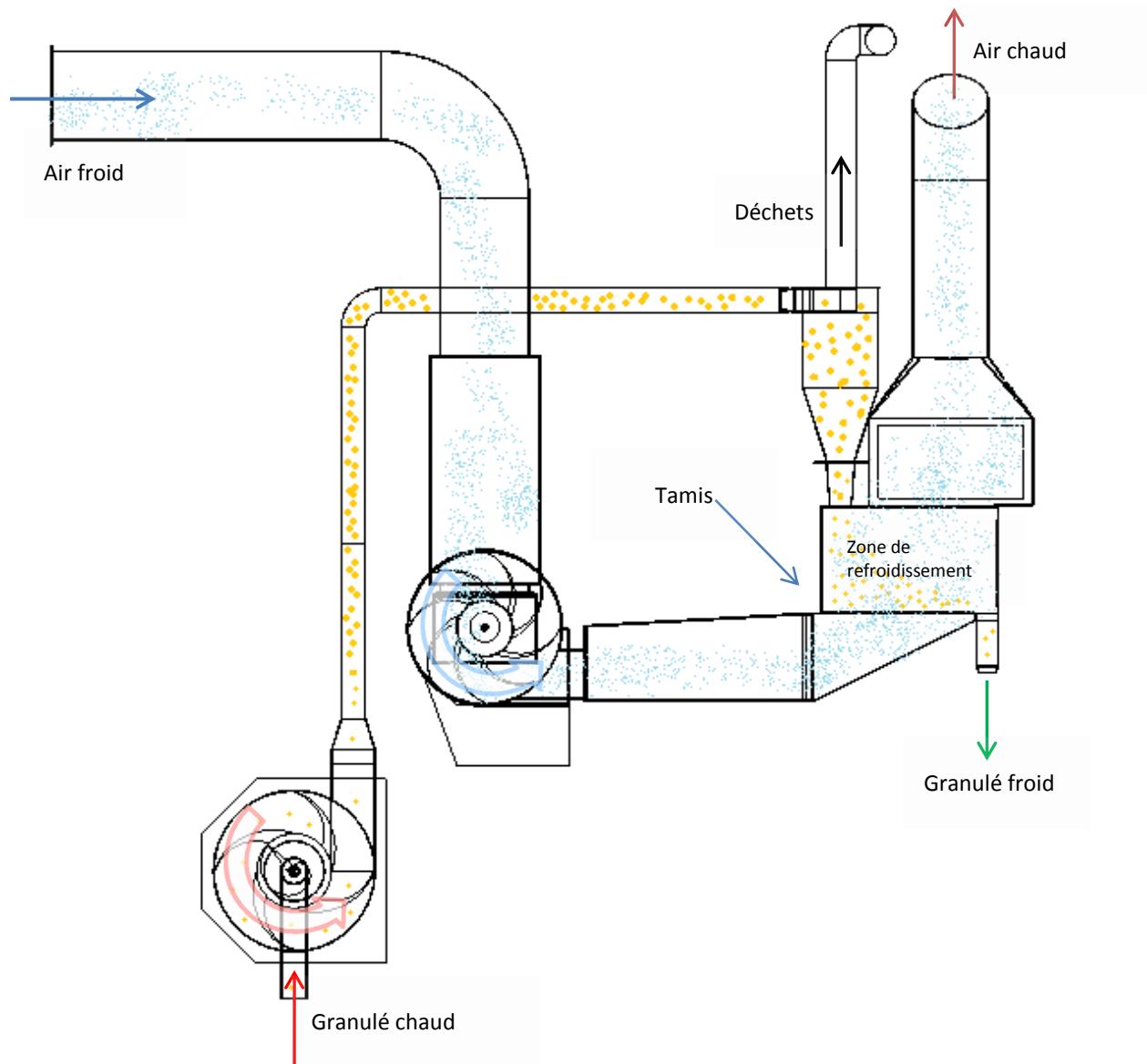
**Figure 8.** Photo système de refroidissement actuel de Nexans

Toujours dans l'étape *explorer les données* de notre méthode CPS, nous avons modélisé l'espace du premier étage de la centrale PVC où se trouve le système de refroidissement. Cela nous permet d'isoler ce système et de le décomposer en éléments simples à fin d'en saisir le rôle joué par chacun puisque nous ne pouvons pas arrêter la production et démonter l'installation en place.

Le logiciel Solidworks est l'outil que nous avons utilisé pour cette fin. Les images qui suivent, montrent l'état d'installation de la centrale PVC :

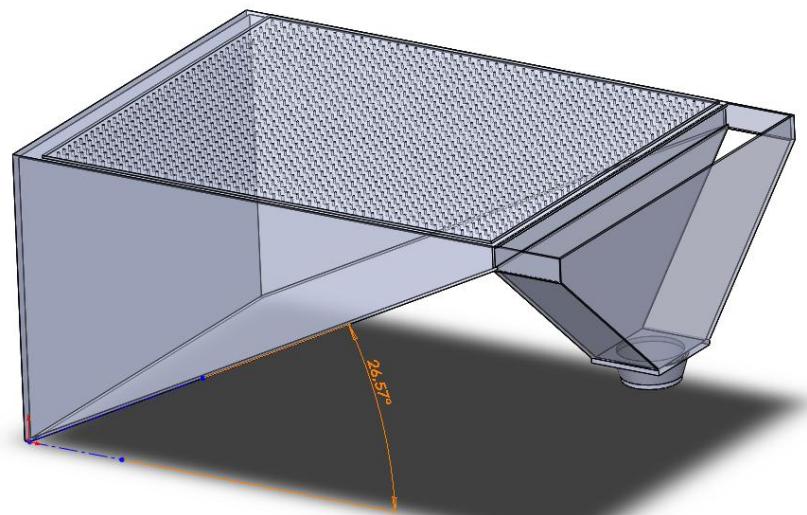


**Figure 9.** Modélisation 3D du système



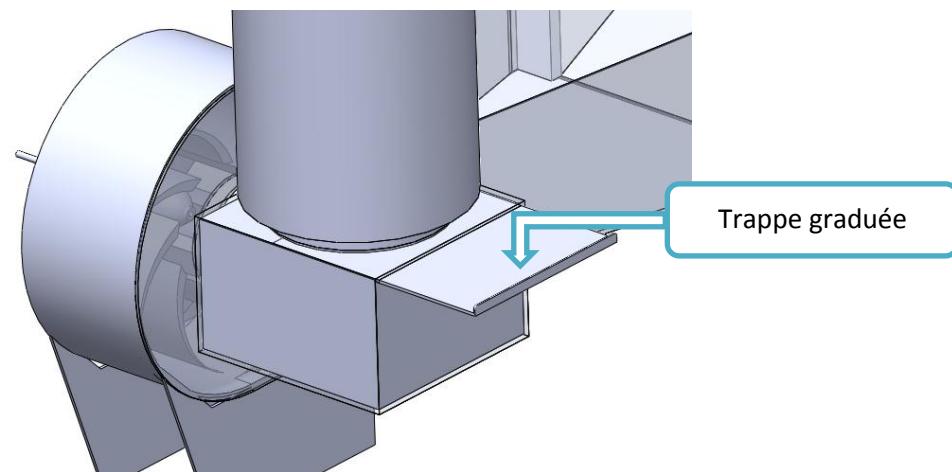
**Figure 10.** Description du fonctionnement

L'air de traitement est fourni au lit par une plaque de distribution perforée que nous assimilons à un tamis et on remarque que la plaque inférieure présente une inclinaison de  $26,5^\circ$  donnant une orientation à la vitesse de l'air de manière à ce que les particules fluidisées soient entraînées vers l'évacuation comme montré par l'image ci-dessous :



**Figure 11.** Plaque de distribution perforée

De même, on remarque également juste à l'entrée du ventilateur, il y a une trappe graduée qui sert à contrôler le débit nécessaire d'air que l'on veut fournir au granulé pour le refroidissement. Elle coulisse entre deux rainures créées dans le box cubique connecté à l'admission du ventilateur comme indiqué sur image :



*Rapport-gratuit.com*  
**Figure 12.** Trappe graduée

- Caractéristiques techniques de la centrale PVC

<b>Ventilateur</b>	
Débit	2,25 m <sup>3</sup> /s
Température (air)	20°
Masse volumique (air)	1,2 Kg/m <sup>3</sup>
Vitesse de rotation	2920 tr/min
Différence de pression	4000 Pa
Puissance à l'arbre	10,7 KW

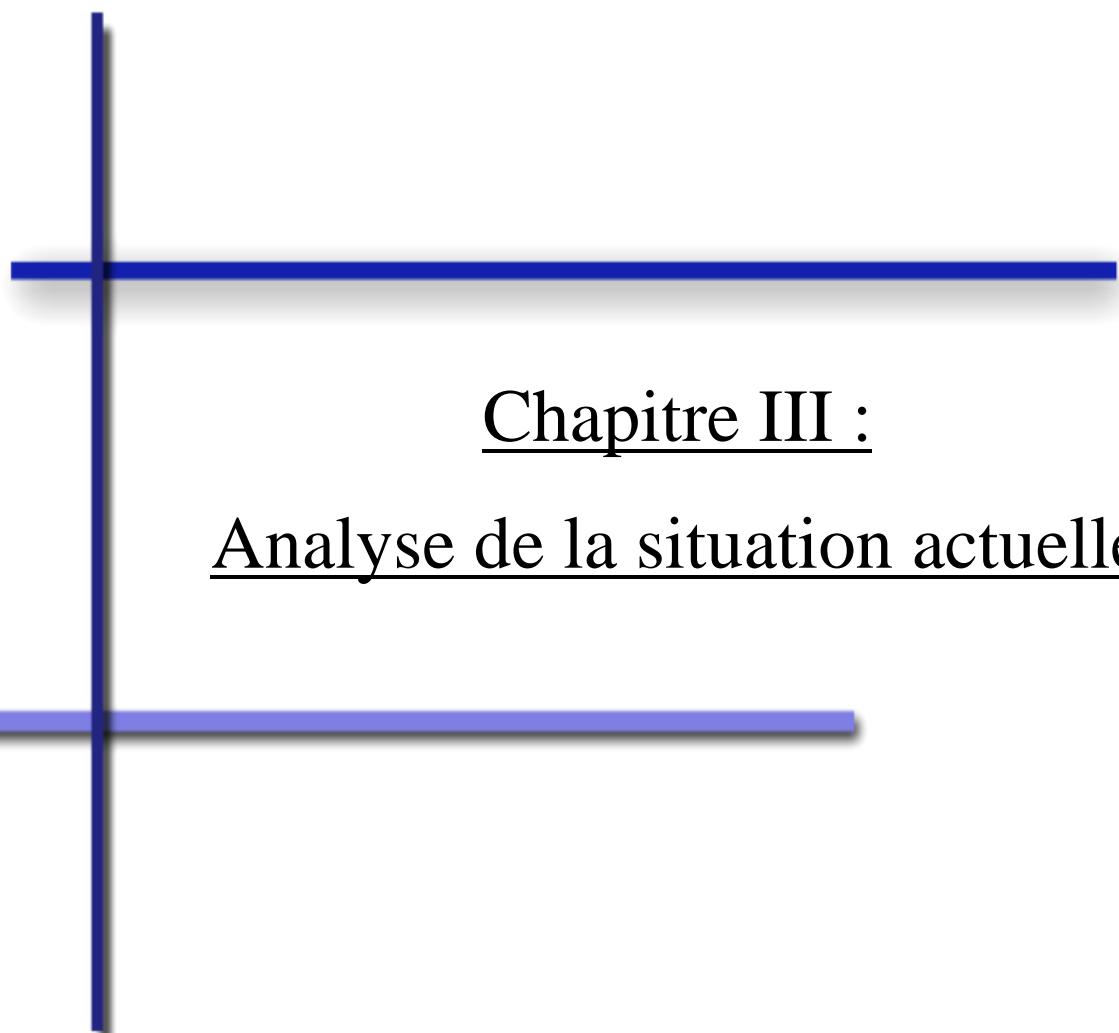
**Tableau 1.** Fiche technique air

<b>Aspirateur</b>	
Débit	3,43 .10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /s
Température (grain)	Dépend de la recette
Masse volumique (PVC)	1395 kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique apparente (PVC)	930 Kg/m <sup>3</sup>
Vitesse de rotation	2380 tr/min
Hauteur d'aspiration	7,5 m
Puissance à l'arbre	18,4 KW
Volume (zone de refroidissement)	0,61831 m <sup>3</sup>

**Tableau 2.** Fiche technique PVC

#### 2.4.3. CONCLUSION

A ce niveau, nous avons exploré les données nécessaires, en rapport avec le système de refroidissement, qui vont nous aider à mieux aborder l'étape qui va suivre. Il faut remarquer que la masse volumique apparente du PVC a été calculé expérimentalement, contrairement à la masse volumique absolue qui peut obtenu dans les documents spécialisés.



## Chapitre III :

## Analyse de la situation actuelle

## Chapitre 3. ANALYSE DE LA SITUATION ACTUELLE

### 3.1. INTRODUCTION

Comme nous l'avons mentionné dans notre introduction, le changement de l'extrudeuse n'a pas que doublé la production du PVC, mais aussi déséquilibré le système de refroidissement. Dans ce chapitre il est question de répertorier toutes les anomalies que connaît la centrale PVC actuellement. Après plusieurs entretiens avec les opérateurs de la centrales, nous avons relevé que :

- Le granulé de PVC n'est pas refroidi correctement.
- Présence d'un étranglement à la sortie du circuit de l'air (emprisonnement d'une bonne quantité d'air à l'intérieur du système de refroidissement).
- Colmatage occasionnelle dans le conduit reliant l'aspirateur à l'extrudeuse.
- Présence de fortes vibrations au niveau du moteur de l'aspirateur (assez fortes pour dévisser les vis du bâti du support moteur).
- Présence de bruit insupportable au premier étage où se trouve le système de refroidissement.
- La trappe de réglage de débit d'air n'est pas opérationnelle.

### 3.2. DEFINITION DU CAHIER DE CHARGE

Les anomalies étant relevées, nous remontons aux origines des causes pour finaliser l'étape « *comprendre le défi* » de notre démarche CPS.

- le granulé traverse la zone de refroidissement sans prendre le temps d'échanger sa chaleur avec l'air ; donc le temps de séjour n'est pas respecté.
- Le débit d'air fourni au système est plus que nécessaire, car une partie du granulé s'en va avec les déchets vers le dépoussiéreur.

- Le moteur de l'aspirateur est monté à la roue de la pompe sans accouplement. Ce montage favorise la propagation des vibrations en cas de déséquilibre de la roue.

Ces éléments nous mettent en accord avec le cahier de charge défini par le bureau d'étude de la société, à savoir :

1. Détermination du temps de séjour du granulé dans la zone de refroidissement.
2. Diminution des vibrations dans l'installation.

### 3.3. CONCLUSION

A ce niveau, nous considérons que le défi est très bien cerné, cela nous permet d'entamer l'étape suivante ; celle de la recherche de solution par la production d'idée en utilisant les outils d'ingénierie.

## Chapitre IV :

### Etude et proposition de solutions

## Chapitre 4. ETUDE ET PROPOSITION DE SOLUTIONS

### 4.1. INTRODUCTION

La complexité de ce problème nécessite l'utilisation des plans d'expérience pour mieux choisir les bonnes relations entre les paramètres qui influencent le temps de séjour du granulé. Faute d'instruments de mesures, il nous est impossible de procéder avec les plans d'expérience ; par conséquent nous nous contenterons d'une étude thermique et d'une étude du lit fluidisé de la zone de refroidissement.

### 4.2. ETUDE THERMIQUE

Cette étude nous permet de comprendre de quelle manière le transfert de chaleur s'opère entre le granulé chaud et l'air froid. Nous sommes dans un cas où le fluide circule autour d'un solide, donc il s'agit d'un transfert de chaleur par convection.

La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres :

- La différence de température entre la paroi et le fluide
- La vitesse du fluide
- La capacité thermique massique du fluide
- La surface d'échange
- L'état de surface du solide
- Les dimensions du corps etc...

Cette convection est du type forcée parce que le fluide est accéléré par un ventilateur et en plus les grains sont en mouvement également.

Il est nécessaire de déterminer le régime de l'écoulement car il influence la détermination du transfert de chaleur. Le régime est soit :

- Turbulent ou
- Lamininaire

- Position du problème

Le granulé sort à 100°C et le rôle du système de refroidissement est de ramener sa température à 30°C environs. L'air étant à 20°C, le flux de chaleur est donnée par :

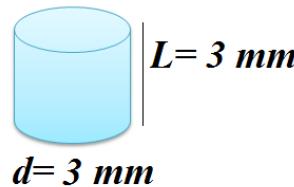
$$\frac{\delta Q}{dt} = h \cdot s \cdot (20^\circ - T) \quad \rightarrow \quad m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = h \cdot s \cdot (20^\circ - T)$$

$m$  La masse du grain (connue).

$C_p$  La chaleur spécifique de l'air (connue).

$h$  Le coefficient de convection qui dépend de la situation donnée (à déterminer).

$S$  La surface du solide qui est en contact avec le fluide (à déduire des dimensions du grain).



**Figure 13.** Dimensions du grain de PVC

- Détermination du coefficient de convection  $h_c$  :

Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\mu} = \frac{2,58 \times 1,2 \times 6 \cdot 10^{-3}}{1,91 \cdot 10^{-5}} = 9,7 \cdot 10^2 \Rightarrow \text{l'écoulement est laminaire car } Re < Re_c = 2200$$

Calcul du nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} = \frac{1,91 \cdot 10^{-5} \times 1000}{0,027} = 0,71$$

$$Nu = 0,66 \times (Pr)^{\frac{1}{3}} \cdot (Re)^{\frac{1}{2}} = 0,66 \times 0,71^{\frac{1}{3}} \times (9,7 \cdot 10^2)^{\frac{1}{2}} \rightarrow Nu = 18,3$$

$$h_c = \frac{0,027 \times 18,3}{6 \cdot 10^{-3}} = 82,35 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Détermination de la masse du grain :

$$m = \rho \cdot V = 1395 \times 2,75 \cdot 10^{-8} = 3836,25 \cdot 10^{-8} kg$$

- La surface exposée à l'air :

$$S = 2\pi R^2 + 2\pi RL = 2 \times 3,14 \times (1,5 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \times 3,14 \times (1,5 \cdot 10^{-3}) \times 3 \cdot 10^{-3} = 4,239 \cdot 10^{-5} m^2$$

En remplaçant dans l'équation on a :

$$m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = h \cdot s \cdot (T_F - T) \implies dt = \frac{m \cdot c \cdot dT}{h \cdot s \cdot (T_F - T)} = \frac{3836,25 \cdot 10^{-8} \cdot 1750}{82,8 \times 4,239 \cdot 10^{-5}} \int \frac{dT}{20 - T} \implies 19,23 \int_{100}^{30} \frac{dT}{20 - T}$$

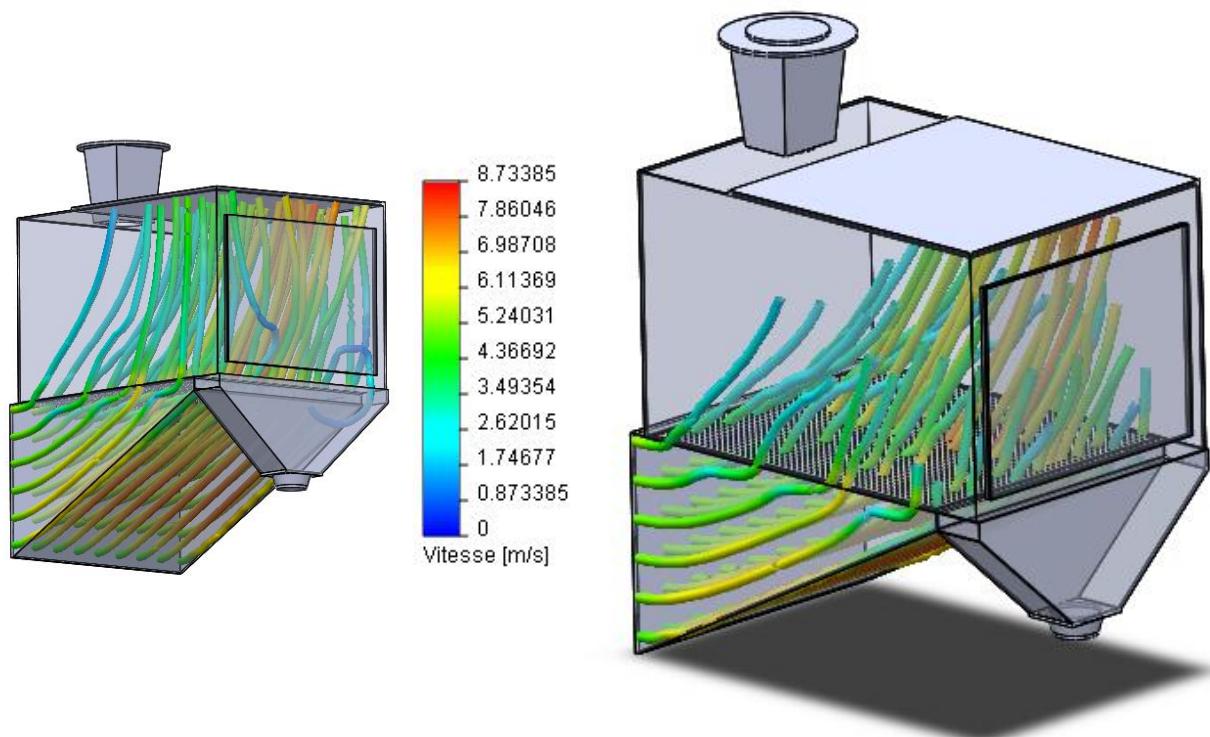
$$19,23 \ln \left( \frac{100 - 20}{30 - 20} \right) = 40 s$$

**Remarque :**

Pour refroidir le granulé de 100°C à 30°C avec l'air à 20°C, il nous faut juste 40 secondes.

#### 4.3. ETUDE DU LIT FLUIDISE

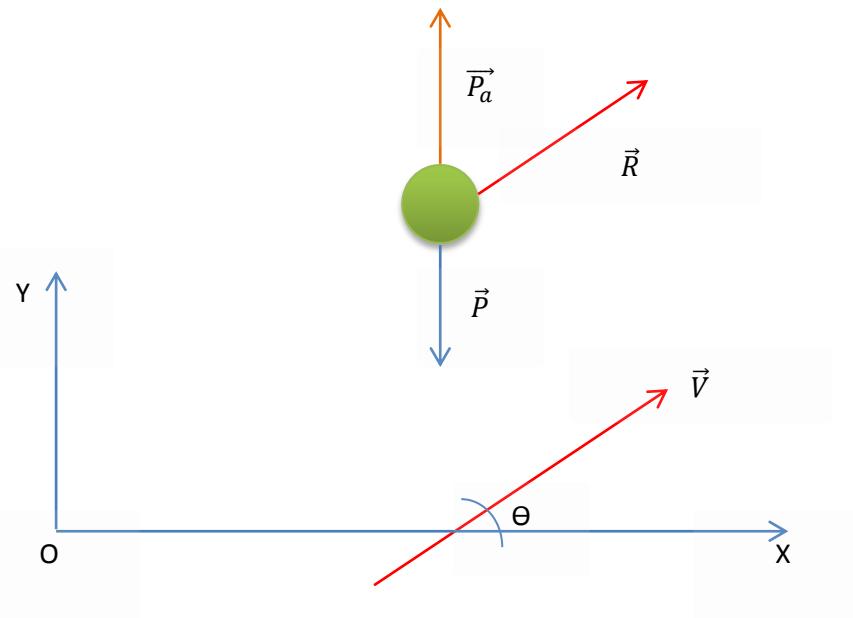
Le système n'est pas translucide pour nous permettre de voir comment le granulé se comporte à l'intérieur de la zone de refroidissement. Une simulation sur logiciel nous permettra d'orienter l'étude analytique ; Solidworks nous permet uniquement de simuler l'action de l'air dans le système comme indiqué sur les images ci-dessous :



**Figure 14.** Lignes de courant des vitesses de l'air traversant le tamis

L'orientation des lignes de courant des vitesses de l'air conditionne la force de résistance de l'air appliquée au granulé.

Lorsque les grains tombent dans la zone de refroidissement, ils sont soumis à l'influence de l'air, de leur poids et à la poussée d'Archimède.  
Appliquons le principe fondamental de la dynamique :



**Figure 15.** Etude dynamique du granulé

En décomposant cette vitesse suivant l'axe X et Y, on a :

$$\vec{V} = V \cos \theta \vec{i} + V \sin \theta \vec{j}$$

$$\vec{P}_a = \text{poussée d'Archimède} = \rho_{air} V_a g \vec{j} \quad \text{avec } V_a \text{ le volume de l'air déplacé.}$$

$$\vec{P} = \text{poids du granulé/s} = -\rho_{grain} V_g g \vec{j} \quad \text{avec } V_g \text{ le volume occupé par le granulé en 1 seconde.}$$

$$\vec{R} = \text{résistance de l'air} = \frac{1}{2} \rho_{air} S C_x v^2 (\cos \theta \vec{i} + \sin \theta \vec{j}) \quad \text{avec } S \text{ le maitre-couple, } C_x \text{ le coefficient de trainée et } v \text{ la vitesse de l'air.}$$

$$\vec{P}_a + \vec{P} + \vec{R} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

La projection de cette équation sur les axes donne :

$$\begin{cases} \rho_{air}V_ag - \rho_{grain}V_gg + \frac{1}{2}\rho_{air}SC_xv^2\sin\theta = \rho_{grain}V_g \frac{dy}{dt} \\ \frac{1}{2}\rho_{air}SC_xv^2\cos\theta = \rho_{grain}V_g \frac{dx}{dt} \end{cases}$$

Une première intégration, avec les conditions initiales telles que à  $t = 0$ ,  $\dot{y} = v_o$  et  $\dot{x} = 0$ , car en quittant l'aspirateur, les grains ont une certaine vitesse que l'on peut déterminer, donne :

$$\begin{cases} \left(\rho_{air}V_ag - \rho_{grain}V_gg + \frac{1}{2}\rho_{air}SC_xv^2\sin\theta\right)t + \rho_{grain}V_gv_o = \rho_{grain}V_g \frac{dy}{dt} \\ \left(\frac{1}{2}\rho_{air}SC_xv^2\cos\theta\right)t = \rho_{grain}V_g \frac{dx}{dt} \end{cases}$$

Une seconde intégration, avec les conditions initiales telles que à  $t = 0$ ,  $y_0 = 0,7\text{m}$  et  $x=0$ , donne :

$$\begin{cases} \left(\rho_{air}V_ag - \rho_{grain}V_gg + \frac{1}{2}\rho_{air}SC_xv^2\sin\theta\right)\frac{t^2}{2} + \rho_{grain}V_gv_o t + y_0 = \rho_{grain}V_g y \\ \left(\frac{1}{4}\rho_{air}SC_xv^2\cos\theta\right)t^2 = \rho_{grain}V_g x \end{cases}$$

$C_x$  = la forme cylindrique des grains conditionne le choix de coefficient à 1,05

$S$  = le maître couple se calcul en faisant le produit de  $L.d.0,85$  ( longueur et diamètre du grain)

$\theta = 26,57^\circ$

$\rho_{air} = 1,2 \text{ Kg/m}^3$

$\rho_{grain} = 930 \text{ Kg/m}^3$

$v_o = \text{débit/section} = 3,43 \cdot 10^{-4} / 0,17^2 \cdot \pi = 0,091 \text{ m/s}$

$V_g = 3,43 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

$v = \text{débit/section} = 2,25 / 0,7957 = 2,58 \text{ m/s}$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

- La première équation nous permet de déterminer le débit d'air qu'on doit fournir aux grains sans que ceux-ci ne dépassent une hauteur  $y$  qu'on peut fixer. Nous proposons de prendre la moitié de  $y_0 = 0,7$  m, demi-hauteur de la zone de refroidissement, soit 0,35 m :

Après calcul, nous trouvons que le débit d'air déplissé est de  $V_a = 0,265 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit 12% du débit actuel qui est de  $2,25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ceci nous permet de proposer une réduction du débit fourni par le ventilateur ; pour s'en rassurer, nous pouvons reduire de moitié ce débit et observer le comportement du système de refroidissement.

- La deuxième équation nous permet de calculer le temps qu'il faut aux grains de parcourir la longueur du tamis. Il faut comparer ce temps là avec le temps calculé précédemment, dans la partie thématique :

D'une part, nous avons observé avec l'étude thermique, qu'il faut 40 secondes pour que le granulé refroidisse, nous déduisons la vitesse qu'il faut au granulé pour parcourir le tamis :

$$t = 40 \text{ s} \text{ et } L = 1,210 \text{ m} \text{ donc } V = \frac{L}{t} = 0,03025 \text{ m/s}$$

En reportant la valeur de cette dans l'équation  $\left(\frac{1}{2}\rho_{air}SC_xv^2\cos\theta\right)t = \rho_{grain}V_g \frac{dx}{dt}$ , le calcul nous donne un temps  $t = 337$  secondes,

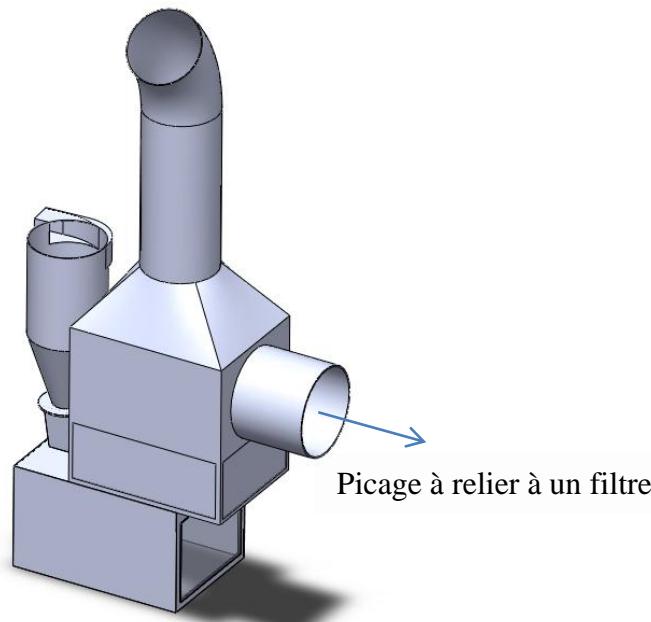
Soit temps de séjour = 5 minutes.

#### 4.4. SOLUTIONS PROPOSEES

##### 1. Création d'un circuit ouvert

Après avoir déterminé le temps de séjour, il reste à voir la mise en service du système de refroidissement. Un déroulement optimum du fonctionnement dépend du choix correct de la perforation du tamis, de l'inclinaison  $\Theta$  et de la hauteur de la couche. Mais cela ne sera possible que si l'étranglement de l'air est éliminé. Deux solutions sont possibles :

- Diminuer le débit du ventilateur pour permettre au dépoussiéreur de récupérer l'air aisément.
- Effectuer un picage au refoulement de l'air, qui va déboucher vers un filtre, comme indiqué sur l'image ci-dessous :

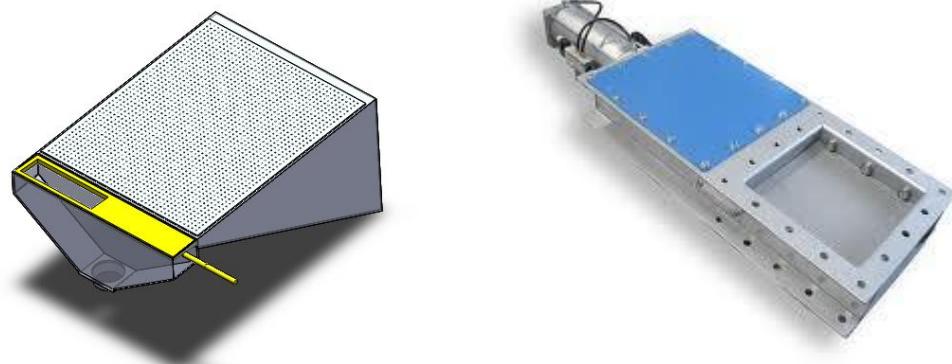


**Figure 16.** Picage d'ouverture de circuit

## 2. Contrôle de la hauteur de la couche.

Le granulé fluidifié dans la zone de refroidissement se comporte comme un liquide qui remplit la zone à une certaine hauteur que nous appelons « *hauteur de la couche* ». Cette hauteur nécessite d'être entretenue pour permettre aux grains de respecter le temps de séjour. Cela peut se faire de plusieurs manières, à savoir :

- Placer une vanne guillotine qui sera ouverte chaque 10 minute pour être sur que le grain s'est bien refroidi. Cette vanne contient une trappe qui coulisse, moyennant une commande numérique, dans l'espace vide. Cela permettra aux grains d'être évacués vers le stockage.



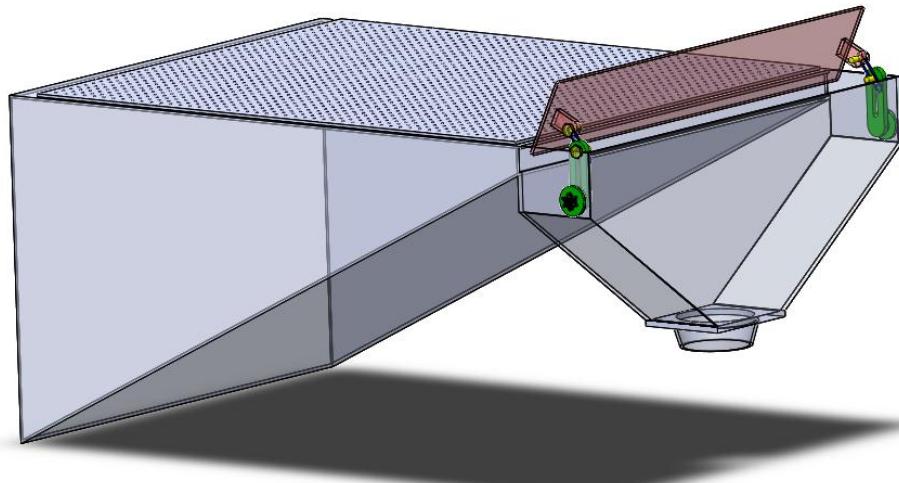
**Figure 17.** Placement d'une vanne guillotine

- L'autre solution consiste à placer au même endroit, un clapet dont on pourrait modifier l'ouverture. Cela nécessitera de faire une modification de l'organe qui porte le tamis. C'est une solution qui fonctionne déjà dans un autre type de refroidisseur à lit fluidisé.



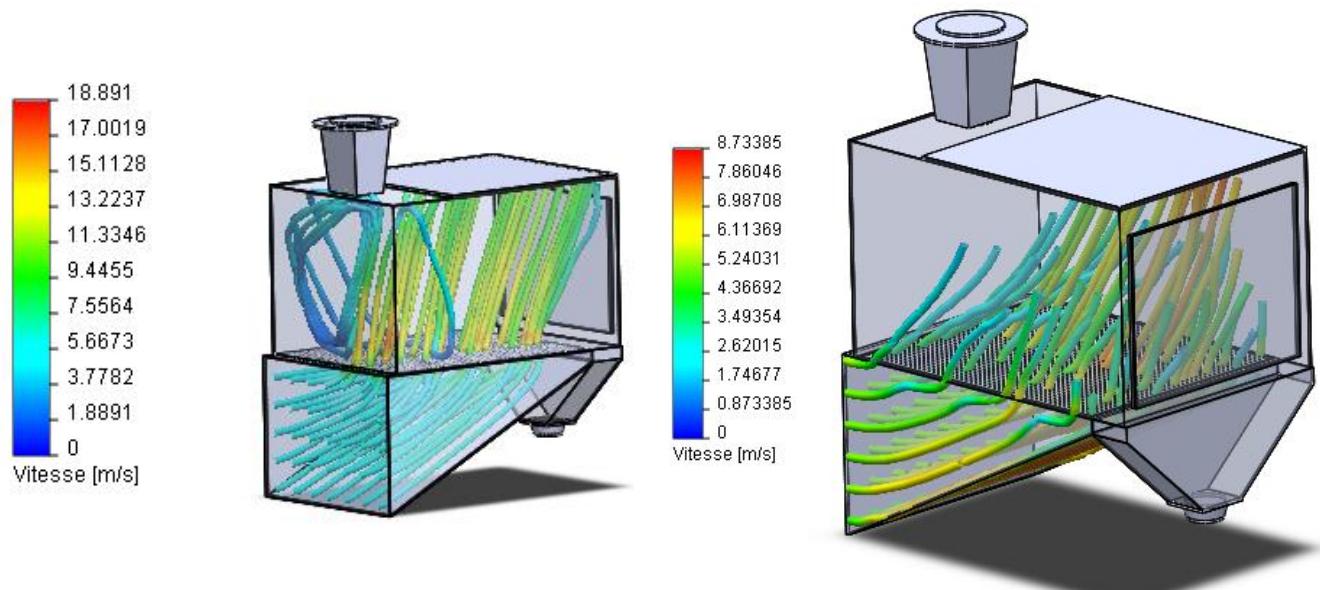
**Figure 18.** Clapet de contrôle de hauteur d'un refroidisseur type.

Le logiciel Solidworks nous permet de concevoir un clapet similaire et de l'adapter comme solution possible. Les images qui suivent, en donne une idée :



**Figure 19.** Modèle 3D du clapet de contrôle de hauteur

- En fin, l'angle de perçage du tamis doit aussi être pris en compte car une simulation, dans les mêmes conditions, avec un tamis dont les trous sont orientés suivant l'angle d'inclinaison  $\Theta$ , donne un max de vitesse nettement supérieur au tamis percé à angle droit comme précédemment. Cela pourra améliorer le rendement du ventilateur.



**Figure 20.** Différence entre tamis à inclinaison  $\Theta$  et tamis à angle droit.

#### 4.5. CONVERGENCE VERS LA SOLUTION OPTIMALE

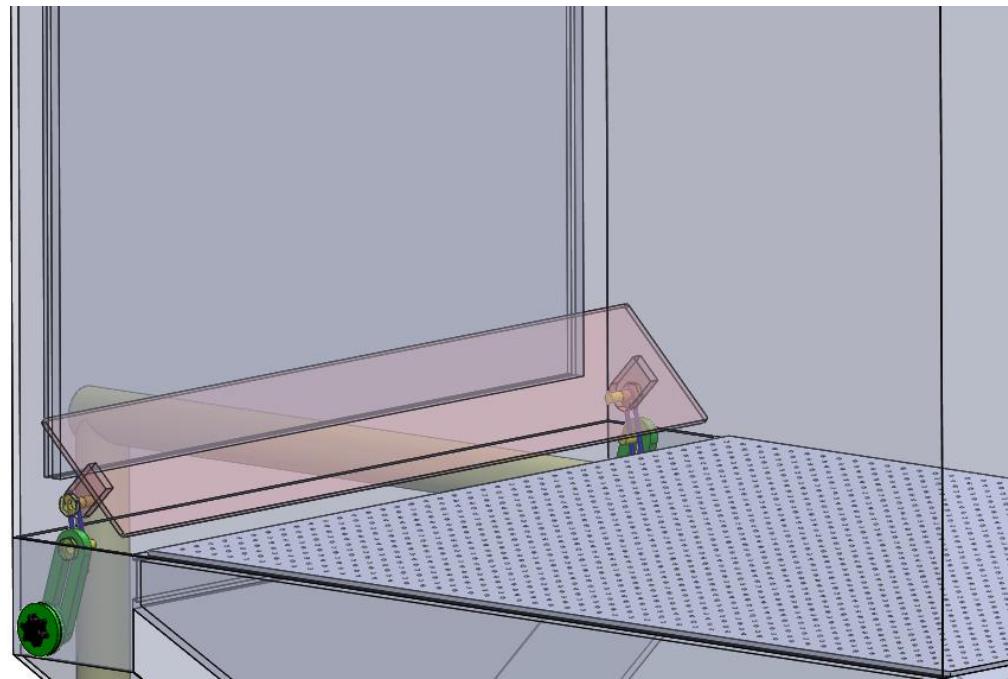
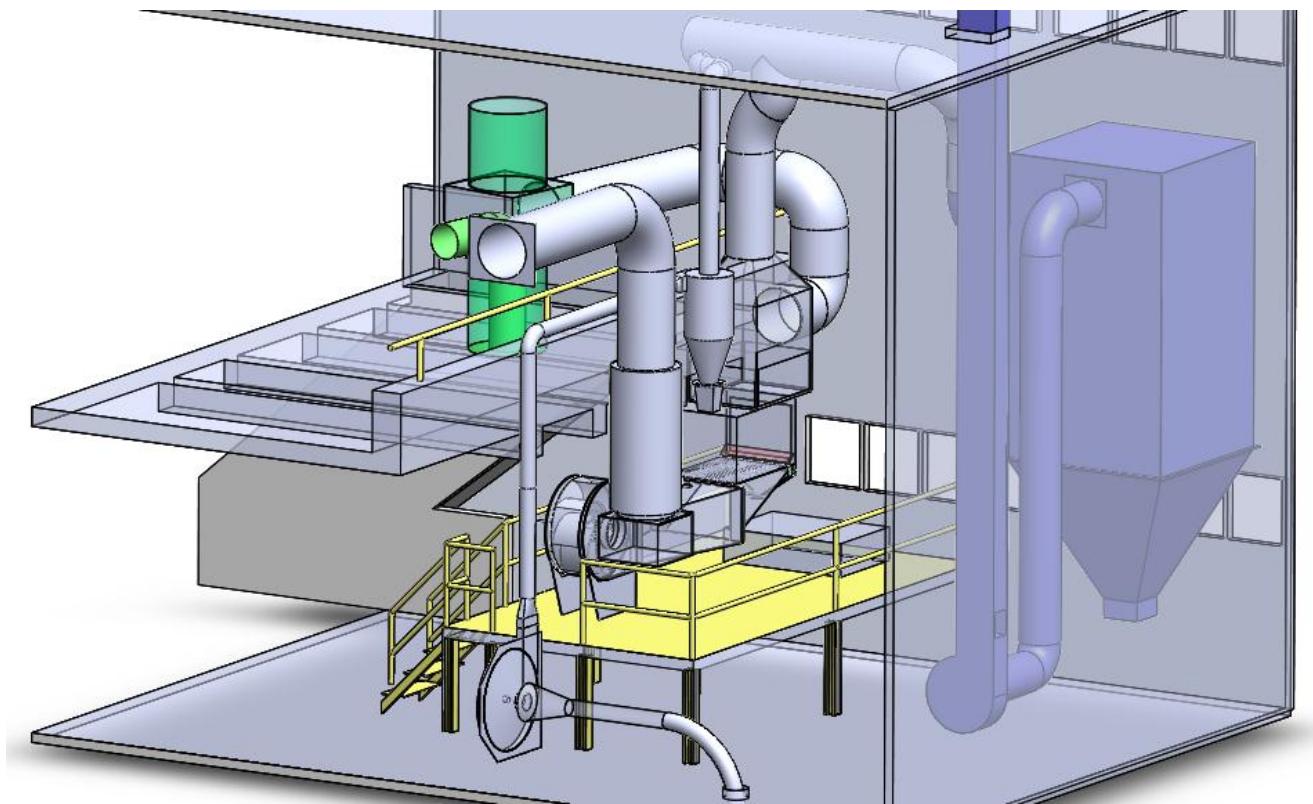
A ce niveau nous atteignons la dernière phase de notre démarche CPS, qui débouche vers la solution optimale après élimination des autres concepts.

Critères	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4
	Sans picage + vanne + tamis à trou droit	Avec picage + vanne + tamis à trou droit	Avec picage + clapet + tamis à trou droit	avec picage + clapet + tamis à angle $\Theta$
Fonctionnement en continue (fluidisation)	-	-	+	+
Bon rendement du ventilateur	+	+	+	+++
Respect du temps de séjour	+	+	++	++
Fiabilité de fonctionnement	-	-	++	++
Maintenabilité	-	-	++	++
Facilité de réalisation	+++	++	+	-
Total	5	4	9	10

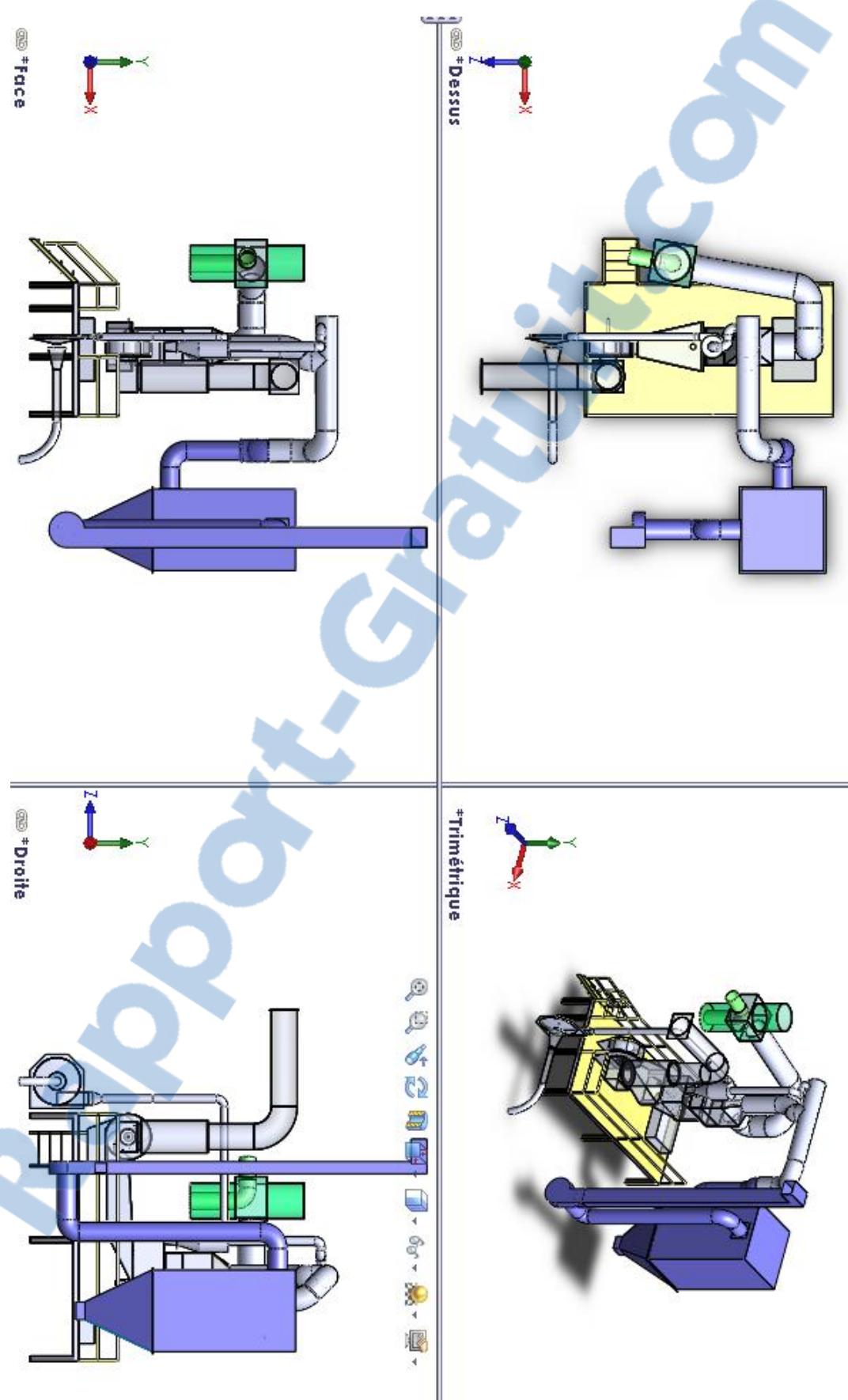
**Tableau 3.** Matrice de convergence des solutions.

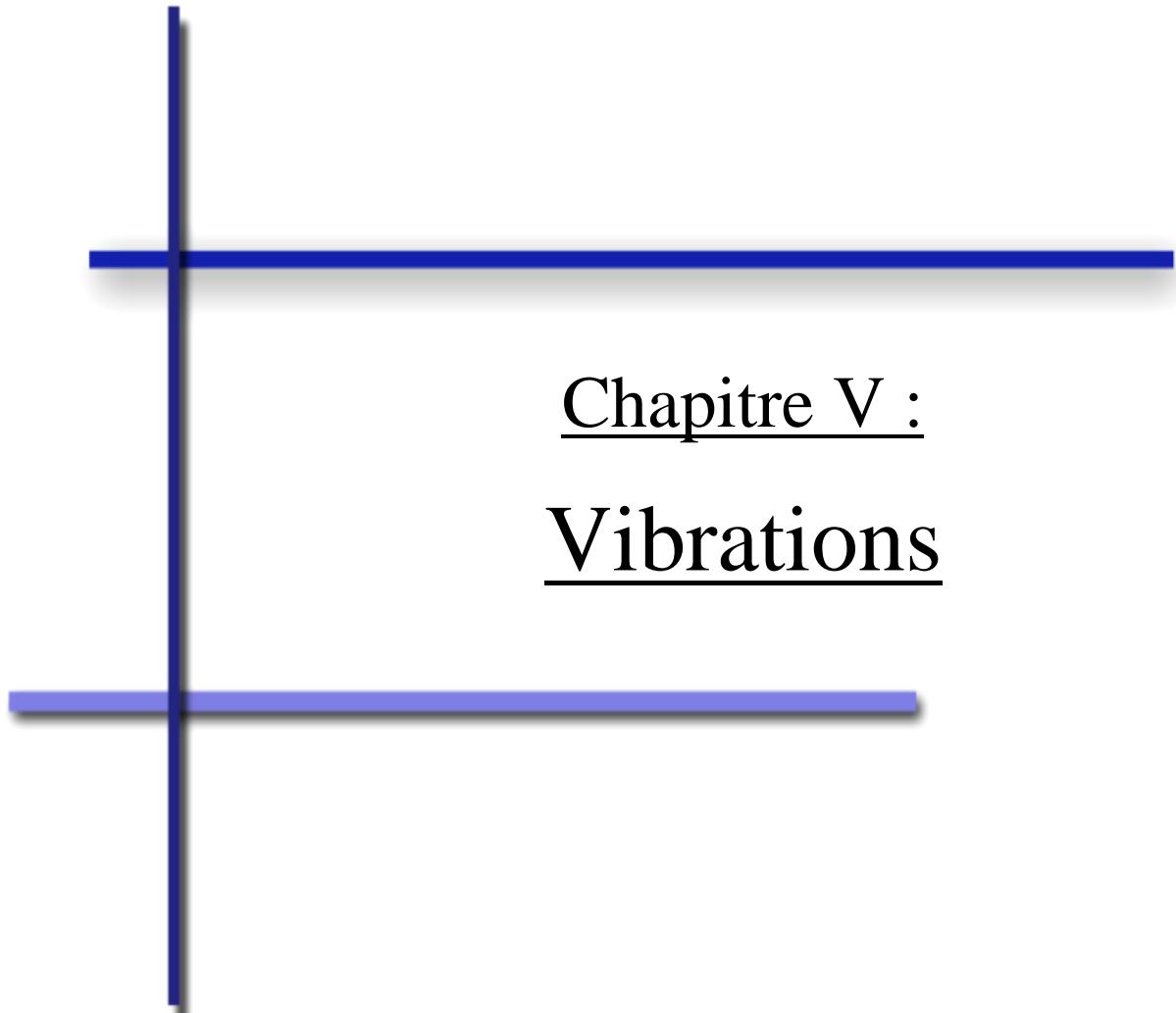
#### 4.6. CONCLUSION

La matrice de convergence montre que le concept 3 et le concept 4 satisfont le mieux aux critères retenus. Le concept 4 est retenu comme solution optimale. Ainsi s'achève la première partie du problème de la centrale PVC ; le prochain chapitre traitera le problème de vibrations. Les images qui suivent montrent le système de refroidissement modifié.



**Figure 21.** Images 3D de la solution





## Chapitre V : Vibrations

## Chapitre 5. VIBRATIONS

### 5.1. INTRODUCTION

Le moteur électrique de l'aspirateur transmet à la pompe une puissance de 18,4 KW à la fréquence de rotation de 2380 tr/min par l'intermédiaire d'un arbre de transmission de diamètre  $d$ . L'image ci-dessous, montre le montage actuel où l'arbre est lié à la roue de la pompe sans accouplement.



**Figure 22.** Montage sans accouplement

Or l'environnement dans lequel fonctionne cette pompe est tel que la pompe est soumise à des efforts qui sont susceptibles d'occasionner un déséquilibrage de la roue ; car la poussée induite par le granulé est plus grande que celle induite par l'air au ventilateur. C'est pourquoi nous avons plus de vibrations à l'aspirateur qu'au ventilateur alors que les deux sont montés de la même manière à leurs moteurs respectifs.



En général, les pannes qui se présentent dans une installation de pompage sont attribuables aux causes suivantes:

- Pannes de la pompe
- Pannes ou défauts du système de canalisation
- Pannes dues à l'installation ou à la mise en service incorrecte
- Pannes dues au mauvais choix du type de la pompe

Le tableau ci-dessous regroupe les différentes causes possibles aux pannes fréquentes :

<b>Pannes plus fréquentes</b>	<b>Causes possibles</b>
La pompe ne donne pas de liquide	1, 2, 5, 9, 10, 11, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 29
Le courant de volume de la pompe est insuffisant	1, 2, 5, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 21, 28, 29
La hauteur de refoulement de la pompe est insuffisante	2, 5, 13, 14, 17, 19, 28, 29
La pompe cale après la mise en service	1, 2, 5, 9, 10, 11
La consommation de la pompe est plus élevée que la consommation normale	12, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 38, 44
La consommation de la pompe est moindre que la consommation normale	3, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 28, 29
La pompe vibre ou fait du bruit	1, 9, 10, 11, 15, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 37, 38, 44
Les paliers s'usent trop ou s'échauffent	23, 24, 25, 26, 27, 37, 38, 44
La pompe marche lourde ou devient chaude, ou se grippe	20, 23, 24, 25, 26, 27, 37, 38, 44
Les coussinets s'usent trop	5, 26, 27, 38
Le coussinet se grippe	25, 26, 27, 38

**Tableau 4.** Différents pannes d'une pompe

	<b>Causes possibles</b>
1	Le corps de pompe n'est pas suffisamment immergé
2	Le liquide contient de l'air ou du gaz
5	La pompe aspire de l'air par le coussinet inférieur
9	La conduite d'aspiration ou la crête est obstruée
10	Le corps de pompe n'est pas suffisamment immergé pendant le fonctionnement
11	leNPSH disponible trop basse
12	Régime trop accéléré
13	Regime trop ralenti
14	Mauvais sens de rotation
15	La pompe ne fonctionne pas au point de régime correct
16	La masse volumique du liquide est autre que la viscosité calculée
17	La viscosité du liquide est autre que la viscosité calculée
18	La pompe fonctionne à un trop petit débit du liquide
19	Mauvais choix du type de la pompe
20	Obstruction de la roue ou du corps de pompe
21	Obstruction du système des canalisations
22	Mauvaise installation de l'ensemble de la pompe
23	La pompe et le moteur n'ont pas été alignés exactement
24	Frottement d'une pièce rotative
25	Déséquilibre dans les parties rotatives ( roue, arbre,...)
26	Oscillation de l'arbre de la pompe
27	Paliers défectueux ou usés
29	Roue endommagée
37	Le coinçage axial de la roue ou de l'arbre
38	Mauvais montage des paliers
44	Le tuyau de refoulement n'est pas monté sans tension

**Tableau 5.** Causes éventuelles des pannes

Rien que pour les vibrations et les bruits, on remarque qu'il ya plus de causes que pour les autres pannes et ceci montre à quelle mesure les vibrations peuvent être dangereux pour une pompe. Comme nous l'avons déjà souligné plus haut, l'ancienne configuration du montage direct, sans accouplement, de la roue au moteur amplifie le transfert de vibration en cas de défaut d'alignement de l'arbre ; pour corriger cela, de commun accord avec le bureau d'étude en place, nous suggérons d'adapter le montage usuel qui permet de corriger le défaut d'alignement. C'est-à-dire placer un accouplement entre l'arbre et le moteur d'entrainement. Cette solution nécessite :

- Un redimensionnement de l'arbre, vu qu'il faut l'allonger.
- Un choix du type de transmission pour minimiser les vibrations.

L'arbre devra être guidé en rotation ; il existe une diversité des solutions pour assurer cela. nous choisissons le guidage par palier à roulement parce qu'il est présent les avantages suivants:

- préférable si le couple de démarrage est élevé
- lubrification plus facile à réaliser
- moins encombrants axialement
- peuvent supporter des charges combinées
- facilement interchangeable (normes ISO)
- une avarie est signalée par un bruit croissant du palier
- permettent un centrage précis des arbres
- supportent mieux les surcharges momentanées



**Figure 23.** Palier à roulement

## 5.2. ETUDE RDM

### 5.2.1. INTRODUCTION

En résistance des matériaux, il existe deux méthodes de calculs:

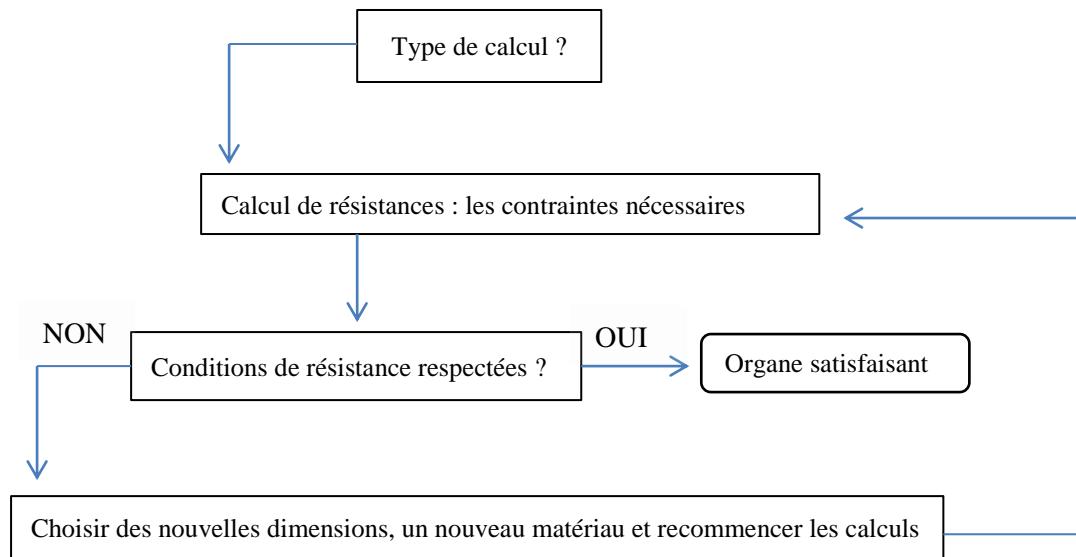
- **le calcul de vérification:** les efforts sont connus, l'organe est déterminé (dimensions, matériaux connus) et on vérifie s'il convient. si cela n'est pas le cas, on calcule de nouvelles dimensions et/ ou on change de matériau.
- **le calcul de détermination:** les efforts sont connus, le matériau est déterminé et on calcule les dimensions.

Dans notre cas, il s'agit d'un calcul de vérification car, la solution a été adaptée pour remédier aux vibrations qui devenaient plus qu'insupportables. Le choix des dimensions a été fait par expérience, mais une vérification est toujours une garantie de sûreté.



**Figure 24.** Adaptation de la solution d'accouplement au moteur de l'aspirateur.

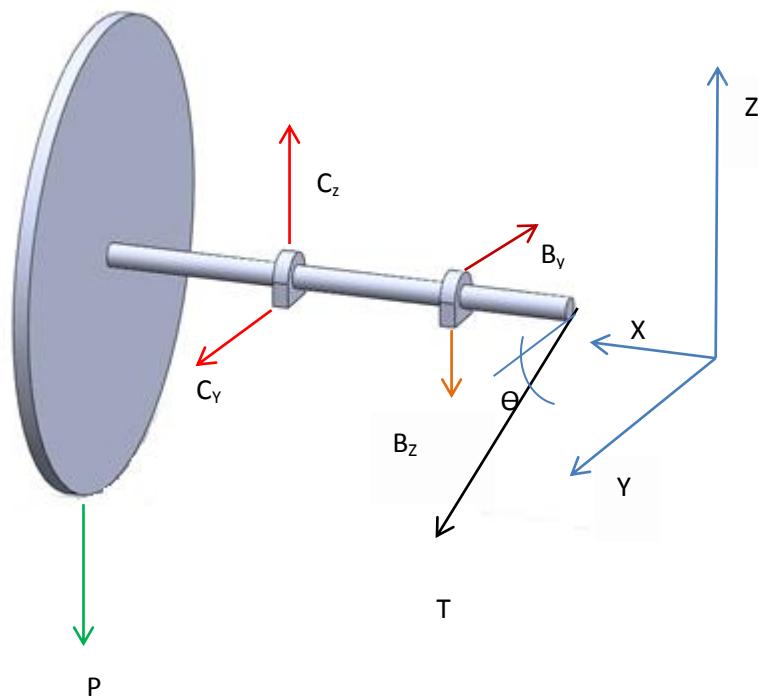
Pour ce faire, il faut faire le bilan des données : efforts appliqués à l'organe (arbre), le matériau, puis procéder au calcul. La démarche peut être résumée en ceci :



**Figure 25.** Démarche de calcul de vérification

### 5.2.2. CALCUL

La modélisation du solide et des actions mécaniques donne ce qui suit sur image :



**Figure 26.** Diagramme du corps libre (arbre + roue)

Les forces appliquées sur l'arbre sont :

Le poids de la roue  $P$ , les réactions des paliers aux points C et B, la tension des courroies. La composante suivant l'axe X des réactions est nulle puisque les roulements utilisés dans ce type de montage, sont des roulements à bille à contact radial.

$$\vec{P} = \{0, 0, -P\}$$

$$\vec{B} = \{0, -B_y, -B_z\}$$

$$\vec{C} = \{0, C_y, C_z\}$$

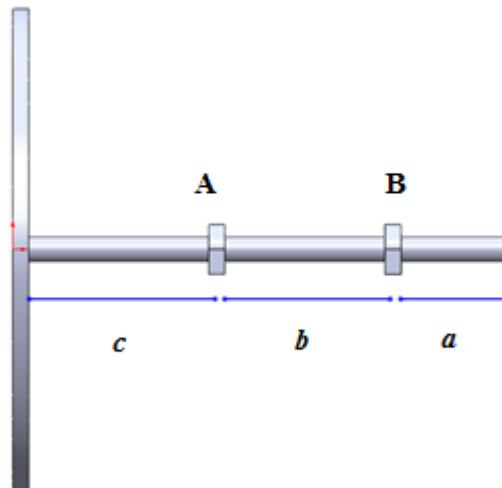
$$\vec{T} = \{0, T \cos \theta, -T \sin \theta\}$$

En appliquant le principe fondamental de la statique, et après projection sur les axes, on obtient :

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$

$$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 + -By + Cy + T\cos\theta & = 0 \\ -P & -Bz & Cz & -T\sin\theta & 0 \end{matrix}$$

La somme des moments par rapport au point B donne :



Moment du poids P en B :

$$\begin{matrix} b + c & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda & 0 = P(b + c) \\ 0 & -P & 0 \end{matrix}$$

Moment de la réaction C en B :

$$\begin{matrix} b & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda & Cy = -bCz \\ 0 & Cz & bCy \end{matrix}$$

Le moment de la tension des courroies en B :

$$\begin{matrix} -a & 0 & -RT\cos\theta \\ 0 & \Lambda & T\cos\theta = -aT\sin\theta \\ R & -T\sin\theta & -aT\cos\theta \end{matrix}$$

La somme des moments de ces forces en B est nulle :

$$\begin{array}{cccc}
 0 & 0 & -RT\cos\theta & 0 \\
 P(b+c) & + & -bCz & + \\
 0 & bCy & -aT\sin\theta & = 0 \\
 & & -aT\cos\theta & 0
 \end{array}$$

Apres résolution, on trouve que :

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -P.c/b \end{pmatrix}$$

$$\vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ P.(b+c)/b \end{pmatrix}$$

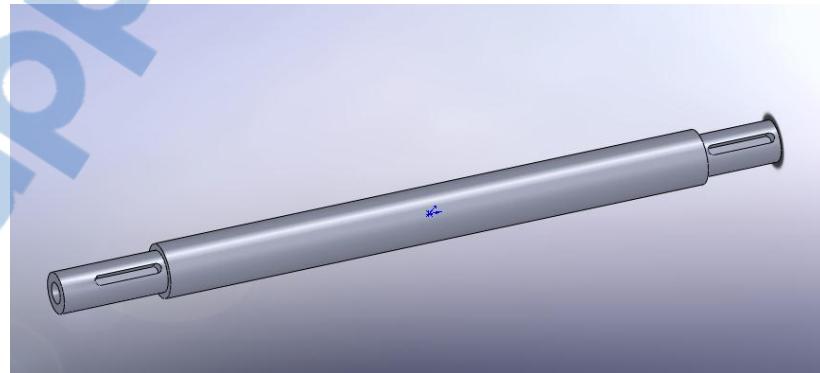
Le palier situé au point A supporte plus de force que celui situé en B et pour minimiser la contrainte en ce point il faut prendre :

$$b > c$$

Nous pouvons constater que cette condition est respectée sur l'adaptation de la solution. Les valeurs étant  $b = 300 \text{ mm}$  et  $c = 110 \text{ mm}$ , le rapport  $(b+c)/b$  donne 1,366 ; dans ce cas la réaction en fonction du poids de la roue, au point A vaut :

$$\vec{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1,366P \end{pmatrix}$$

Puisque l'arbre sera de la forme ci-dessous :



La présence des 2 rainures qui permettent le montage des poulies et l'alésage où sera fixée la roue induisent des concentrations de contrainte dont il faut tenir compte. La formule adéquate que fournit le code de l'ASME pour la conception d'un arbre de transmission de puissance est :

$$d \geq \left[ \frac{32 \cdot FS}{\pi \cdot Sy} \sqrt{\left( \frac{Sy}{Se} \cdot K_f \cdot M \right)^2 + \frac{3}{4} \cdot (T)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

FS : facteur de sécurité (1,27)

Sy : limite à l'écoulement du matériau

Se : limite d'endurance du matériau

K<sub>f</sub> : concentration de contrainte due à la présence des rainures dans l'arbre (1,6)

M : moment de flexion de la réaction C calculé au point où est fixée la roue.

T : le couple transmis par le moteur

Le matériau généralement utilisé pour la transmission de puissance en rotation est l'acier inoxydable ; pour notre conception, on a utilisé l'acier 42 CD 4. Cette désignation ressort de l'AFNOR, le 42 CD 4 est un acier allié au chrome et Molybdène en majeur partie, dans les proportions telles que :

Carbone (%) 0,39 – 0,45      Chrome (%) 0,9 – 1,2      Mo (%) 0,15 – 0,25

Cet acier est uniquement disponible à l'état traité dans une gamme de diamètres comprise entre Ø10 et Ø 200mm. Conforme aux nouvelles normes et aux recommandations de l'O.T.U.A. Son analyse, l'élaboration et son traitement ont été particulièrement ajustés et lui confère une excellente aptitude à l'usinage, des caractéristiques mécaniques, homogènes et assurées, répondant à plusieurs exigences.

Il est plus utilisé pour les pièces de transmission chargées : arbre, colonnes de presses, vérins, pignons de réducteurs de vitesses, couronnes dentées d'engins de levage, boulonnerie et tiges filetées pour l'industrie de pétrole.

Masse volumique	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	7853
Limite à l'écoulement	Sy (Mpa)	1350
Résistance maximale	S <sub>u</sub> (Mpa)	1410
Limite à l'endurance	Se (Mpa)	630

**Tableau 6.** Caractéristiques du matériau choisi

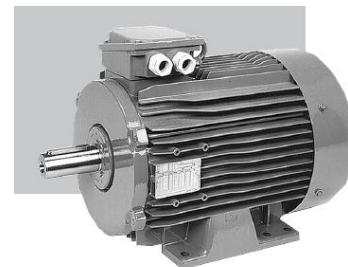
**Remarque :** nous n'avons pas pu démonter la roue pour pouvoir la peser et déduire son poids.

Dans le cas où on peut avoir accès à la mesure du poids, on peut effectuer l'application numérique avec :

$$T = 60 \times \text{puissance} / 2\pi N$$

$$| M | = | 110 \vec{t} \wedge \vec{C} |$$

110 mm est la distance de calcul du moment M.  
 N est la fréquence de rotation du moteur.  
 $\vec{C}$  est la réaction au premier palier.



**Figure 27.** Moteur asynchrone de l'aspirateur

### 5.2.3. CONCLUSION

Le diamètre minimal actuel est 42 mm, donc une fois le calcul fait, il faudra vérifier si la condition est respectée. Si non on procède comme indiqué sur la démarche du calcul de vérification et on reprend les calculs avec un nouveau matériau. Si oui, donc on peut passer à l'étape suivante qui est le choix du type de transmission développé au point suivant.

### 5.3. CHOIX DU TYPE DE TRANSMISSION

Pour le type de montage, nous disposons de plusieurs solutions possibles, à savoir :

- La transmission par chaîne
- La transmission par engrenage
- La transmission par courroie
- Placement d'accouplement intermédiaire, ...etc.

Nous avons retenu la transmission par courroie car c'est une option assez souple pour l'emploi de notre situation :

Elle donne une grande liberté pour positionner les organes moteur et récepteur.

C'est l'option la plus économique et présente une certaine élasticité, réduit et amortie les vibrations (en cas de blocage de la roue, cela donne une possibilité de patinage des courroies)

Elle augmente la durée de vie des machines.

	Transmission par engrenages	Transmission par roues et chaînes	Transmission poulies courroies			
			Courroies crantées	Courroies striées	Courroies trapèze	Courroies plates
Couples transmissibles	Très élevés	Elevés	Assez élevés	modérés	moyens	faibles
Puissances transmissibles	Très élevées	élevées	Assez élevées	modérées	élevées	faibles
Vitesses limites (m/s)	80 à 100	13 à 20	60	60 à 80	40	80 à 100
Rapport limite (ND/Nd) de la transmission	<1/8	<1/9	<1/10	<1/40	<1/15	<1/20
Position des arbres	Tous cas possibles	parallèles	parallèles	Parallèles et autres	Parallèles	parallèles et autres
Rendement(%)	≈98	≤97	≤98	≤98	70 à 96	≈98
Tension initiale	inutile	faible	faible	Assez élevée	Peu élevée	Elevée
Durée de vie	élevée	Assez élevée	limitée	limitée	limitée	limitée
Lubrification	nécessaire	nécessaire	inutile	inutile	inutile	Inutile
Inconvénients	-entraxe précis -lubrification	-bruyantes -lubrification	Synchronisme non parfait	Moins économique	Rendement	Faible couple
Avantages	Synchronisme Précision Grands couples Grandes puissances Position des arbres	Assez bon synchronisme Supportent des tensions élevées et des basses vitesses	Entretien réduit Vitesses angulaires constantes	Flexibilités Silencieuses Diamètres d'enroulement faibles	Economie Encombrement réduit permet le groupement en parallèle	Grandes vitesses rendement Silencieuses Rapport de transmissions

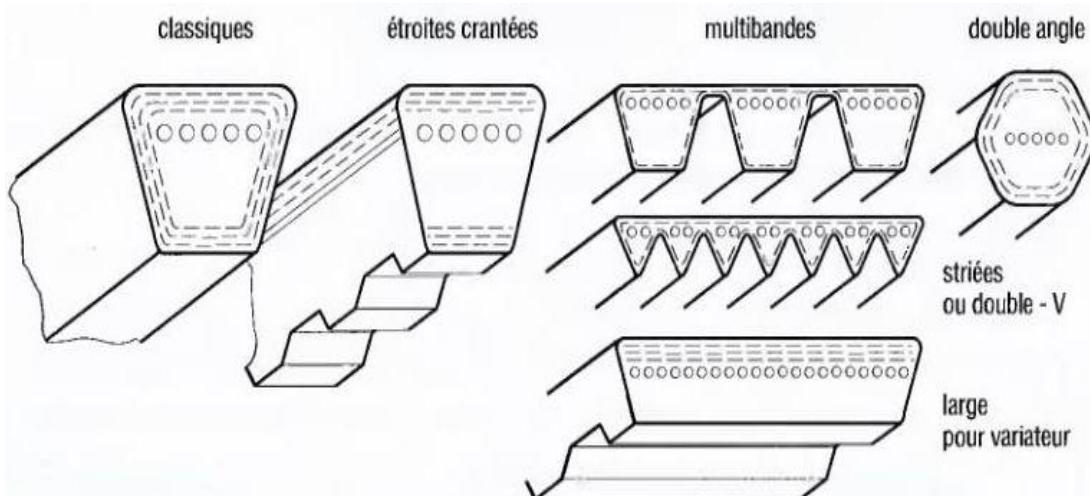
Tableau 7. Choix de courroie

Silencieuses, elles ont utilisées aux vitesses élevées avec de grands entraxes possibles entre poulies. La tension est indispensable pour garantir l'adhérence et assurer la transmission du mouvement. Un système à entraxe réglable ou un dispositif annexe de tension (galet enrouleur, etc.) est souvent nécessaire pour régler la tension initiale et compenser l'allongement des courroies au cours du temps. A l'exception des courroies crantées, en fonctionnement normal, il existe un léger glissement de la courroie sur les poulies amenant une imprécision du rapport de transmission ; celui-ci n'est pas exactement égal au rapport des diamètres des deux poulies.

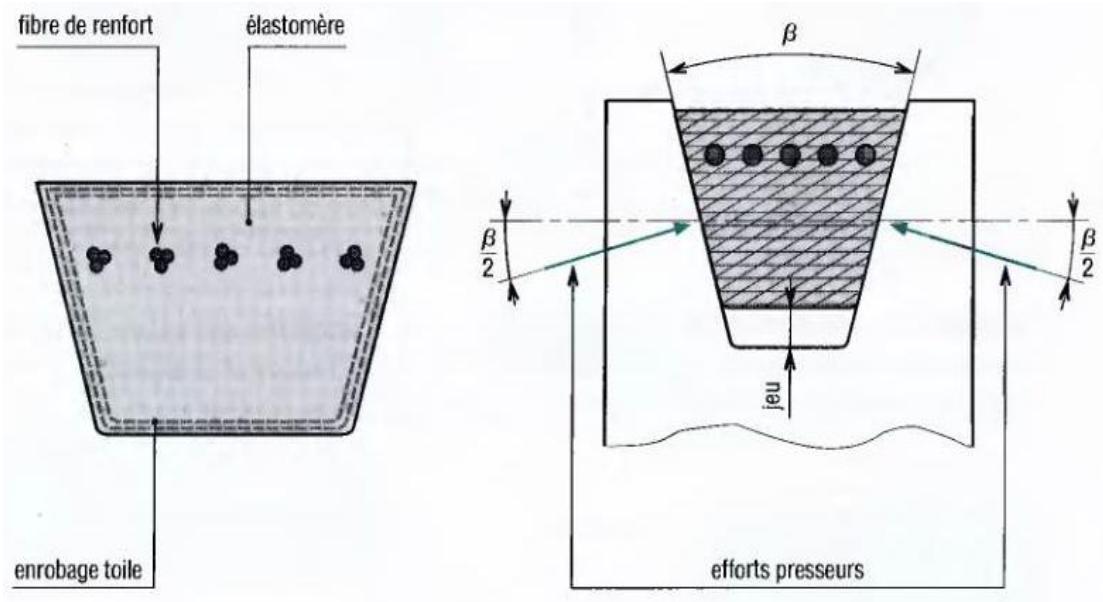
Les courroies trapézoïdales sont les plus utilisées ; à tension égale elles transmettent une puissance plus élevée que les courroies plates (conséquence de la forme en V augmentant la pression de contact et par là l'effort transmissible)

Si une puissance élevée doit être transmise on peut utiliser plusieurs courroies en parallèles sur la même poulie (1, 2, 3..., 10 gorges). Le montage nécessite un alignement des poulies et un réglage de l'entraxe pour le démontage et le remontage.

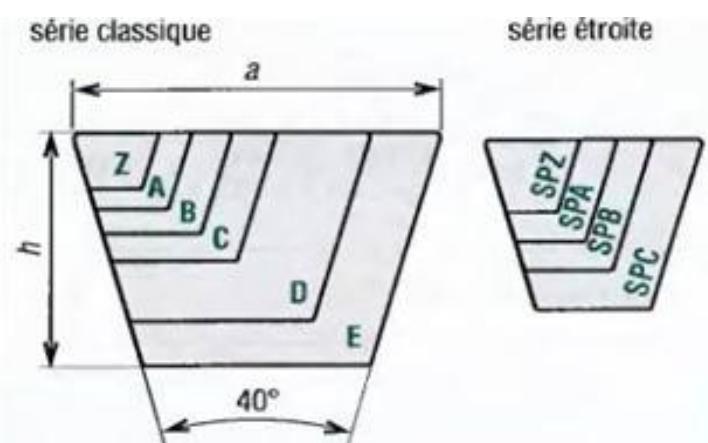
Pour obtenir de bons résultats et une bonne transmission, la courroie doit aller suffisamment vite (environ 20m/s). Les problèmes apparaissent au-dessus de 25m/s et dessous de sous de 5m/s (schématiquement 4000 tr/min est une bonne vitesse ; les problèmes au-dessus de 5000 tr/min et au-dessous de 1000 tr/min). Nous sommes à 2380 tr/min, donc le problème ne se pose pas et on peut choisir les courroies trapézoïdales.



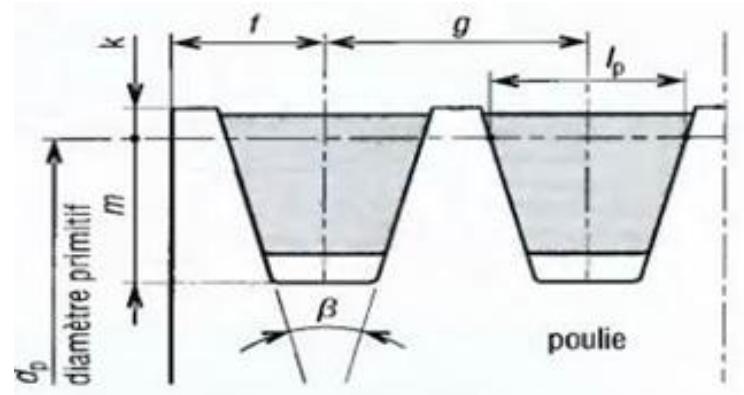
**Figure 28.** Principales familles de courroies trapézoïdales



**Figure 29.** Efforts presseurs sur une courroie trapézoïdale.



**Figure 30.** Séries classiques et étoiles.



**Figure 31.** Montage sur une poulie ( $\beta = 32^\circ, 34^\circ, 38^\circ$ ).

principales dimensions (en mm)	Principales dimensions trapézoïdales (ISO 4183)									
	série classique						série étroite			
	Z	A	B	C	D	E	SPZ	SPA	SPB	SPC
a	10	13	17	22	32	38	10	13	16	22
h	6	8	11	4	9	25	8	10	13	18
$l_p$	8,5	11	14	19	27	32	8,5	11	14	19
f	7	9	11,5	16	23	28	7	9	11,5	16
g	12	15	19	25,5	37	44,5	12	15	19	25,5
$k$ (mini)	2	2,75	3,5	4,8	8,1	9,6	2	2,75	3,5	4,8
$m$ (mini)	7	8,7	10,8	14,3	19,9	23,4	8,5	11	14	19
$d_p$ (usuel)	50 à 630	75 à 800	125 à 1 120	200 à 2 000	355 à 2 000	500 à 2 500	63 à 630	90 à 800	140 à 1 120	224 à 2 000

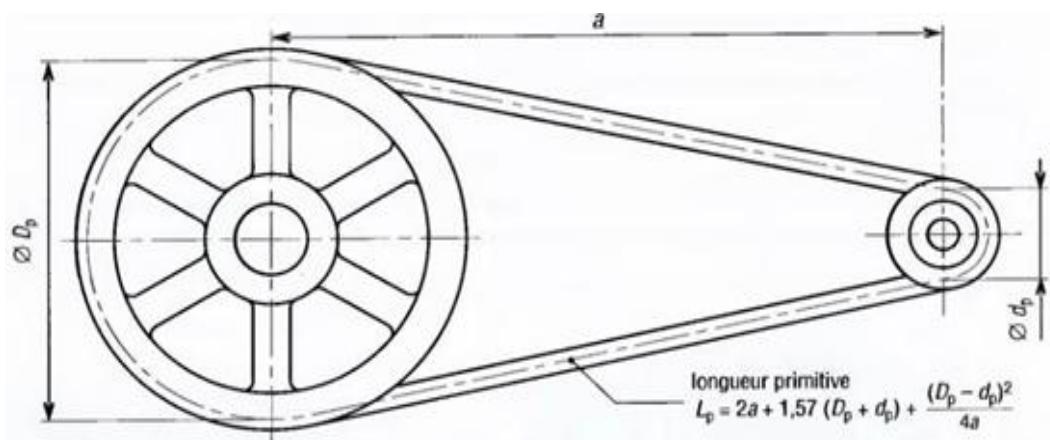
La série (SPZ, SPA, etc.) permet des transmissions plus compactes que la série classique (Z, A, B...); les courroies sont plus flexibles et le calcul identique. Un crantage intérieur augmente la flexibilité et la capacité à dissiper la chaleur aux hautes vitesses. Les courroies striées ont une action moins coinçant moins marquée et leur fonctionnement se rapproche plus de celui des courroies plates.

## ETUDE GENERALE

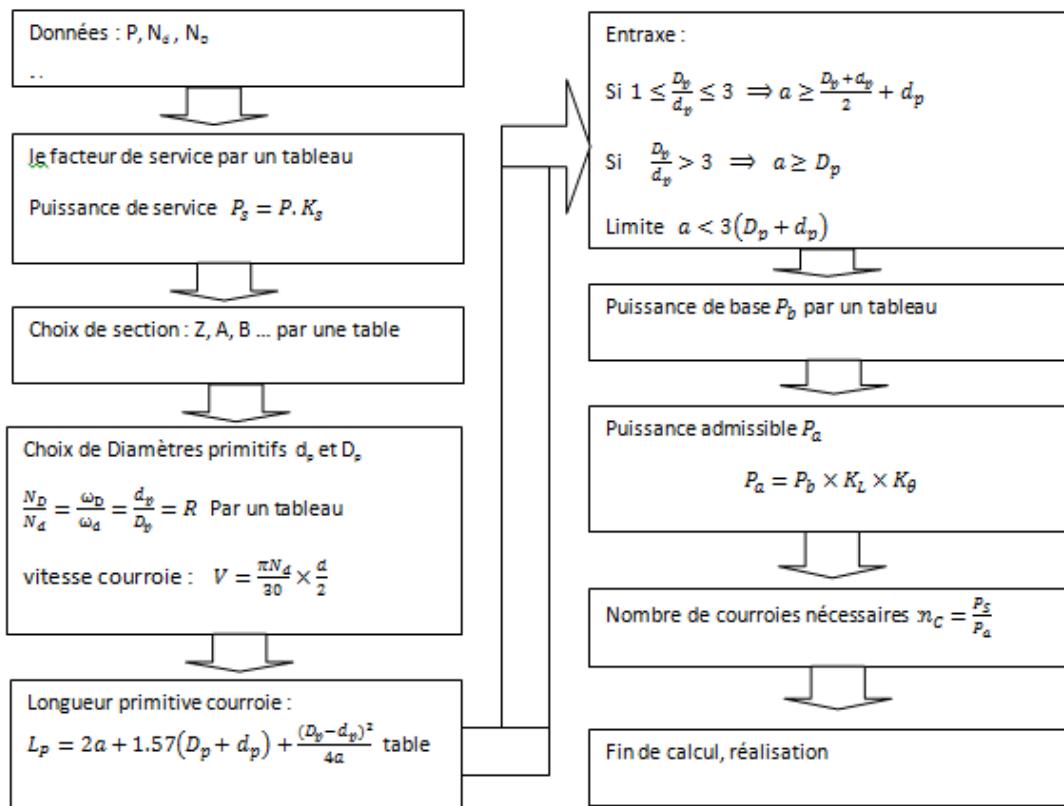
Elle est identique à celle des courroies plates sauf que  $d$  et  $D$  sont remplacés par  $d_p$  et  $D_p$ , diamètre primitifs des poulies, et que  $\beta$  intervient

$$\frac{T - F_c}{t - F_c} = e^{\frac{f \cdot \theta}{\sin \frac{\beta}{2}}} \quad \text{Avec } F_c = m \cdot V^2$$

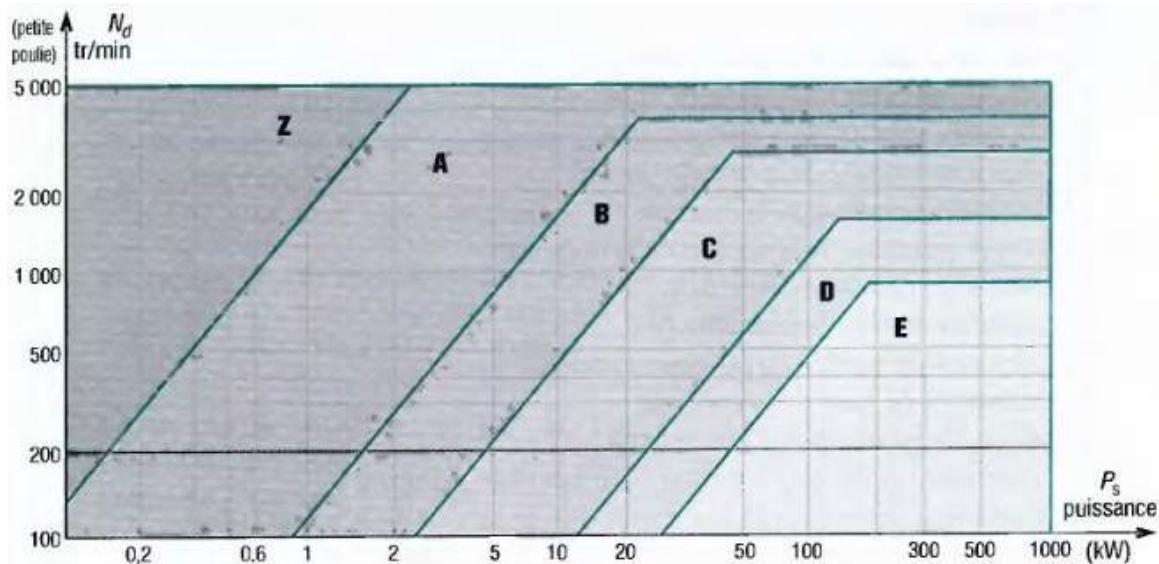
Indication :  $3 \leq T/t \leq$  et le plus souvent  $T \approx 5t$



### Calcul des courroies trapézoïdales



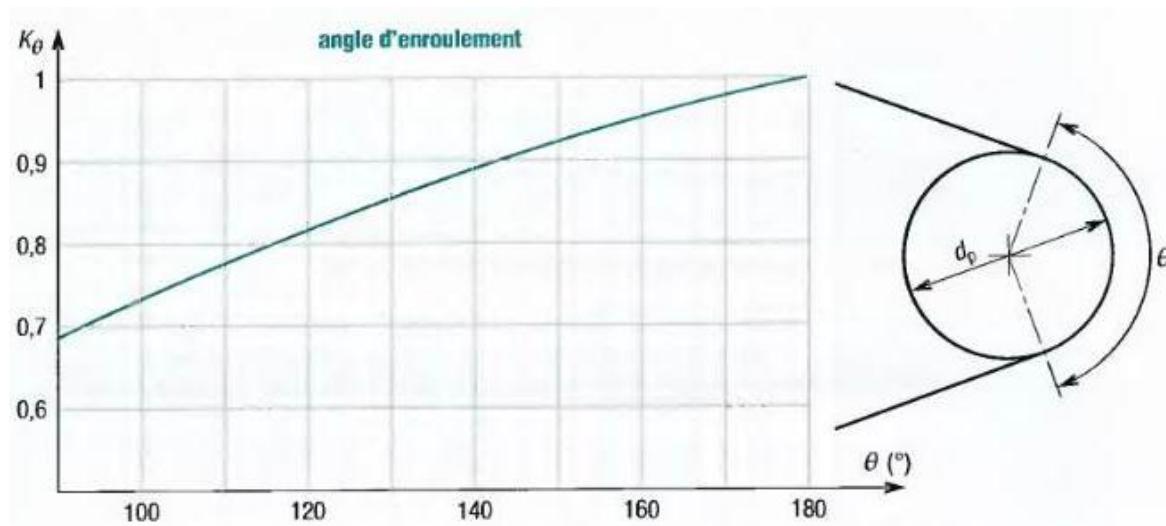
Le principe est résumé par l'organigramme de la figure 15



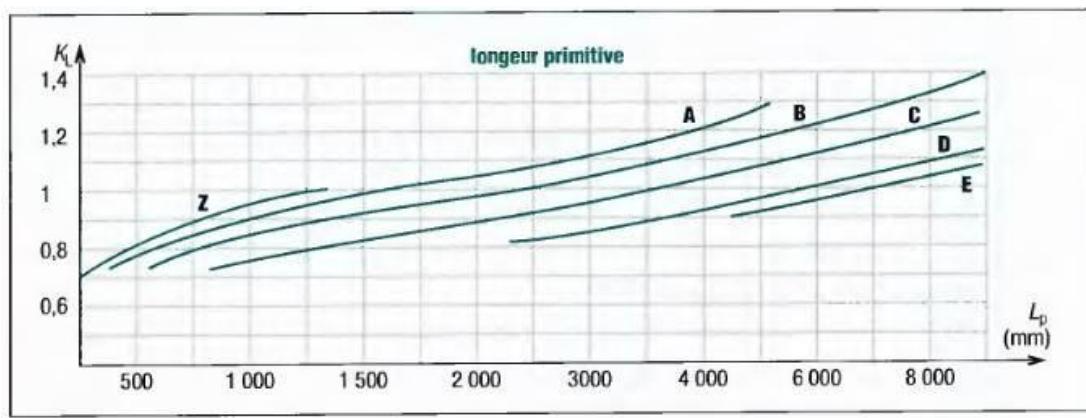
**Figure 32.** Graphe de gamme des puissances transmissibles par type de courroie

**Remarque :**

Plus le diamètre des poulies est grand, plus la durée de vie est grande. Les puissances de base ( $P_b$ ) indiquées tableau 4P 383, en tiennent compte et sont déterminées pour un angle d'enroulement de  $180^\circ$ . Le coefficient  $K_\theta$  permet de faire des corrections pour des angles d'enroulement différents.



Plus la longueur de la courroie est grande, plus la durée de vie est élevée (chaque tronçon de courroie travaillant mois) ; le coefficient  $K_L$  permet de faire les corrections



18. Graphe 3.

Données :

Nd : vitesse de la petite poulie (tr/min)

ND : vitesse de la grande poulie (tr/min)

dp : diamètre primitif de la petite poulie

Dp : diamètre primitif de la grande poulie

Lp : longueur primitive de la courroie

lp : largeur primitive de la section de la courroie

V : vitesse linéaire de la courroie (m /s)

P : puissance réelle à transmettre (w)

Ps : puissance de base de courroie

Pb : puissance admissible par la courroie

KL : coefficient correcteur de la longueur primitive

Ks : coefficient correcteur lié aux conditions de service de la transmission

Kθ : Coefficient correcteur fonction de l'angle d'enroulement  $\theta$

$\theta = \theta_d$  : Angle d'enroulement sur la petite poulie

1. Valeur du coefficient de service $K_s$				
	service léger 0 à 6 h/jour	service normal 6 à 16 h/jour	service dur 16 à 24 h/jour	service très dur en continu
transmission uniforme sans à-coups	1,0	1,2	1,4	1,6
transmission avec légers à-coups et chocs modérés	1,1	1,3	1,5	1,8
transmission avec à-coups et chocs élevés *	1,2	1,4	1,6	2,0

\* avec des inversions de sens, des démarriages fréquents sous forts couples

2. Diamètres primitifs $d_p$ et $D_p$ recommandés (mm) pour les poulies trapézoïdales	
<b>Z</b>	50, 53, 56, 60, 63, 67, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 150, 160, 180, 220, 224, 250
<b>A</b>	75, 80, 85, 90, 95, 100, 106, 112, 118, 121, 125, 132, 140, 150, 160, 180, 200, 224, 250, 280, 300, 315, 355, 400, 450, 500, 630
<b>B</b>	106, 112, 118, 125, 132, 140, 150, 160, 170, 180, 200, 224, 250, 280, 300, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1 000
<b>C</b>	180, 190, 200, 212, 224, 236, 250, 265, 280, 300, 315, 355, 375, 400, 450, 500, 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1 000, 1 250, 1 600
<b>D</b>	315, 335, 355, 375, 400, 425, 450, 475, 500, 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1 000, 1 120, 1 250, 1 400, 1 600, 1 800, 2 000
<b>E</b>	500, 530, 560, 600, 630, 670, 710, 800, 900, 1 000, 1 120, 1 250, 1 400, 1 500, 1 600, 1 800, 1 900, 2 000, 2 500

### 3. Extrait des longueurs primitives ( $L_p$ ) indicatives des courroies trapézoïdales (en mm)

(les longueurs indiquées peuvent varier sensiblement d'un fabricant à l'autre)

<b>Z</b>	270, 295, 340, 380, 435, 465, 485, 505, 545, 570, 610, 635, 675, 710, 750, 790, 840, 895, 940, 1 000, 1 055 1 095, 1 145, 1 205, 1 250, 1 325, 1 425, 1 540
<b>A</b>	415, 490, 541, 585, 620, 670, 719, 770, 820, 871, 933, 983, 1 049, 1 100, 1 153, 1 201, 1 253, 1 303, 1 353, 1 405, 1 455, 1 508, 1 558, 1 608, 1 709, 1 758, 1 858, 1 913, 2 013, 2 133, 2 273, 2 393, 2 533, 2 833, 3 183, 3 383, 3 583, 3 783...
<b>B</b>	613, 655, 680, 729, 780, 830, 881, 932, 980, 1 033, 1 083, 1 133, 1 185, 1 243, 1 318, 1 393, 1 465, 1 568, 1 668, 1 768, 1 872, 1 973, 2 075, 2 177, 2 283, 2 380, 2 481, 2 520, 2 659, 2 900, 3 193, 3 393, 3 593, 3 793, 4 043, 4 493, 5 043, 5 620, 6 105, 6 585, 7 250, 8 010, 9 150, 10 015, 11 000, 12 000
<b>C</b>	920, 1 075, 1 152, 1 312, 1 462, 1662, 1840, 2094, 2348, 2500, 2704, 2907, 3110, 3312, 3518, 3720, 3964, 4177, 4278, 4562, 5015, 5362, 5662, 6107, 6362, 6762, 7035, 7562, 8038, 8444, 9169, 10062, 10795
<b>D</b>	2576, 2876, 3226, 3530, 3734, 4098, 4386, 4648, 5029, 5335, 5676, 6016, 6370, 6776, 7176, 7576, 8000, 8405, 9166, 10076, 11276, 12215, 13375, 15260
<b>E</b>	4680, 5105, 5440, 5765, 6120, 6505, 6885, 7265, 7645, 8055, 8410, 8790, 9170, 10035, 11230, 12220, 13740, 15265



**4. Puissance de base  $P_b$  en kW des courroies trapézoïdales classiques**

type courroie	diamètre primitif	vitesse linéaire $V$ de la courroie (m/s)					type courroie	diamètre primitif	vitesse linéaire $V$ de la courroie (m/s)				
		5	10	15	20	25			5	10	15	20	25
Z	50	0,45	0,72	0,85	—	—	C	180	3,92	6,10	7,33	8,32	—
	60	0,62	1,05	1,35	—	—		210	4,59	7,38	9,40	10,86	11,76
	70	0,73	1,29	1,70	1,94	—		240	4,99	8,31	10,82	12,75	14,14
	80	0,83	1,48	1,97	2,30	2,41		280	5,50	9,27	12,26	14,70	16,50
	90	0,90	1,61	2,18	2,58	2,76		320	5,83	9,96	13,34	16,10	18,29
	100	0,95	1,72	2,37	2,80	3,04		360	6,14	10,56	14,16	17,19	19,69
	110	1,00	1,82	2,48	2,99	3,27		430	6,55	11,25	15,32	18,68	21,43
A	85	1,25	2,04	2,66	3,01	—	D	290	8,92	13,44	15,95	16,80	—
	100	1,42	2,37	3,12	3,99	4,10		320	9,84	15,41	18,90	20,74	20,92
	115	1,55	2,64	3,52	4,21	4,73		360	10,94	17,50	22,07	24,96	26,19
	130	1,65	2,85	4,04	4,60	5,22		400	11,80	19,20	24,61	28,33	30,42
	150	1,75	3,03	4,10	4,80	5,72		460	12,78	21,18	27,55	32,29	34,37
	170	1,82	3,19	4,33	5,00	6,10		520	13,58	22,71	29,85	35,35	39,20
	190	1,87	3,30	4,54	5,55	6,39		580	14,16	23,96	31,64	37,76	42,80
B	120	2,11	3,23	4,23	4,80	—	E	440	10,97	18,85	24,69	28,33	29,44
	140	2,35	3,95	5,02	5,83	6,37		480	11,89	20,65	27,39	31,92	33,91
	160	2,57	4,03	5,61	6,63	7,37		520	12,62	22,15	29,63	34,95	37,68
	180	2,72	4,39	6,09	7,24	8,14		600	13,84	24,57	33,28	39,86	43,75
	200	2,81	4,81	6,42	7,71	8,75		700	14,94	27,26	36,66	44,28	49,35
	220	2,92	4,89	6,73	8,13	9,24		800	15,77	28,50	39,18	47,60	53,56
	250	3,01	5,06	6,89	8,64	8,85		950	16,82	30,40	42,00	51,40	59,13

Les puissances  $P_0$  indiquées sont des moyennes et peuvent varier sensiblement d'un fabricant à l'autre  
(consulter leurs catalogues pour des renseignements plus détaillés)

### Hypothèse :

Soit à déterminer les courroies transmettant une puissance de 18.4kw, entre une machine motrice (Nd 2960 tr/min) et une machine réceptrice (2380 tr/min) travaillant de 6 à 15h/j

### Résolution

Pour cette installation on adopte un  $K_s$  de 1,3

$$P_s = P \cdot K_s = 18.4 \times 1.3 = 23.92 \approx 24 \text{ KW}$$

Le graphe 1 (fig. 16) permet de sélectionner les courroies de types B.

Diamètres primitifs

On impose  $d_p = 140 \text{ mm}$

$$\frac{N_D}{N_d} = \frac{d_p}{D_p} = \frac{2380}{2960} = 0.8 \Rightarrow D_p = \frac{d_p}{0.8} = 175 \text{ mm}$$

Vitesse linéaire de la courroie

$$V = \frac{\pi N_d}{30} \times \frac{d}{2} = \frac{\pi \times 2980}{30} \times \frac{140}{2} = 21697 \approx 21 \text{ m/s}$$

Entraxe a

$$\text{Avec } \frac{D_p}{d_p} = \frac{175}{140} = 1.25 \text{ on prend :}$$

$$a \geq \frac{1}{2} (D_p + d_p) + d_p \Rightarrow \frac{1}{2} (175 + 140) + 140 = 297.5 \text{ mm} = a_{\min}$$

Limite supérieure :

$$a < 3(D_p + d_p) \Rightarrow 3(175 + 140) = 945 = a_{\max}$$

Pour des raisons d'encombrement et compte tenu du tableau 3, on retient  $a = 600 \text{ mm}$

Longueur primitive courroie :

$$L_p = 2a + 1.57(D_p + d_p) + \frac{(D_p - d_p)^2}{4a} \\ = 2 \times 600 + 1.57(175 + 140) + (175 - 140)^2 / (4 \times 437) = 1738.5 \text{ mm}$$

Puissance de base de la courroie (tableau, avec  $d_p = 140 \text{ mm}$   $V = 21 \text{ m/s}$ ) :

$$P_b = 4.16 \text{ KW} \text{ (Obtenue par interpolation entre 6.37 et 5.83)}$$

Puissance admissible de la courroie choisie :  $P_a = P_b \cdot K_L \cdot K_\theta$

$$K_L \approx 0.95 \text{ (graphe 2 avec } L_p = 1738.5 \text{)} \quad ; \quad K_\theta \approx 0.97 \text{ (graphe 3 avec } \theta = 176^\circ \text{)}$$

$$\theta = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[ \frac{D_p - d_p}{2a} \right] \Rightarrow 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[ \frac{175 - 140}{2 \times 600} \right] = 176^\circ$$

$$P_a = 5.938 \times 0.97 \times 0.95 = 5.47 \text{ KW}$$

Nombre de courroie :  $n_c = 24 / 3.64 = 4.38$  soit 4 courroies...

# CONCLUSION

Après plusieurs mois de travail, de recherche, d'analyse et d'amélioration, certains objectifs ont été atteints et d'autres sont en cours de réalisation.

Le changement du type de montage direct en un montage indirect a permis de minimiser les vibrations :

- Guidage en rotation de l'arbre par paliers à roulement, qui permet un bon équilibrage de la roue de la pompe.
- Transmission par courroie, qui permet d'absorber la vibration et permet le patinage en cas de blocage de la roue.

Nous avons créé un circuit ouvert dans le système de refroidissement, ce qui a permis d'éliminer l'étranglement de l'air à l'intérieur de la zone de refroidissement et minimiser les pertes de granulé :

- Un picage (échappement) au niveau supérieur de la zone de refroidissement, avec filtre à l'autre extrémité pour retenir les déchets.

Nous avons calculé le temps de séjour du granulé et nous avons adapté un clapet pour contrôler le débit à l'évacuation à fin de maintenir la fluidisation du lit et permettre au granulé de respecter le temps de séjour.

Les contraintes liées aux réalités du terrain (manque d'appareils de mesure de pression et de logiciel requis pour la mécanique des fluides, temps imparti) ont été pour nous un réel handicap ; malgré cela nous considérons que les objectifs fixés ont été atteints.

Ce stage constitue une expérience précieuse pour nous, car il nous a permis de faire un travail d'ingénierie complet. Nous avons pu en effet parcourir toutes les différentes étapes d'un projet concret et passionnant allant de la conception à la fabrication d'un produit répondant aux besoins réels qui nous préparent à notre future vie d'ingénieur.

---

## BIBLIOGRAPHIE

### OUVRAGES

- **Hatto Schneider** : technique d'équilibrage 2000
- **Giles** : Mécanique des fluides et hydraulique (série Schaum) BUP 814 (mai 1999)
- **E. Guyon, J.P. Hulin et L. Petit** (1991): Hydrodynamique physique, Savoirs Actuels
- **Landau** : Mécanique des fluides C 530.1 C 934
- **Fleury Mathieu** : Mécanique physique p.360 à 388
- **Prof. H. HOFMANN** Laboratoire de Technologie des Poudres ; Phénomènes de transfert de chaleur et de masse
- **Bruno Cheron**, Edition Ellipses : Transferts Thermiques
- **Alain Boulanger et Christian Pachaud** (2009): technique de surveillance des machines par analyse de vibrations

### REFERENCES INTERNET

- [1] <http://www-sph.cea.fr>
- [2] <http://www.barr-rosin.com>
- [3] <http://www.techniques-ingenieur.fr>
- [4] <http://www.airvision.be>
- [5] <http://www.google.com>

## ANNEXES

Les images du refroidisseur modifié :

