

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux (MRIE)

Filière : QHSE-GRI

Entreprise : Méditerranéan Float Glass

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
QHSE-GRI

Maîtrise des risques liés à l'amélioration du procédé de fabrication du verre plat au niveau de MFG

GUETTARI Nardjes

HAFNAOUI Mounya

Sous la direction de

Mr. M. BOUSBAI et Mr. F. LEGUEBEDJ

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2018

Composition du Jury :

| | | |
|------------|-----------------------|------------------------------|
| Président | M. Abdelmalek CHERGUI | Professeur, ENP |
| Promoteurs | M. M'hamed BOUSBAI | Maître de Conférences B, ENP |
| | M. Farid LEGUEBEDJ | Maître Assistant A, ENP |
| | M. Khalef BENMADJBAR | Responsable QHSE, MFG |
| Examineur | M. Mohamed BOUBAKEUR | Maître Assistant A, ENP |

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux (MRIE)

Filière : QHSE-GRI

Entreprise : Méditerranéan Float Glass

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
QHSE-GRI

Maîtrise des risques liés à l'amélioration du procédé de fabrication du verre plat au niveau de MFG

GUETTARI Nardjes

HAFNAOUI Mounya

Sous la direction de

Mr. M. BOUSBAI et Mr. F. LEGUEBEDJ

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2018

Composition du Jury :

| | | |
|------------|-----------------------|------------------------------|
| Président | M. Abdelmalek CHERGUI | Professeur, ENP |
| Promoteurs | M. M'hamed BOUSBAI | Maître de Conférences B, ENP |
| | M. Farid LEGUEBEDJ | Maître Assistant A, ENP |
| | M. Khalef BENMADJBAR | Responsable QHSE, MFG |
| Examineur | M. Mohamed BOUBAKEUR | Maître Assistant A, ENP |

ENP 2018

Dédicaces

À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir à toi mon père ;

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, maman que j'adore ;

À mes très chères frères « Ahmed », « Oussama » ;

À mes très chères sœurs « Amel », « Manel », « Ines » ;

À ma très chère tante « Saida » ;

À mes grands-parents ;

À ma très chère binôme « Mounia ».

NARDJES

Dédicaces

À celui qui a toujours garni mon chemin avec amour, force et lumière

” To the kindest person ever ”

“ Mon père ”

À la perle la plus précieuse du monde,

À la personne qui a sacrifié tout pour que je puisse être ici,

“ Ma mère ”

À ma source de joie et de soutien,

“ Mes sœurs et mes frères ”

À ma chère binôme « Nardjes » que je remercie pour son soutien plus que précieux, pour sa patience et toutes ses qualités seraient trop longues à énumérer.

Mounia

Remerciements

Nous voulons adresser nos premiers remerciements à nos encadreurs, Monsieur M. BOUSBAI et Monsieur F. LEGUEBEDJ pour leurs disponibilités et leurs suivis tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Tous nos remerciements vont à Monsieur K. BENMADJBAR, responsable HSE à MFG, pour son accompagnement durant la période que nous avons passé dans l'entreprise pour réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier aussi toute l'équipe pédagogique de notre département MRIE qui nous a donné de la force pour réussir les trois années de notre formation.

Toute notre gratitude à Monsieur CHERGUI et à Monsieur M. BOUBAKEUR enseignants au département MRIE, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

A notre exemple, notre source d'inspiration, à Madame A. AMRI, nous vous remercions pour tous que vous avez fait pour nous. Merci infiniment.

À Monsieur M. BOUBAKEUR et Monsieur M. OUADJAOUT, enseignants au département MRIE, nous rendons grâce de ce que vous avez fait pour nous durant notre travail. Merci infiniment.

Nous remercions également tous les employés de l'entreprise MFG et en particulier les responsables du four et de bain d'étain de la première ligne pour nous avoir fourni tous les informations nécessaires à notre travail.

Et finalement nous tenons à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin pour que ce travail voit la lumière du jour.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو ضمان جودة الزجاج من خلال اقتراح مجفف دوار لتقليل نسبة الرطوبة في الرمل و إستعادة الطاقة الحرارية المخزنة في الدخان و بالطبع سلامة العنصر الأكثر أهمية في خط الإنتاج الذي هو فرن الإنصهار. سيكون تركيزنا في هذه الأطروحة على جزأين أساسيين ,الأول يخص القيام بحسابات تخص تصميم مجفف دوار و تقدير تكلفته و الثاني سيركز على تطبيق طرق كمية لتحليل المخاطر في فرن الإنصهار, لمعرفة ما هو الحدث الأكثر خطورة و اقتراح الحل المناسب بعد تطبيق هذه الطرق توصلنا إلي أن انهيار جدار الفرن هو الحدث الأكثر جدية و بالتالي فان الحل الذي اعتبرناه الأنسب بسبب نوع بناء الفرن هو وحدة تنظيم متكونة من جهاز تحكم PI.

الكلمات المفتاحية : فرن الإنصهار, المجفف الدوار, الطاقة الحرارية, تحليل المخاطر, الانهيار, الضبط.

Abstract

The main objective of our work is to ensure the quality of glass by proposing a rotary dryer to reduce the moisture content of the sand by recovering the thermal energy stored in the smokes and of course the safety of the element the most critical in the production line which is the melting furnace.

Our thesis will focus on two essential parts, one is about the design of rotary dryer and its cost estimation, the other will be about risk assessment in the melting furnace by applying quantitative methods of risk analysis; to know what is the most critical dreaded event in order to propose the appropriate solution.

After the risk assessment that we made, we reach to a conclusion that the collapse of the furnace wall is the most critical event so the solution that we judged the most adequate based on the type of construction of the furnace is a dispatching system with a PI controller.

Key-words: melting furnace, rotary dryer, thermal energy, collapse, risk assessment, dispatching system.

Résumé

L'objectif principal de notre travail est d'assurer la qualité du verre en proposant un séchoir rotatif pour diminuer le taux d'humidité du sable en récupérant l'énergie thermique emmagasinée dans les fumées et bien sûr d'assurer la sécurité de l'élément le plus critique dans la ligne de production qui est le four de fusion.

Notre mémoire va se porter sur deux parties essentielles, l'une sur le dimensionnement du séchoir rotatif et son estimation de coût et l'autre sur l'analyse des risques au niveau du four de fusion en appliquant des méthodes quantitatives d'analyse des risques pour savoir quel est l'évènement le plus critique afin de proposer par la suite une solution adéquate.

Après l'application de ces méthodes, nous avons abouti à « l'effondrement du mur du four » comme étant l'évènement le plus critique et donc la solution que nous avons jugé la plus adéquate à cause de type de construction du four est un système de régulation avec un contrôleur PI.

Mots-clés : four de fusion, séchoir rotatif, énergie thermique, effondrement, analyse de risques, régulation.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 17 |
| Chapitre 1 : Contexte général de l'étude | 20 |
| 1.1 Contexte général | 20 |
| 1.2 Présentation de l'entreprise | 20 |
| 1.2.1 Analyse de marchés Algérien du verre plat | 20 |
| 1.2.2 Description générale de MFG | 21 |
| 1.3 Problématique | 23 |
| 1.4 Méthodologie | 24 |
| Chapitre 2 : Généralités sur le verre et le séchage | 28 |
| 2.1 Généralités sur le verre | 28 |
| 2.1.1 Définitions du verre | 28 |
| 2.1.2 Composition du verre | 29 |
| 2.1.3 Différents types de verre industriel | 30 |
| 2.1.4 Définition du verre float | 30 |
| 2.1.5 Étapes de fabrication | 31 |
| 2.2 Généralités sur les fours verriers | 35 |
| 2.2.1 Fours à flammes | 35 |
| 2.2.2 Fours électriques | 37 |
| 2.3 Briques réfractaires | 38 |
| 2.3.1 Les familles des réfractaires | 38 |

| | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.2 | Les briques AZS | 39 |
| 2.4 | Phénomène de séchage | 40 |
| 2.4.1 | Définition | 40 |
| 2.4.2 | Interets | 40 |
| 2.4.3 | Principe du séchage | 41 |
| 2.5 | Différents types des séchoirs rotatifs | 42 |
| 2.5.1 | Séchoirs continus | 42 |
| 2.5.2 | Séchoirs statiques | 42 |
| Chapitre 3 : Etude bibliographique sur les outils d'analyse des risques | | 46 |
| 3.1 | Notions de risque et de danger | 47 |
| 3.1.1 | Définitions | 47 |
| 3.2 | Gestion de risque | 48 |
| 3.2.1 | Etablissement du contexte de l'organisation | 49 |
| 3.2.2 | Appréciation des risques | 50 |
| 3.2.3 | Traitement des risques | 51 |
| 3.3 | Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités (AMDEC) | 51 |
| 3.3.1 | Objectifs | 51 |
| 3.3.2 | Déroulement | 52 |
| 3.3.3 | Avantages et limites | 52 |
| 3.4 | HAZard OPerability (HAZOP) | 53 |
| 3.4.1 | Mise en œuvre de la méthode | 53 |
| 3.4.2 | Déroulement de la méthode HAZOP | 53 |
| 3.5 | Arbre de défaillances (AdD) | 55 |
| 3.5.1 | Mise en oeuvre de la méthode | 55 |
| 3.6 | Arbre d'évènements (AdE) | 57 |
| 3.6.1 | Principe | 57 |

| | | |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6.2 | Déroulement | 57 |
| Chapitre 4 : Le système étudié | | 59 |
| 4.1 | Présentation de la ligne Float.1..... | 59 |
| 4.1.1 | Atelier de composition | 59 |
| 4.1.2 | Four de fusion..... | 60 |
| 4.1.3 | Bain d'étain | 64 |
| 4.1.4 | Etenderie..... | 64 |
| 4.1.5 | La découpe | 64 |
| 4.2 | Choix du système étudié..... | 65 |
| 4.3 | Dimensionnement du séchoir rotatif proposé..... | 65 |
| 4.3.1 | Bilan énergétique..... | 66 |
| 4.3.2 | Calcul des débits..... | 68 |
| 4.3.3 | Dimensions de séchoir rotatif..... | 70 |
| 4.3.4 | Dimensionnement du mécanisme d'entraînement | 76 |
| 4.3.5 | Estimation de coût..... | 90 |
| 4.4 | Analyse fonctionnelle | 91 |
| Chapitre 5 : Application des méthodes d'analyse des risques | | 95 |
| 5.1 | Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leur criticités (AMDEC) | 95 |
| 5.2 | HAZard OPerability (HAZOP) | 100 |
| 5.3 | Arbre des défaillances (AdD)..... | 103 |
| 5.4 | Arbre des événements (ADE)..... | 110 |
| Chapitre 6 : Mesures de réduction des risque | | 116 |
| 6.1 | Système de régulation..... | 116 |
| 6.2 | Choix du type de régulateur..... | 117 |
| 6.3 | Interprétation des résultats..... | 122 |
| CONCLUSION GENERALE | | 128 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 130 |
| Annexes | 133 |
| Annexe 1 : Chambre de régénération..... | 134 |
| Annexe 2 : Coefficient du frottement..... | 134 |
| Annexe 3 : Principales dimensions des courroies trapézoïdales. | 135 |
| Annexe 4: Facteur de conversion Δ pour les courroies classiques..... | 136 |
| Annexe 5 : Longueur normalisé et le coefficient K_L pour les courroies classiques..... | 137 |
| Annexe 6 : Valeur du coefficient de service en fonction de type de transmission et le temps de service..... | 138 |
| Annexe 7 : Décomposition fonctionnelle par la méthode SADT..... | 139 |
| Annexe 8 : Tableau AMDEC..... | 143 |
| Annexe 9: Tableau HAZOP..... | 156 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1- 1: Localisation géographique de MFG (Google Map). | 22 |
| Figure 1- 2: Démarche suivie pour résoudre le problème posé..... | 26 |
| Figure 2- 1: Procédé float. | 32 |
| Figure 2- 2: Four float à flamme transversal. | 33 |
| Figure 2- 3: Top-rollers. | 34 |
| Figure 2- 4: Présentation schématique d'un four régénérateur, flammes, en boucle..... | 36 |
| Figure 2- 5: Représentation schématique d'un four de fabrication du verre Float. | 37 |
| Figure 2- 6: Four électrique à voûte froide | 38 |
| Figure 2- 7: Sécheur à tambour rotatif. | 43 |
| Figure 3- 1: Démarche de management des risques selon la norme ISO 31000..... | 49 |
| Figure 3- 2 : Processus d'identification des risques. | 50 |
| Figure 3- 3: Déroulement de la méthode HAZOP. | 53 |
| Figure 3- 4: Exemple de tableau HAZOP. | 54 |
| Figure 3- 5: Le déroulement de la méthode AdE. | 57 |
| Figure 4- 1: Les différentes zones de four..... | 60 |
| Figure 4- 2: Four à flammes transversales. | 61 |
| Figure 4- 3: Brique d'empilage du four MFG. | 62 |
| Figure 4- 4: Schémas présentant les sept malaxeurs..... | 63 |
| Figure 4- 5: Flux entrant et sortant du séchoir rotatif..... | 66 |
| Figure 4- 6: Valeurs d'humidité du sable à l'entrée et à la sortie du séchoir. | 68 |
| Figure 4- 7: Configuration des efforts sur le système. | 78 |
| Figure 4- 8: Paramètres d'un système de transmission par courroie. | 82 |
| Figure 4- 9 : Coefficient de correction k_{θ} appliqué à l'angle d'enroulement. | 87 |
| Figure 4- 10: Facteur de correction k_L appliqué à la longueur primitive..... | 87 |
| Figure 4- 11: Modèle de diagramme. | 91 |
| Figure 4- 12: Diagramme SADT..... | 92 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 5- 1: Proportion des niveaux de criticité des modes de défaillances. | 97 |
| Figure 5- 2 : Répartition des effets dans chaque sous-système. | 99 |
| Figure 5- 3: Représentation de nœud utilisé dans la méthode HAZOP. | 101 |
| Figure 5- 4 : Arbre de défaillances de chute de température dans le four. | 104 |
| Figure 5- 5: Arbre de défaillances de surpression dans le four. | 105 |
| Figure 5- 6 : Arbre des événements de la surpression. | 111 |
| Figure 5- 7: Arbre des événements de la chute de température | 111 |
| | |
| Figure 6- 1 : Schéma représentant le système de régulation. | 119 |
| Figure 6- 2: Schéma de simulation par SIMULINK. | 120 |
| Figure 6- 3: Représentation du block PI de la boucle précédente. | 121 |
| Figure 6- 4 : Graphe représentatif de consigne. | 121 |
| Figure 6- 5: Réponse du système. | 122 |
| Figure 6- 6 : Schéma représentant une boucle avec un signal d'entrée sinusoïdal. | 122 |
| Figure 6- 7: Paramètres à entrer pour voir la réponse du système au signal sinusoïdal. | 123 |
| Figure 6- 8: La réponse du système au signal sinusoïdal avec une fréquence 0.25 rad/sec. | 123 |
| Figure 6- 9 : La réponse du système au signal sinusoïdal avec une fréquence 0.1 rad/sec. | 124 |
| Figure 6- 10 : Schéma représentant une boucle avec un signal d'entrée carré, avec un pulse generator. | 124 |
| Figure 6- 11 : Paramètres à entrer pour voir la réponse du système au signal carré. | 125 |
| Figure 6- 12 : La réponse du système au signal carré. | 125 |
| Figure 6- 13 : Paramètres à entrer pour voir la réponse du système au 63% de la consigne. | 126 |
| Figure 6- 14: La réponse du système au 63% de la consigne. | 127 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 1- 1: Spécifications de l'entreprise MFG..... | 21 |
| Tableau 1- 2: Caractéristiques de chaque type du verre à MFG..... | 23 |
| Tableau 2- 1: Composition du verre..... | 29 |
| Tableau 2- 2: Types de briques réfractaires pour chaque zone de four. | 39 |
| Tableau 2- 3: Types des sécheurs continus industriels. | 42 |
| Tableau 2- 4: Types des sécheurs statiques industriels..... | 42 |
| Tableau 3- 1: Exemple d'un tableau AMDEC. | 52 |
| Tableau 3- 2: Symboles représentant les différents évènements dans l'AdD. | 56 |
| Tableau 3- 3: Symboles représentant les deux portes logiques utilisées dans l'AdD..... | 56 |
| Tableau 4- 1: Caractéristique du moteur monophasé choisie. | 81 |
| Tableau 4- 2 : Dimensionnement des courroies trapézoïdales classiques et SI classiques..... | 84 |
| Tableau 4- 3: Constantes utilisées pour calculer la puissance brute des courroies..... | 85 |
| Tableau 4- 4: Facteur appliqué de correction en fonction du rapport de transmission. | 86 |
| Tableau 4- 5: Caractéristiques techniques de la courroie d'entraînement entre le réducteur/cylindre..... | 90 |
| Tableau 4- 6: Le coût estimé du cylindre rotatif..... | 90 |
| Tableau 5- 1: Echelle de gravité..... | 96 |
| Tableau 5- 2: Echelle de probabilité. | 96 |
| Tableau 5- 3: Echelle de détection. | 96 |
| Tableau 5- 4: Grille de criticité AMDEC..... | 97 |
| Tableau 5- 5 : Pourcentage d'apparition de chaque effet dans chaque sous-système..... | 98 |
| Tableau 5- 6 : Eléments composant le bassin de fusion..... | 100 |
| Tableau 5- 7: Causes de chaque évènement redouté pour chaque composant..... | 102 |
| Tableau 5- 8: Probabilités des évènements de base de la chute de température..... | 106 |
| Tableau 5- 9: Probabilités des évènements de base de la surpression. | 108 |

Tableau 5- 10: Probabilité de défaillance des équipements de sécurité (surpression). 112

Tableau 5- 11: Probabilité de défaillance des équipements de sécurité (chute de température). 112

Tableau 5- 12 : Niveaux des taux d'occurrences. 113

NOMENCLATURE

| | |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| \dot{m}_s | Débit de sable. |
| $\dot{m}_{ee}, \dot{m}_{es}$ | Débits d'eau d'entrée et de sortie |
| \dot{m}_a | Débit d'air |
| \dot{m}_v | Débit de vapeur |
| T_{se}, T_{ss} | Température entrée, sortie du sable. |
| T_{ae}, T_{as} | Température entrée, sortie d'air. |
| T_{ee}, T_{es} | Température entrée, sortie d'eau. |
| T_v | Température de vapeur. |
| C_{ps} | Capacité thermique massique de sable |
| C_{pa} | Capacité thermique massique d'air |
| C_{pe} | Capacité thermique massique d'eau |
| C_{pv} | Capacité thermique massique de vapeur |
| G | Débit spécifique |
| Q_G | Quantité de chaleur cédée par le gaz de séchage par unité de temps |
| V_T | Volume d'un tube sécheur |
| D | Diamètre |
| L | Longueur du cylindre rotatif du séchoir. |
| ΔT_m | Écart moyen de température entre le gaz de séchage (air) et le produit |
| \bar{U} | Coefficient d'échange volumique |
| T | Temps de séjour |
| U_p | Vitesse périphérique |
| B | Constante dépendant de la granulométrie |
| N | Vitesse de rotation |
| F | Débit spécifique de produit entrant dans le sécheur |
| C_r | Couple résistant |
| P_n | Puissance nominal |
| I_n | Intensité nominale |
| P'_r | Puissance nette |
| L_p | Longueur primitive |
| C | Entraxe final |
| fr | Fréquence de passage |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- **AdD** : Arbres de Défaillances
- **AdE** : Arbre d'Evènements
- **ANSI** : Américaine National Standards Institute(Etats unis)
- **AMDEC** : Analyse de Modes de Défaillances, leurs Effets et leurs Criticités
- **AMDE** : Analyse de Modes de Défaillances, leurs Effets
- **ALARP**: As Low As Reasonably practicable
- **AZS** : Alumine-Zircone-Silice
- **AZSC** : Alumine-zircone-silice-chrome
- **ASTM**: Américaine Society for Testing Materials (Etats unis)
- **CHSCT** : Comité d'Hygiène, de Sécurité et Conditions de travail
- **CSA Z1002** : santé et sécurité au travail-identification et élimination des phénomènes dangereux. Appréciation et maîtrise des risques
- **DIN** : Deutsches Institut für Normung(Allemagne)
- **ER** : Evènement Redouté
- **HA** : Hautes teneuses en Alumine
- **HAZOP** : HAZard OPerability
- **INERIS** : Institut National de l'environnement Industriel et des risques(France)
- **ISO** : International Organization for Standardization
- **MdD** : Mode de Défaillance
- **MFG** : Méditerranéan Float Glass
- **OHSAS**: Occupational Health and Safety Assessment Series
- **PID** : Proportionnel-Intégral-dérivable
- **QHSE** : Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement
- **SADT** : Structured Analysis Design Technique
- **THTZ** : Très Haute Teneur en Zircone
- **USD** : US Dollars

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Il y a plus de 12000 ans, nos ancêtres chassaient avec des flèches dont les pointes étaient parfois taillées dans des obsidiennes naturelles, ce verre qui est d'origine volcanique, opaque d'une couleur verte ou bleue est très riche en silice.

C'est environ 4 500 ans que fut découverte la manière d'élaborer le verre, mais avec l'avancement scientifique, le verre trouve des applications dans le bâtiment, la téléphonie, l'informatique, l'énergie, l'aéronautique et aussi dans le confinement des déchets, plus particulièrement celui des radioéléments à vie longue.

Comme le verre a de multiples applications, les besoins en cette matière sont en constante croissance, et pour cela des usines sont installées dans différents pays dans le monde pour les satisfaire. La production du verre est comme n'importe quelle autre industrie, elle ne cesse pas d'avoir des risques qu'il faut maîtriser en appliquant des méthodes quantitatives qui vont nous aider à les réduire.

Mediterranean Float Glass (MFG), est la plus grande ligne de production en Afrique et l'unique producteur de verre plat au niveau magrébin ; met en permanence des mécanismes pour la prévention des accidents majeurs et cela pour éviter non seulement les pertes au sein de l'entreprise mais aussi pour épargner la population avoisinante et l'environnement des effets de ces probables accidents.

Le but de notre projet est d'améliorer la qualité du verre au niveau du MFG en proposant un dispositif qui sert à abaisser le taux d'humidité dans le sable établir une analyse des risques pour prévenir les phénomènes dangereux qui peuvent survenir dans la fonderie et minimiser leurs impacts sur l'emplacement de ce dispositif en proposant une solution pratique et adéquate.

Ce travail est composé de trois parties différentes :

La **première partie** est présentée par trois chapitres qui regroupent la totalité de l'étude bibliographique.

Nous présentons dans le **premier chapitre**, le contexte général, la présentation de l'entreprise, la problématique de notre étude ainsi que la méthodologie à suivre pour sa résolution.

Dans le **deuxième chapitre**, nous allons parler du verre d'une manière générale, son procédé de fabrication, le four à flamme transversale où il sera produit, les briques réfractaires composant ce type de fours, le phénomène de séchage et les différents types de sécheurs existants.

Nous allons finir cette partie par un chapitre qui va se porter sur des notions de bases sur les différentes méthodes d'analyse de risques que nous allons utiliser par la suite.

La **deuxième partie** est consacrée à l'étude du système en parlant de la ligne de production, le choix du système à étudier et sa décomposition fonctionnelle ensuite nous avons dimensionné un séchoir rotatif où nous avons calculé les paramètres nécessaires à sa mise en œuvre en fonction de ce que nous avons comme données.

Une **troisième partie** est dédiée à l'application des méthodes d'analyse des risques et à la solution proposée pour réduire les effets de l'évènement redouté.

A la fin de ce mémoire, nous terminerons par une conclusion générale et perspective.

Chapitre 1

Contexte général de l'étude

Chapitre 1 : Contexte général de l'étude

1.1 Contexte général

Chaque année des nouveaux modèles de verre sont élaborés par les différents industriels de cette matière dans le monde, et cela, pour satisfaire les exigences de la clientèle. Pour cette raison, la qualité des produits finaux est un caractère à prendre en considération et à maintenir tout au long de l'engagement avec ses clients.

La qualité est assurée par différentes techniques que chacun des industriels choisit en fonction de ses produits finaux. L'une de ces techniques est le séchage de la matière première qui est le sable pour garantir la bonne fusion de ce dernier au sein du four qui est le cœur de la ligne de production.

Cet élément sensible et crucial, est conçu de briques de nature spécifique qui sont appelées les briques réfractaires. Ce type des briques peut résister à une température trop élevée qui peut atteindre les 1500 à 1580 °C mais elles sont très sensibles aux basses températures. Elles peuvent être complètement détruites à cause du choc thermique quand la température baisse jusqu'à 200 °C causant un effondrement du mur du four de fusion où les effets sont très graves et qui nécessitent un contrôle strict des paramètres liés au processus de fabrication qui fait l'objectif de notre travail.

1.2 Présentation de l'entreprise

1.2.1 Analyse du marché Algérien du verre plat

La production nationale du verre en Algérie était faible avant les années 2000, les besoins du marché national étaient donc principalement couverts par l'importation. Cette demande qui ne cesse d'augmenter avec le développement des secteurs gros consommateurs tels que le bâtiment, et les secteurs de la transformation.

La demande nationale en verre plat est estimée à 50 000 tonnes/an jusqu'à la mise en service de MFG en Août 2007.

La capacité de production actuelle de MFG avec cette première ligne de verre est de 170 000 tonnes /an, dont 29 % (50 000 tonnes / an) sont destinés au marché local et le reste soit 71 % (120000 tonnes /an) est consacré à l'exportation.

1.2.2 Description générale de MFG

Méditerranéan Float Glass par abréviation MFG est une filiale de CEVITAL, premier groupe industriel privé en Algérie.

MFG a installé les deux premières lignes de production de verre plat en Afrique avec une capacité de production de 600 tonnes/jour pour la première et de 800 tonnes/jour pour la deuxième ; les 71% sont exporté essentiellement vers des marchés internationaux (Espagne, Italie, Portugal, Maroc et Tunisie).

Aujourd'hui, MFG dispose d'une unité de commercialisation dénommée MFG Europe, dotée de deux bases logistiques, l'une en Italie et l'autre en Espagne, c'est-à-dire, le produit commercialisé à l'international a une bonne qualité.

a. Spécifications de l'entreprise MFG

Tableau 1- 1: Spécifications de l'entreprise MFG.

| | |
|------------------------|--------------------------|
| Capacité de production | 600 tonnes/jours |
| Localisation | Arabaa Blida |
| Nature de l'activité | Production du verre plat |
| Superficie du terrain | 30 hectares |
| Longueur de la ligne | 844 m |
| Effectif personnel | 750 personnels |
| Electricité | 16000 MVA |
| Gaz naturel | 16000 m ³ /h |
| Eau | 140 m ³ /h |
| Hydrogène | 130 m ³ /h |
| Azote nitrogène | 1600 m ³ /h |
| Cout globale | 57 M.USD |

La figure 1-1 montre la localisation géographique de l'entreprise.

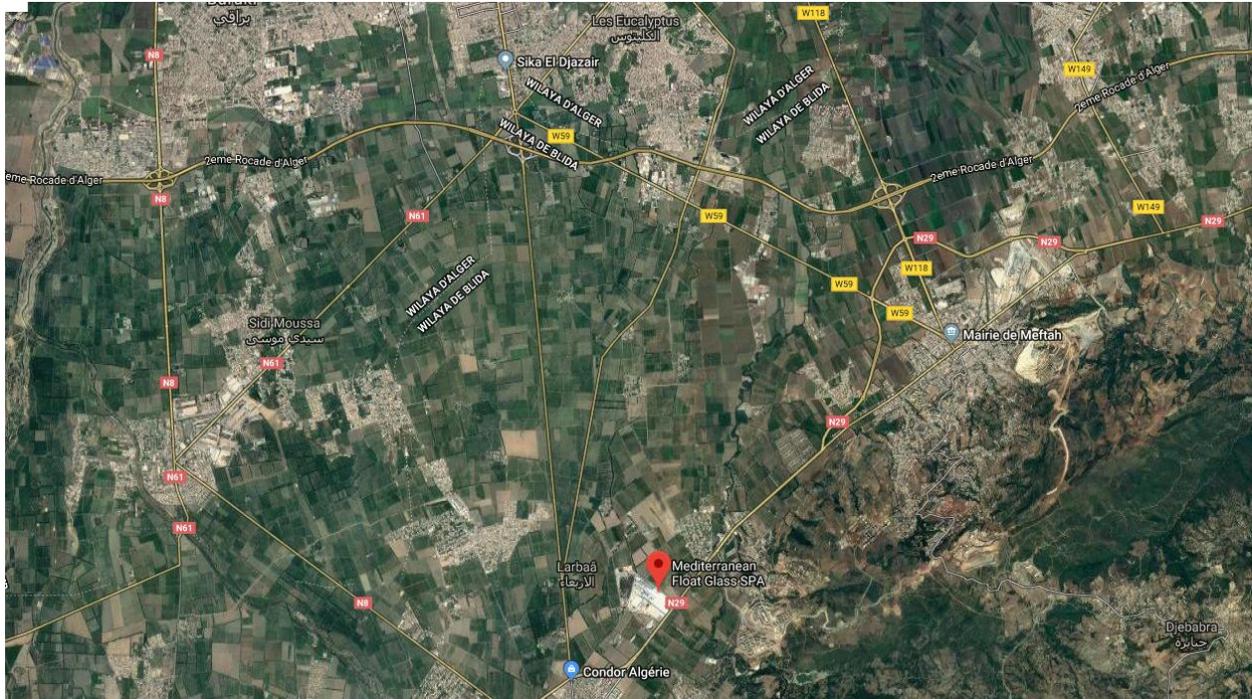


Figure 1- 1: Localisation géographique de MFG (Google Map).

b. Domaine d'activité

Pour assurer sa place dans le marché national ainsi que dans le marché international, MFG a élargi sa gamme en produisant et en commercialisant le verre plat clair multi-dimensions, le verre feuilleté et le double vitrage.

Ces produits offerts par MFG sont d'une qualité qui répond parfaitement aux exigences des concepteurs et à l'évolution des tendances tant pour le bâtiment que pour l'industrie automobile ou encore la décoration et l'ameublement.

En effet, MFG répond aux attentes de ses clients pour les applications les plus exigeantes tels que le design, la sécurité, l'isolation, le confort et la maîtrise de l'énergie avec une gamme riche de verre plat clair allant de 02 à 19 mm d'épaisseur en dimension PLF, DLF et ½ DLF.

Tableau 1- 2: Caractéristiques de chaque type du verre à MFG.

| Type de verre | Grands formats (PLF) | Formats moyens surdimensionnés (DLF) | Formats moyens (1/2 DLF) |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractéristique | <p>Longueur : 3660-6000 mm</p> <p>Largeur : 3660-4270 mm</p> <p>Largeur nette du ruban : Max 4270 mm</p> | <p>Longueur : 2440-3660 mm</p> <p>Largeur : 3660-4270 mm</p> <p>Largeur nette du ruban : Max4270 mm</p> | <p>Longueur : 1500-3050 mm</p> <p>Largeur : 3660 mm</p> <p>Largeur nette du ruban : Max. 3660 mm</p> |

c. MFG entreprise durable

Dans la continuité des démarches engagées depuis sa création, MFG a encore renforcé les actions visant à garantir la satisfaction de ses clients, le respect de l'environnement et l'hygiène et la sécurité de ses employés.

MFG consacre toutes ses efforts en vue de mettre sur le marché un produit de qualité et ce par la conformité par rapport aux normes ISO et référentiel (ISO 9001 :2000 pour la qualité, ISO 14001 :2004 pour l'environnement et OHSAS 18001 :2007 pour la santé et la sécurité) et la formalisation de son engagement par la mise en place d'un système de management QHSE (Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement).

1.3 Problématique

Chaque société a des objectifs à atteindre. Pour les industriels du verre, l'objectif capital est d'assurer la qualité de leurs produits et donc satisfaire les besoins de leurs clients. Pour assurer cette caractéristique, il faut agir soit sur la matière première ou le procédé lui-même (plus précisément la combustion). Mais il faut toujours prendre en considération la sécurité des équipements assurant cette qualité. Dans le cas où elle est mise en compromis par rapport à la qualité, nous allons se retrouver face à un évènement très dangereux qui est « **l'effondrement du mur de four de fusion** ». Cet évènement aura lieu si les conditions de fonctionnement du four de fusion changent brusquement ce qui influence sur la structure des briques réfractaires servant à minimiser les échanges thermiques avec le milieu extérieur.

Donc les questions à répondre à la fin de ce mémoire sont les suivantes :

- Comment pouvons-nous assurer la qualité du verre en agissant sur la matière première ?
- Quelle est l'origine de l'effondrement de mur ? Quelles sont les conditions permettant le développement de cette origine ?
- Quelle est la probabilité d'occurrence de cet évènement ?
- Comment pouvons-nous prévenir cet évènement ?

1.4 Méthodologie

Afin de répondre aux questions posées dans la problématique ci-dessus, nous allons suivre une démarche bien déterminée qui va nous aider à résoudre le problème posé et à présenter notre travail d'une manière structurée.

La démarche que nous avons suivie dans ce mémoire est la suivante :

1. *Etat du système étudié*

Nous allons donner tous les détails sur notre système en parlant de tous ses composants alors nous allons commencer par le dépôt de matière première où nous allons proposer un séchoir rotatif du sable pour améliorer la qualité de verre et l'intégrer par la suite dans le système.

Donc les points que nous allons traiter dans cette partie sont les suivants :

- ✓ Description détaillée de tous les composants de système y compris le séchoir proposé.
- ✓ Dimensionnement du séchoir rotatif et estimation de son coût.
- ✓ Décomposition de notre système en appliquant la méthode SADT (Structured Analysis Design Technique), que nous pouvons la considérer comme étant une étape critique permettant de comprendre le système et connaître tous les paramètres gérant chaque composant.

2. *Analyse des risques liés au système*

Après l'analyse fonctionnelle du système, nous appliquerons des méthodes d'analyses des risques soit sur tout le système ou bien sur une seule partie jugée la plus critique. Ces méthodes sont appliquées dans le but d'avoir tous les évènements dangereux, leurs causes et leurs effets éventuels pour choisir par la suite l'évènement le plus probable en fonction de sa probabilité d'occurrences.

Les méthodes appliquées sont les suivantes :

- ✓ Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités (AMDEC) : Pour déterminer et classer les modes de défaillances de chaque sous-système et les quantifier en calculant leur criticité.
- ✓ HAZard OPerability (HAZOP) : Pour extraire d'autres événements ou plus des causes pour les événements trouvés dans les résultats de l'AMDEC en mettant au point les paramètres de fonctionnement de chaque sous-système (Température, pression et débit).
- ✓ Arbre de défaillances (AdD) : Pour donner d'une façon structurée, les causes d'un ou plusieurs événements redoutés choisis en se référant aux résultats des méthodes appliquées avant (AMDEC et HAZOP) et calculer leurs probabilités d'occurrences.
- ✓ Arbre des événements (AdE) : Pour déterminer tous les conséquences possibles de l'évènement redouté choisi auparavant et calculer leurs probabilités d'occurrences.

3. Réduction des risques

Dans cette étape, nous allons proposer des mesures techniques qui vont minimiser les effets de l'évènement redouté ou bien empêcher sa réalisation. Le schéma ci-dessous présente toutes les étapes de la démarche en détail :

Chapitre.1 : Contexte général de l'étude.

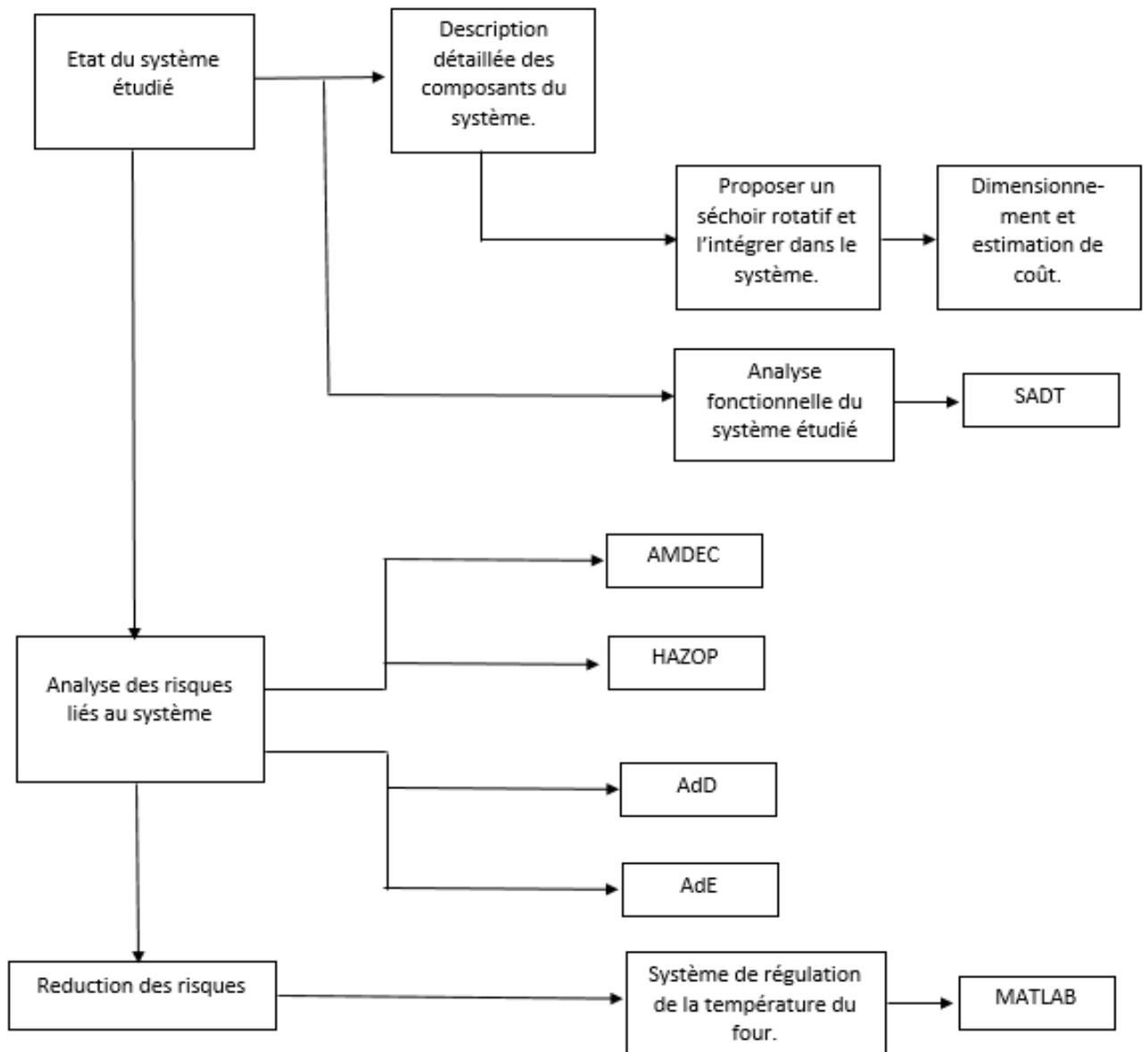


Figure 1- 2: Démarche suivie pour résoudre le problème posé.

Chapitre 2

Généralités sur le verre et le séchage

Chapitre 2 : Généralités sur le verre et le séchage

Incolore ou teinté, à l'état massif ou sous forme de fil, le **verre** est aujourd'hui présent dans tous les pans de la vie quotidienne.

Il trouve de multiples applications notamment dans le domaine de l'optique et en tant que matériau de construction. Il est aussi utilisé en chimie et dans l'industrie agroalimentaire pour la fabrication de contenants. Ce matériau solide, non cristallin et homogène, qui est issu du figeage progressif de certaines substances après fusion, est généralement constitué d'oxyde de silicium et de fondants. Il compte parmi ses qualités le fait d'être transparent et facile à modeler. Il peut ainsi prendre de nombreuses formes.

2.1 Généralités sur le verre

2.1.1 Définitions du verre

Le mot verre peut prendre des significations variées. Ce terme sert à désigner une substance dure, homogène, généralement transparente, amorphe, isotrope, provenant du refroidissement progressif de certaines substances après fusion [1].

La plupart des scientifiques considèrent le terme "verre" comme : « Tous les solides non-cristallins qui montrent une transition vitreuse, quel que soit leur mode de fabrication » [2].

Selon les normes, le verre est défini comme suit :

❖ Norme **ASTM-C-162-92**(Société Américaine des matériaux et des essais) :

« Le verre est un produit inorganique coulé à partir de l'état liquide vers un état solide sans cristallisation » [3].

❖ Norme **DIN** (Institut Allemand de normalisation) :

« Verre est un produit inorganique de fusion qui se solidifie essentiellement sans cristallisation » [3].

Chapitre.2 : Généralités sur le verre et le séchage.

2.1.2 Composition du verre

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène et par élévation à une très haute température.

Ces oxydes sont appelés **oxydes formateurs** car ils forment le squelette du verre. Nous les combinons avec d'autres éléments dits modificateurs qui sont [4] :

- Les oxydes formateurs.
- Les fondants qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs.
- Les stabilisants qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction des fondants [5].

Tableau 2- 1: Composition du verre.

| Catégorie | Elément | Rôle |
|------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Les formateurs | Silice(SiO ₂) | L'élément formateur de réseau. |
| | Anhydride borique(B ₂ O ₃) | Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques |
| Les fondants | Oxyde de sodium (la soude Na ₂ O) | Il abaisse le point de fusion, augmente la résistance du verre aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation [6]. |
| | Oxyde de potassium (K ₂ O) | Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. |
| | Oxyde de magnésium (MgO) | Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques. |
| Les stabilisants | Oxyde de calcium (CaO) | Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité. |
| | Oxyde de zinc (ZnO) | Il augmente l'éclat et l'élasticité. |
| | Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃) | C'est un stabilisant et un colorant souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. |
| | Oxyde de plomb (PbO) | Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre. |

2.1.3 Différents types du verre industriel

- **Verre plat**

Le verre plat est un verre fabriqué sous forme de feuilles. Il est principalement utilisé pour la fabrication des vitres et des miroirs. Nous préparons les verres de vitrage par flottage sur un bain d'étain. Le verre s'aplatit sur ce bain et peut présenter toutes les épaisseurs comprises entre 03 et 18mm.

- **Verre creux**

Les verres creux sont utilisés pour fabriquer les bouteilles, les flacons, les tubes, les ampoules, les briques et les pavés. La composition du verre est différente suivant le produit fabriqué. Pour un contenant de produits alimentaires, nous employons un verre sodo-calcique.

- **Fibres de verre**

Ils sont obtenus par l'étirage de verre fondu jusqu'à ce qu'il présente un diamètre compris entre 0,5 et 15 μm . Il est possible de fabriquer des fils longs, continus et multifilaires aussi bien que des fibres courtes de 25 à 30 cm de long. Tissées dans certains textiles, les fibres de verre constituent d'excellentes étoffes et de très bons matériaux d'ameublement grâce à leur stabilité chimique, leur solidité et leur résistance au feu et à l'eau.

- **Le verre technique**

Correspond à la verrerie de table, les verres pour télévisions, les ampoules d'éclairage, ainsi que des produits plus récents comme la fibre optique. Ce secteur a connu une diversification importante cette dernière décennie qui témoigne de l'implantation du verre dans des nouveaux domaines d'activités [7].

2.1.4 Définition du verre float

Le float est un verre plat qui consiste à déverser le verre à la sortie du four sur un bain d'étain en fusion permettant ainsi d'obtenir une feuille de verre ayant une épaisseur uniforme et des surfaces planes et parallèles [6][8].

2.1.5 Étapes de fabrication

2.1.5.1 Bilan de matière

La composition chimique du verre dépend essentiellement des propriétés recherchées et l'abondance des matières premières. Généralement les minerais composant le verre float sont :

- Sable (SiO_2) ;
- Carbonate de soude (Na_2CO_3) : C'est la source principale d'oxyde de sodium Na_2O ; [9]
- Dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) : Carbonate mixte de magnésium et de calcium, apportant respectivement les oxydes CaO et MgO ; [9]
- Calcaire (CaCO_3) ;
- Feldspath [(K, Na) AlSi_3O_8] : Silicate hexa-silicique d'aluminium il sert à améliorer la résistance chimique et augmenter la viscosité à basse température [10]
- Sulfate de soude (Na_2SO_4) : Il est utilisé comme un agent affinant dans le mélange vérifiable ;
- Charbon : Le charbon était utilisé comme un réducteur d'oxygène lors de la décomposition de Na_2SO_4 selon la réaction suivante :



- Oxyde de fer (Fe_2O_3);
- Calcin : Une matière première de plus en plus importante, dans la fabrication du verre, le calcin nécessite une énergie de fusion inférieure à celle des matières premières.

2.1.5.2 Étapes de fabrication

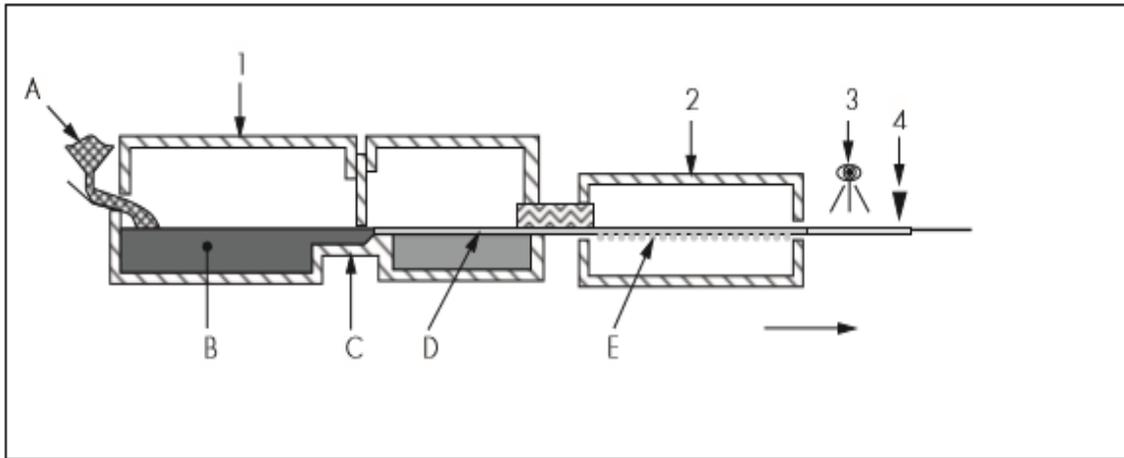


Figure 2- 1: Procédé float.

- **Enfournement(A)**

Les matières premières, après stockage dans des silos conditionnés, sont reprises puis pesées pour constituer le mélange vitrifiable [6].

Une fois pesée, ces derniers (sans calcin) sont acheminés vers un mélangeur pour obtenir une masse homogène constituant le mélange vitrifiable. L'ajout du calcin s'effectue au niveau de la trémie d'enfournement pour être ensuite enfournés dans le four de fusion (à l'aide des enfourneuses).

- **Le four de fusion (1)**

Le verre fondu est affiné et homogénéisé, est ensuite conditionné à température contrôlée avant d'arriver au bain d'étain, pour assurer un bon fonctionnement, le four est équipé de dispositifs automatiques de mesure d'enregistrement et régulation de pression et niveau de verre, d'un système de minuterie et d'inversion automatique de la flamme.

A la sortie du four, le verre fondu est coulé sur un bain d'étain en fusion. Le verre flottant sur une surface liquide plane, est étiré en un ruban à faces parallèles.

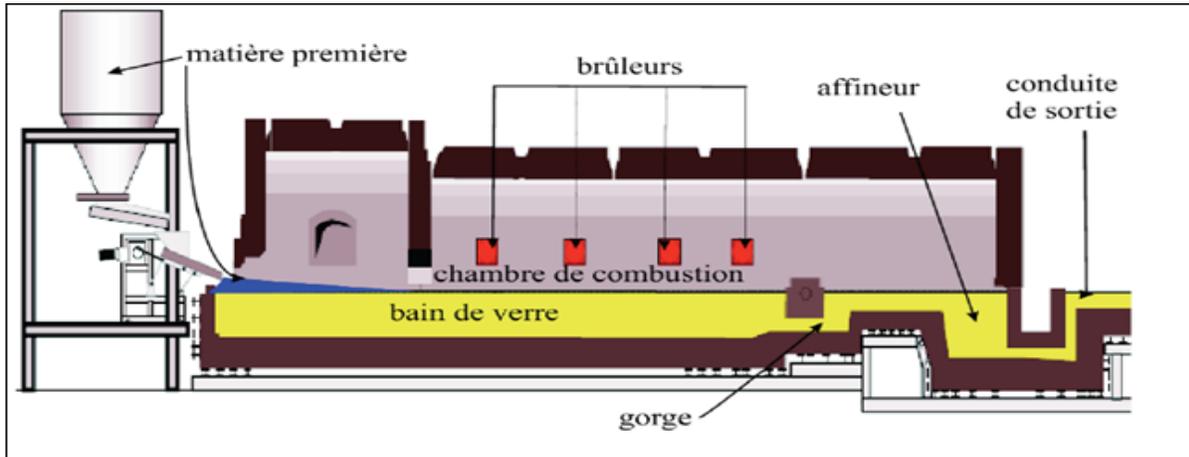


Figure 2- 2: Four float à flamme transversal.

- **Le bain d'étain (D)**

Le verre affiné arrive du four par le canal, il est déversé sur l'étain fondu dans le bain d'étain en raison de la différence de densité. Le débit est régulé automatiquement de manière à maintenir la largeur et l'épaisseur du ruban.

Des rouleaux dentés, appelés « **top-rollers** », accrochent le verre encore liquide sur les rives du ruban et font avancer le verre.

Le passage du bain d'étain à l'étenderie se fait par le biais d'une machine nommée « **Dross-box** » son rôle consiste à soulever le verre par des rouleaux en escalier pour ne pas toucher la paroi du bain d'étain, en même temps le SO_2 est soufflé pour créer un film protecteur pour le verre encore chaud.

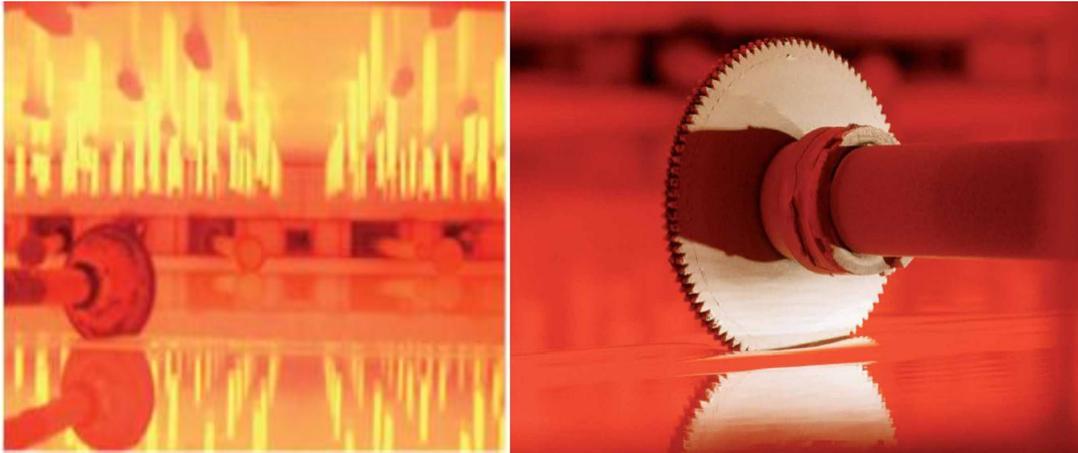


Figure 2-3: Top-rollers.

- **L'étenderie (2)**

Après le bain d'étain, le ruban de verre passe dans un couloir de refroidissement appelé « étenderie » où il subit un refroidissement progressif et contrôlé jusqu'à 60 °C, en vue d'éliminer les tensions internes et de permettre la découpe ultérieure du verre [6].

Pendant le temps de résidence du verre dans l'étenderie, du SO₂ est vaporisé sur la sub-surface du ruban. Ce traitement sert à protéger le verre pendant le contact avec les rouleaux et augmenter la durabilité du verre en milieu acide ou neutre.

- **Système de la découpe (4)**

Le ruban de verre ainsi produit est refroidi à l'air libre, puis, il est contrôlé de manière permanente (épaisseur, qualité optique, défauts, etc.), coupé en plateaux est placées verticalement, emballées puis stockées.

2.2 Généralités sur les fours verriers

Dans toutes les industries du verre, le four est l'élément le plus important et le plus critique dans la ligne de production, la fabrication du verre à ce niveau est réalisée selon deux principes :

- De façon séquentielle, dans des fours à pot.
- De façon continue, dans des fours à coulée continue.

Nous nous intéressons uniquement à la **deuxième catégorie**, car le four qui fait l'objet de notre étude appartient à cette catégorie qui est de loin la plus répandue aujourd'hui.

Parmi les fours à coulée continue, deux grands types de fours existent :

- Les **fours à flammes** où l'on utilise un combustible fossile pour chauffer le verre contenu dans un bassin ;
- Les **fours électriques** dans lesquels l'énergie apportée pour chauffer le verre est réalisée par effet JOULE au sein même de la masse de verre [11].

2.2.1 Fours à flammes

Les fours à flammes sont les fours les plus répandus dans l'industrie du verre. Ils sont constitués de matériaux réfractaires qui supportent la chaleur et la forte corrosion provoquée par le verre. Ces fours sont principalement constitués des parties suivantes :

- Le système de chauffage ;
- Le bassin de fusion ;
- Le système d'enfournement de la matière première [11].

a. Fours à boucle

Ces fours sont considérés comme des enceintes complètement fermées, Leur système de chauffage est constitué des brûleurs et des régénérateurs qui servent à réchauffer l'air de combustion jusqu'à des températures de l'ordre de 1300 °C et par l'intermédiaire d'un empilage de matériaux réfractaires qui reçoit une quantité de chaleur émise par les gaz de combustion et la transfère aux comburants. Ainsi, sur ce type de four, les flammes de combustion se développent depuis l'un des conduits de brûleur et les gaz brûlés sortent par l'autre conduit. Ces fours sont également appelés « fours à boucle » car les flammes effectuant une trajectoire en boucle.

Chapitre.2 : Généralités sur le verre et le séchage.

L'enfournement sur ce type de four est désigné sous le terme de doghouse (niche). La matière première est enfournée par ces ouvertures. La cuve contient le verre en fusion. Ce dernier passe par une gorge pour arriver ensuite dans un bassin de repos. Le verre chemine finalement dans ces canaux avant d'arriver aux machines de formage, ces carneaux sont appelés « feeders ».

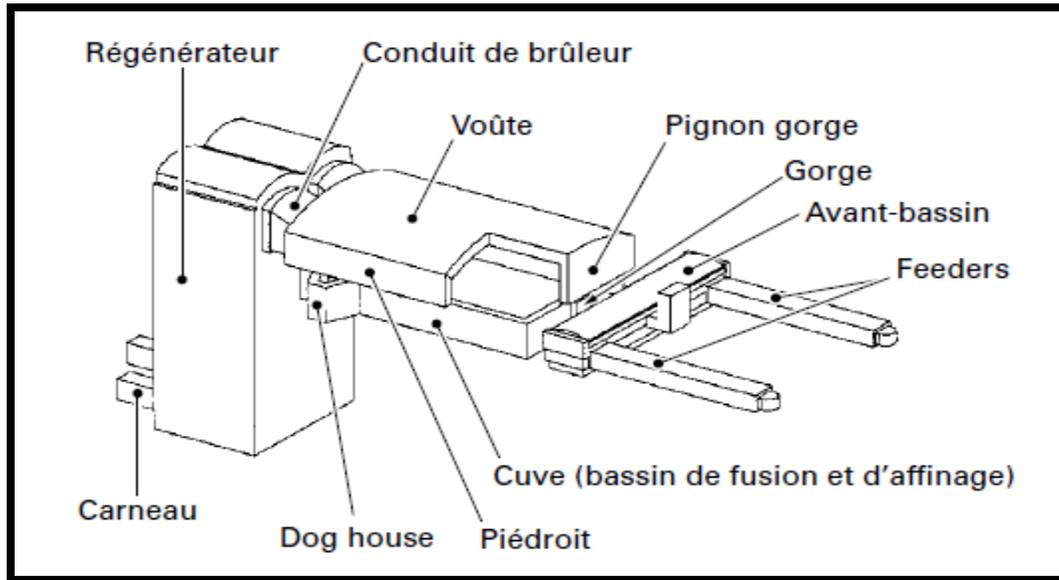


Figure 2- 4: Présentation schématique d'un four régénérateur, flammes, en boucle. [12]

b. Fours float

Dans ce type de fours, les flammes se développent transversalement par rapport à la direction principale du four. Il fonctionne par alternance où les flammes se développent suivant un côté et les gaz brûlés sortent en face pendant un certain temps ensuite ça change.

L'enfournement dans ce four se fait suivant le pignon amont. La partie fusion est séparée de bassin de repos par une partie plus étroite appelée la gorge. La gorge a une étendue de l'ordre de 5 à 6 m alors que la partie conditionnement thermique (bassin de repos) a une longueur typique de 20 m également. La hauteur du verre dans ce four reste de l'ordre du mètre.

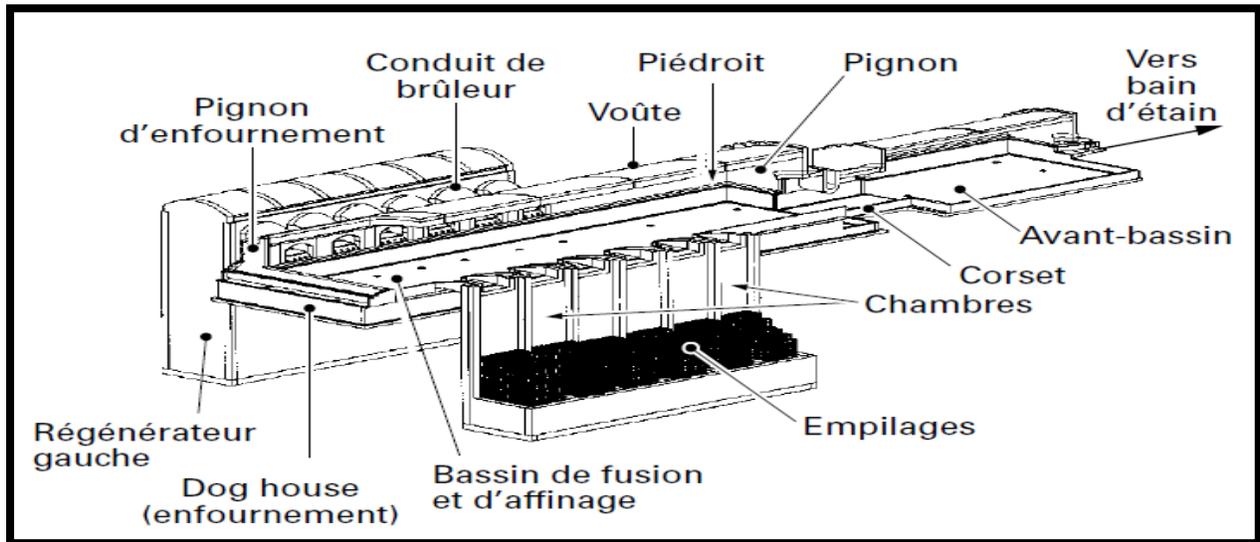


Figure 2- 5: Représentation schématique d'un four de fabrication du verre Float. [12]

2.2.2 Fours électriques

Les fours électriques fonctionnent sur un mode complètement différent de ceux à flammes. En effet les fours électriques consistent en une cuve en matériaux réfractaires supportée sur une charpente en acier, avec des électrodes insérées. L'énergie de fusion est fournie par effet Joule en faisant circuler le courant dans la masse de verre [13].

La conductivité électrique augmente avec la température due à la présence des ions principalement les modificateurs de réseau qui sont de plus en plus mobiles à haute température [2] [11].

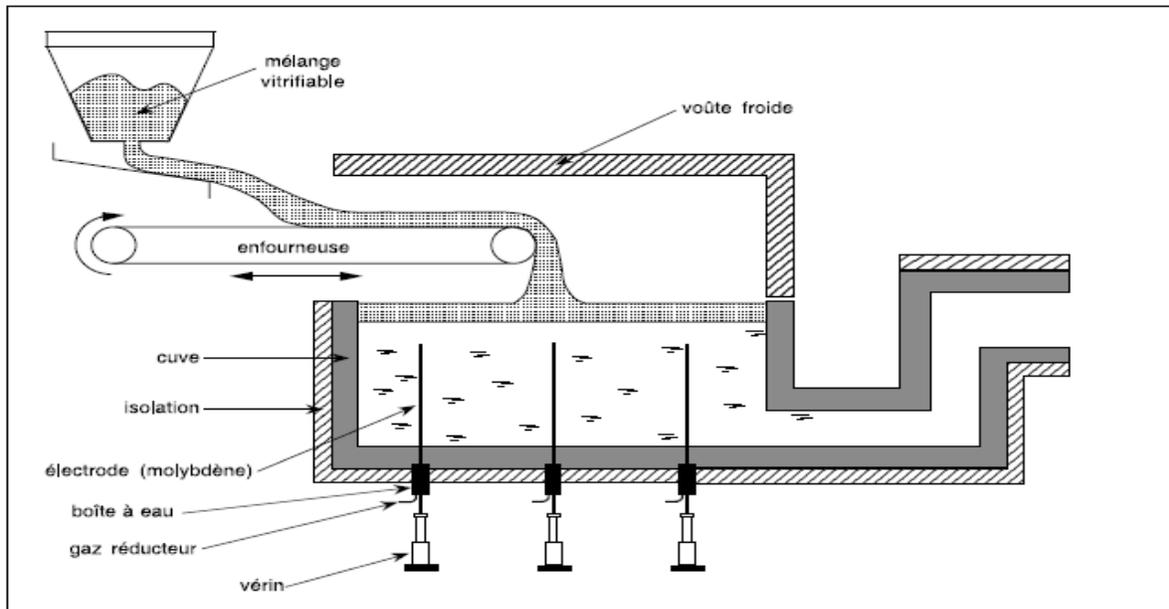


Figure 2- 6: Four électrique à voûte froide. [2]

2.3 Briques réfractaires

2.3.1 Les familles des réfractaires

Les réfractaires électrofondus sont les matériaux réfractaires de base utilisés pour la construction des fours de verrerie. Ils sont obtenus par fusion de la matière solide dans un four à arc électrique. Après fusion de la matière solide, le liquide est coulé dans des moules (sable, métallique, graphite, etc.) puis vient l'étape de « Recuisson » du bloc, étape durant laquelle de nombreux phénomènes microstructuraux et thermomécaniques se mettent en place pour arriver aux matériaux très particuliers que sont les réfractaires électro-fondus à base de zircone [14].

Des réfractaires électrofondus se distinguent principalement quatre familles de matériaux :

- Les Alumine –Zircone - Silice (AZS) ;
- Les Alumine – Zircone – Silice - Chrome (AZSC) ;
- Les Très Haute Teneur en Zircone (THTZ) ;
- Les Hautes teneuses en Alumine (HA) [15].

2.3.2 Lesbriques AZS

Le type des réfractaires le plus utilisé dans l'industrie du verre est l'AZS. Principalement utilisé pour les murs latéraux des fours de flamme avec les fonds, pour la sécurité totale avec les tractions et les longueurs moyennes de campagne, et les superstructures, paroi frontale, mur arrière, couronne supérieure dans le four de fonte en verre.

La famille des réfractaires électrofondus AZS fut la première à changer drastiquement le niveau de qualité et la productivité dans les procédés de fabrication des verres.

En premier lieu, cette performance se traduit par l'amélioration importante de la résistance à la corrosion puis vient la qualité du verre produit. Les éléments clés de ce succès des AZS sont une tendance très faible à former des cordes et des bulles dans les verres [14].

La conductivité thermique des briques AZS est :

- De 7 W/m.K à 20° C.
- De 3.5 W/m.K à 1000° C.
- De 5 W/m.K à 1500° C.

Tableau 2- 2: Types de briques réfractaires pour chaque zone de four.

| N° | Zone | Type de réfractaires |
|----|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1 | Paroi de la zone de fusion et d'affinage | réfractaires électrofondus type AZS 41#, 36# et 33# |
| 2 | Paroi de la zone de repos | réfractaires électrofondus à haute teneur en alumine (corindon) |
| 3 | Superstructure | Réfractaires agglomérés de silice |
| 4 | Gorge | réfractaires électrofondus type AZS 33 |
| 5 | Angles morts | réfractaires électrofondus type AZS 41 |
| 6 | Murs de frappe | réfractaires électrofondus type AZS 41 |
| 7 | Pignon en L | Réfractaires agglomérés de silice et de mullite |
| 8 | Empilage | réfractaires de magnésie |
| 9 | Sole du four | réfractaires électrofondus type AZS 33# |

2.4 Phénomène du séchage

Le séchage est une opération qui a une grande importance dans les processus industriels de fabrication liés à des domaines tels que l'agroalimentaire, les mines, l'industrie pharmaceutique ou plus récemment l'industrie du verre.

Actuellement, les exigences concernant la qualité du produit, la sécurité des processus et la protection de l'environnement accroissent jour après jour, et pour les satisfaire, différentes techniques sont utilisées, parmi lesquelles le séchage de la matière première ou dans certains cas, le produit final pour augmenter sa durée de vie.

Le séchage rotatif est sans doute une des plus anciennes et plus communes des opérations unitaires dans les processus industriels.

Il est utilisé pour le traitement de plusieurs matières, prenons par exemple :

- Combustible (séchage du charbon).
- Minéraux, engrais, chimie minérale (séchage de sable, d'argile, ...).
- Métaux...

2.4.1 Définition

Nous appelons séchage, l'opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement par évaporation un liquide imprégnant un solide ou un liquide.

Le corps humide en jeu peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide (sauf dans le cas particulier de la déshydratation d'un liquide non volatile : Séchage des huiles par exemple où le produit final est un concentré liquide).

2.4.2 Intérêts

- Atteindre la teneur souhaitée en liquide.
- Il est intéressant de sécher dans de l'air des solides imprégnés d'eau parce qu'il est le cas le plus fréquent et il est pratiquement totalement transposable à toutes les autres situations.
- Le champ d'application du séchage est particulièrement large : Produits chimiques, produits pharmaceutiques, produits agro-alimentaires, matières plastiques, papiers, bois.

2.4.3 Principe du séchage

Généralement, pour éliminer de l'eau contenue dans un produit solide, on pense à le porter à la température d'ébullition de l'eau, mais ils en existent d'autres façons pour le faire.

Trois modes de séchage peuvent être distingués :

a. Séchage mécanique

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation...).

b. Séchage chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (chlorure de calcium, ...) pour extraire l'eau.

c. Séchage thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une « activation » de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur.

Le séchage thermique se divise en deux types :

- Séchage par ébullition

La pression de vapeur du solvant dans ce cas est égale à la pression régnant dans le sécheur. La température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition (par exemple 100 pour l'eau à $1,013 \times 10^5$ Pa) [16].

- Séchage par entraînement

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que :

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air [16].

2.5 Différents types des séchoirs rotatifs

2.5.1 Séchoirs continus

Tableau 2- 3: Types des sécheurs continus industriels. [17]

| | Atomisation | Cylindre chauffant | Tambour rotatif | Sécheur tunnel | Sécheur à bande | Sécheur silo |
|--------------------------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|--------------|
| Type de produit (état initial) | Liquide | Liquide, pâteux ou en bande | Fibreux, pâteux, pulvérulents, granulaires | fibreux, pâteux, pulvérulents, granulaires | Produits en bande | Granulaires |
| Teneur en eau initiale | 35-75% | 60-80% | 20-75% | 20-90% | 10-90% | 20-35% |
| Teneur en eau finale | 3-10% | 5-10% | 1-15% | 0.1-15% | 5-15% | 14.5-15% |

2.5.2 Séchoirs statiques

Tableau 2- 4: Types des sécheurs statiques industriels. [17]

| | Etuve de séchage | Lyophilisation | Lit fluidisé | Sécheur à palettes/vis |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|
| Type de produit (état initial) | Liquides, fibreux, pâteux, pulvérulents granulaires | Liquides, fibreux, pâteux, pulvérulents granulaires | Liquides, fibreux, pâteux, pulvérulents granulaires | Pulvérulents et granulaires |
| Teneur en eau initiale | 45-70% | / | 30-70% | 70% |
| Teneur en eau finale | 07-30% | / | 05-40% | 2.2-3.2% |

Le type de sécheur que nous allons étudier dans ce qui suit c'est le sécheur à tambour rotatif :

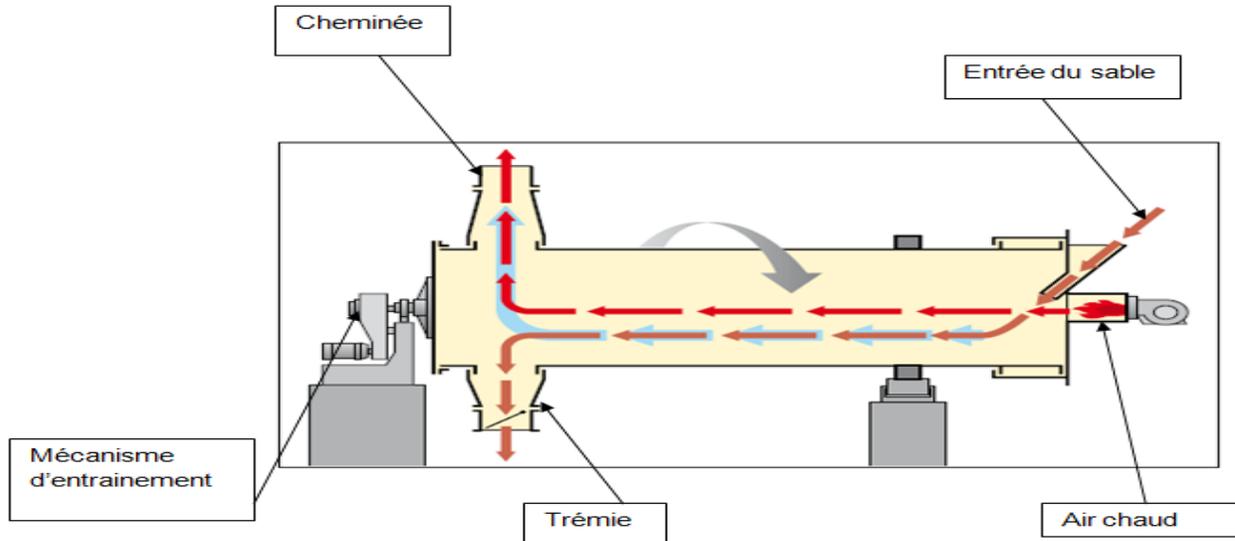


Figure 2- 7: Fonctionnement du séchoir rotatif.

Ce procédé de séchage comprend deux étapes distinctes :

- **Alimentation et transport de produit**

Ces séchoirs sont constitués d'un tambour (cylindre), généralement de grande longueur, tournant lentement autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontale. |

- Le produit humide est introduit en partie supérieure par un tapis ou une vis d'Archimède.
- Le produit avance par gravité, les grains roulant les uns sur les autres

- **Transfert de chaleur et séchage de produit**

Le transfert de chaleur se fait par convection ou par conduction selon le type de tambour.

- **Séchoir tambour rotatif convectif**

Dans certains cas, la paroi intérieure du cylindre est garnie d'aubes permettant de remonter le produit et de le laisser tomber en pluie au cours de la rotation. Ce système accroît considérablement la surface d'échange entre le produit et l'air et donc contribue à diminuer le temps de séchage.

- **Séchoir tambour conductif**

La paroi du cylindre est chauffée extérieurement par des gaz de combustion. La face interne du cylindre assure par conduction la transmission de chaleur au produit humide. Un écoulement d'air est nécessaire pour l'extraction de la vapeur d'eau.

Chapitre 3

Etude bibliographique sur les outils d'analyse des risques

Chapitre 3 : Etude bibliographique sur les outils d'analyse des risques

Comme n'importe quelle entreprise qui fait partie du marché international, MFG donne une importance aux différents instruments qui vont l'aider de gagner la confiance de ses clients en assurant une bonne qualité de ses produits finaux, mais pour l'assurer ; il faut implémenter des techniques qui vont avec les évolutions du marché et de la technologie aussi. Toutes ces évolutions des technologies ne viennent pas sans risque et gérer ce risque doit prendre un certain nombre des principes qui doivent être appliqués pour assurer un management de risques efficace au sein de l'entreprise.

Un management des risques efficace est basé sur la compréhension de tous les niveaux où nous pouvons avoir des risques potentiels ayant des effets négatifs sur l'entreprise et son environnement interne ou bien externe.

Pour cela, nous allons dans ce chapitre donner quelques notions sur le risque et le danger, montrer la démarche proposer par la norme **ISO 31000** : « Management des risques – Principes et lignes directrices » pour une bonne gestion des risques et présenter les méthodes utilisées pour atteindre notre objectif qui est la maîtrise des risques.

3.1 Notions de risque et danger

3.1.1 Définitions

- Le danger

Le sens du mot « danger » peut être ambigu. Souvent les dictionnaires ne donnent de définitions précises du mot ou associent ce dernier au terme « risque ».

Il existe un grand nombre de définitions de « danger », mais la définition la plus courante dans le contexte de la santé et la sécurité au travail est la suivante :

« Un danger est toute source potentielle de dommage, de préjudice ou un effet nocif à l'égard d'une chose ou une personne ».

La norme **CSA Z1002** : Santé et sécurité au travail- identification et élimination des phénomènes dangereux, appréciation et maîtrise des risques, définit aussi le « **danger** » comme étant une source potentielle de dommage pour un travailleur [18].

Dans le même contexte, le comité d'hygiène, de sécurité et conditions de travail (**CHSCT**) donne cette définition au « danger » :

« Propriété intrinsèque des produits, des équipements, des procédés... pouvant entraîner un dommage » [19].

- Le risque

« Un risque est la probabilité qu'une personne subisse un préjudice ou des effets nocifs pour sa santé en cas d'exposition à un danger » [18]. Selon la norme CSA Z1002, le préjudice est une blessure ou atteinte à la santé.

Comme le danger, le terme « **risque** » a plusieurs définitions ; parmi lesquelles celle donnée par la CHSCT :

« Exposition d'une cible (salarié, entreprise, environnement y compris la population) à un danger. Le risque est caractérisé par la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté et de la gravité de ses conséquences » [19].

Chapitre.3 : Etude bibliographique sur les outils d'analyse des risques.

Nous pouvons deviser le risque en deux catégories essentielles :

- **Risque professionnel**

C'est un évènement dont l'occurrence met en danger des personnes dans le cadre de l'exercice de leur métier. Les évènements qui conduisent à des risques professionnels sont souvent connus mais ils sont incertains, surtout pour des effets conjugués, dont la combinaison peut aboutir à un très grand nombre de possibilités [19].

- **Risque industriel ou bien majeur**

Le risque industriel est défini comme évènement accidentel se produisant sur un site industriel mettant en jeu des produits et/ou des procédés dangereux et entraînant des conséquences immédiates graves pour le personnel, les riverains, les biens et l'environnement. Afin de limiter les survenus et les conséquences, les établissements les plus dangereux sont soumis à une réglementation particulière (Installations classées) et à des contrôles réguliers [19].

3.2 Gestion du risque

La gestion des risques est une discipline qui sert à répertorier tous les risques relatifs aux activités d'une organisation, quelles que soient la nature ou l'origine de ces risques. Le but de cette gestion des risques est de les traiter d'une façon méthodique et d'une manière structurée pour non seulement réduire les probabilités d'occurrences des événements redoutés mais aussi de réduire l'impact en cas ils se réalisent.

La norme **ISO 31000** : « Management des risques – Principes et lignes directrices », donne une démarche bien coordonnée de la gestion des risques qui est présentée par les trois étapes suivantes :

1. Etablissement du contexte interne et externe de l'organisation.
2. Appréciation des risques qui comprend l'identification, l'analyse et l'évaluation des risques.
3. Le traitement des risques où le choix et la mise en œuvre d'une ou plusieurs mesures de réduction de ces risques sont implémentés.

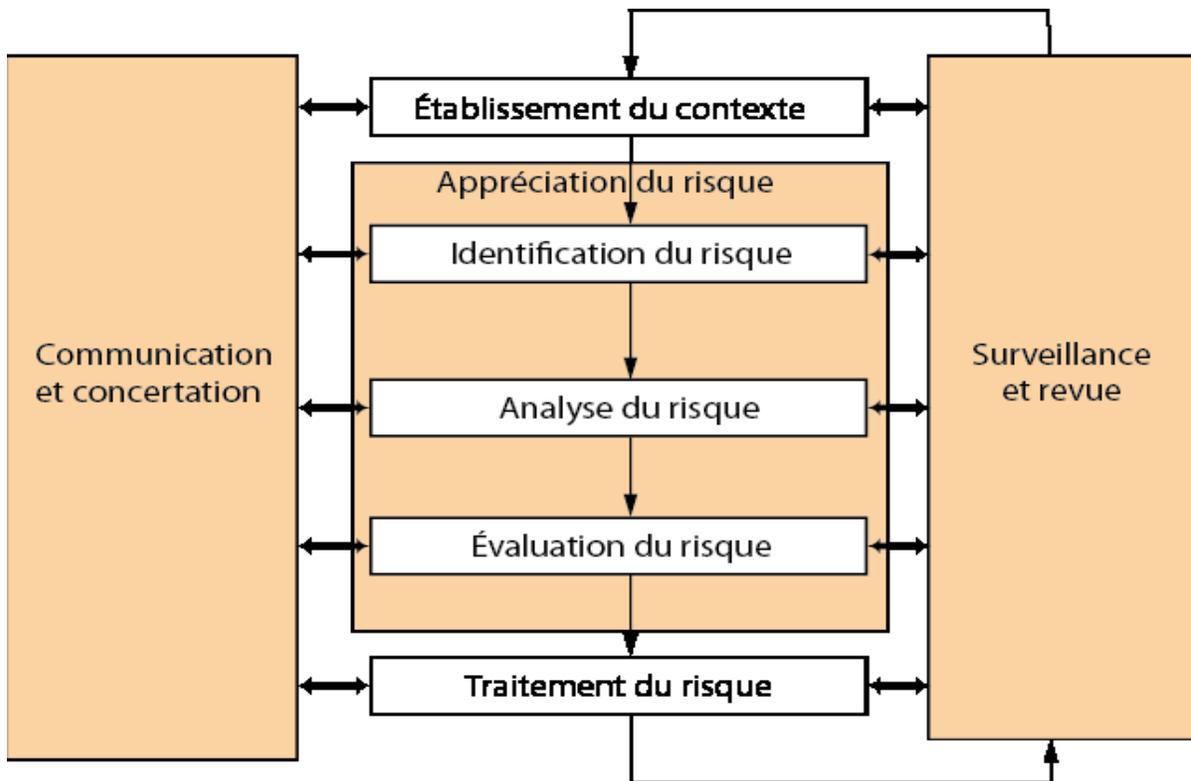


Figure 3- 1: Démarche de management des risques selon la norme ISO 31000.

3.2.1 Établissement du contexte de l'organisation [20]

- Contexte externe

Celui-ci est présenté par l'environnement externe à l'organisation, il peut inclure aussi les parties prenantes et la société où l'organisation exerce son activité.

- Contexte interne

Le contexte interne comprend tout ce qui, au sein d'un organisme, peut influencer la manière dont l'organisme gère le risque.

3.2.2 Appréciation des risques

Le risque naît lorsque les conditions où la cible peut rencontrer une source de danger sont réalisées, nous ne pouvons pas être en risque sans exposition à un certain danger.

Pour apprécier ce risque, nous devons passer par ces trois étapes suivantes :

- Identification des risques

Cette étape est une étape cruciale, elle prend en considération deux axes très importants ; le processus et les installations. Le premier permet d'identifier les insuffisances ou les dysfonctionnements de l'organisation. Le second cible les failles dans la conception, l'adéquation, l'opération, l'entretien ou la maintenance des installations[21].

Ces deux axes sont étudiés à l'aide des différentes méthodes, chacune est appliquée dans un domaine bien précis et selon notre objectif final (par exemple : HAZOP pour les systèmes thermodynamique).



Figure 3- 2 : Processus d'identification des risques. [21]

- Analyse des risques

Cette partie sert à quantifier des risques liés aux différents processus de l'organisation. Nous faisons attribuer pour chaque risque une probabilité d'occurrence et une gravité liée à ses conséquences pour lui donner par la suite un niveau de criticité qui est combiné de ces deux facteurs.

Chapitre.3 : Etude bibliographique sur les outils d'analyse des risques.

- Evaluation des risques

Après l'attribution des niveaux de criticité, nous les évaluons dans cette partie-là en les jugeons acceptables ou non pour décider quelles mesures à mettre en place pour les réduire.

3.2.3 Traitement des risques

Pour la dernière étape, nous allons proposer des mesures de différentes natures pour agir sur le niveau choisi dans l'étape précédente. Pour le traitement chaque organisation dispose d'un ensemble des outils combinant des : [21]

- Instruments techniques (Détecteurs, murs coupe-feu...).
- Instruments organisationnels (Procédures opératoires, consignes de sécurité, plans de sauvegardes...).
- Instruments financiers (Provisions des risques, assurances...).
- Instruments juridiques (Contrats de travail...).

3.3 Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités (AMDEC)

L'AMDEC est une méthode inductive d'analyse, adaptée à l'étude des défaillances des matériaux et d'équipements des différents systèmes et de différentes technologies. Elle est aussi une méthode semi-quantitative qui repose notamment sur les concepts de :

- **Défaillance** : Soit la cessation de l'aptitude d'un élément ou d'un système à accomplir une fonction requise ;
- **Mode de défaillance** : Soit l'effet par lequel une défaillance est observée sur un système ;
- **Cause de défaillance** : Soit les événements qui conduisent aux modes de défaillances ;
- **Effet d'un mode de défaillance** : Soit les conséquences associées à la perte de l'aptitude d'un élément ou d'un système à accomplir une fonction requise [22][23].

3.3.1 Objectifs

- ✓ Rechercher les défaillances pouvant conduire à un événement indésirable.
- ✓ Classifier ces défaillances.
- ✓ Contrôler les défaillances critiques au moyen d'actions correctives.

Chapitre.3 : Etude bibliographique sur les outils d'analyse des risques.

3.3.2 Déroulement

Tableau 3- 1: Exemple d'un tableau AMDEC.

| Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et leurs criticités. | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|---------------------|--------|--------|-----------|-----------|------|---|---|---------------------|
| Lieu : | Système : | | | | | | | Le : | | | |
| Sous-système | Fonction | Composant | Mode de défaillance | Causes | Effets | Détection | Criticité | | | | Actions correctives |
| | | | | | | | P | G | D | C | |
| | | | | | | | | | | | |

Pour établir une AMDEC, il faut suivre les étapes suivantes :

- Choisir un élément ou un composant.
- Définir la fonction de ce composant.
- Retenir un premier mode de défaillance.
- Identifier les causes de ce mode de défaillance ainsi que ces conséquences.
- Examiner les moyens de défaillances permettant de détecter le mode de défaillance.
- Procéder l'évaluation de la criticité.
- Prévoir des mesures ou des moyens supplémentaires si nécessaire.
- Envisager un nouveau mode de défaillance et reprendre l'analyse.

3.3.3 Avantages et limites

- Analyse qualitative et quantitative rigoureuse et précise.
- Détermine l'impact de chaque mode de défaillance sur le fonctionnement normal du système.
- Une méthode très longue pour les systèmes complexes.
- Inadaptée pour les systèmes très informatisés.
- Difficulté de déterminer à quel niveau doit s'arrêter l'analyse.

3.4 HAZard OPerability (HAZOP)

La méthode HAZOP utile pour l'examen des systèmes thermo-hydrauliques. Pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme le débit, température, pression, niveau, concentration....

L'HAZOP suit une procédure assez semblable à celle proposée par l'AMDE. L'HAZOP ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles (**mot-clé + paramètre**) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation [22].

3.4.1 Mise en œuvre de la méthode

- Rechercher les causes possibles de dérive.
- Déterminer les conséquences.
- Apporter les mesures compensatoires nécessaires : prévention, détection, protection.
- Vérifier que la mesure corrective n'importe pas de risque nouveau.

3.4.2 Déroulement de la méthode HAZOP

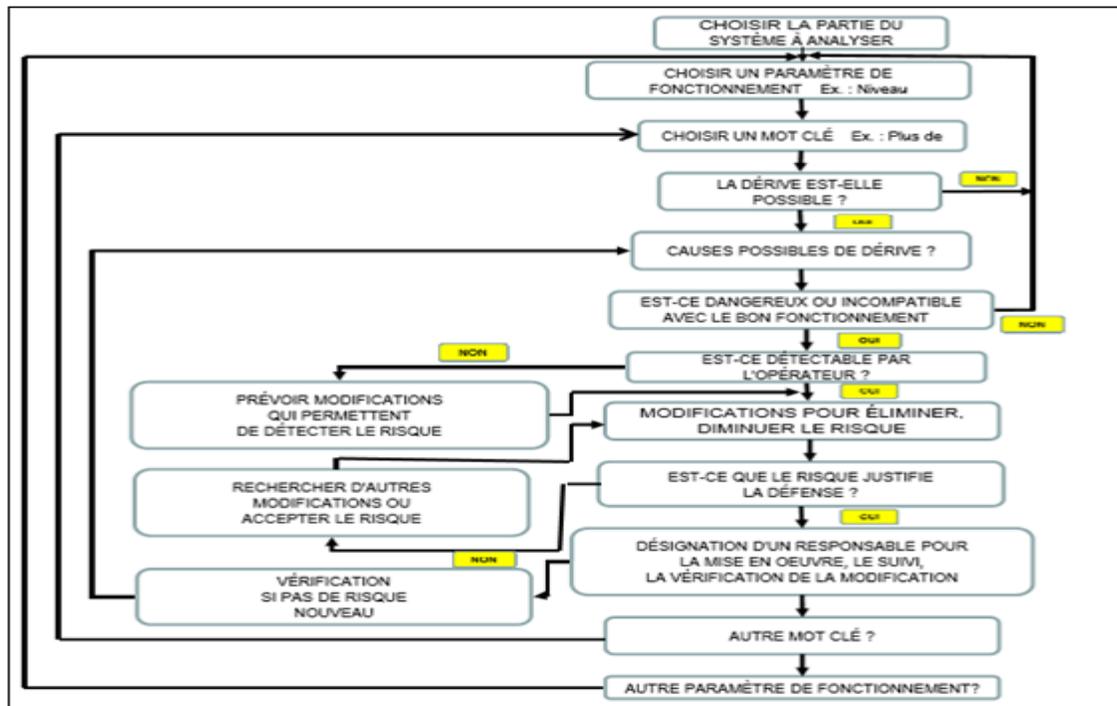


Figure 3- 3: Déroulement de la méthode HAZOP.

Chapitre.3 : Etude bibliographique sur les outils d'analyse des risques.

Le déroulement d'une étude HAZOP est sensiblement similaire à celui d'une AMDE. Il convient pour mener l'analyse de suivre les étapes suivantes :

1. Dans un premier temps, choisir une ligne ou de la maille. Elle englobe généralement un équipement et ses connexions, l'ensemble réalisant une fonction dans le procédé identifié au cours de la description fonctionnelle.
2. Choisir un paramètre de fonctionnement
3. Retenir un mot-clé et générer une dérive.
4. Vérifier que la dérive est crédible. Si oui, passer au point (5), sinon revenir au point (3).
5. Identifier les causes et les conséquences potentielles de cette dérive.
6. Examiner les moyens visant à détecter cette dérive ainsi que ceux prévus pour en prévenir l'occurrence ou en limiter les effets.
7. Proposer, le cas échéant, des recommandations et améliorations.
8. Retenir un nouveau mot-clé pour le même paramètre et reprendre l'analyse au point (3).
9. Lorsque tous les mots-clés ont été considérés, retenir un nouveau paramètre et reprendre l'analyse au point (2).
10. Lorsque toutes les phases de fonctionnement ont été envisagées, retenir une nouvelle ligne et reprendre l'analyse au point(1) [23].

| Date : | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|-----------|--------|--------------|-----------|----------------------|-----------------------------|--------------|
| Ligne ou équipement : | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| N° | Mot clé | Paramètre | Causes | Conséquences | Détection | Sécurités existantes | Propositions d'amélioration | Observations |
| | | | | | | | | |

Figure 3- 4: Exemple de tableau HAZOP.

3.5 Arbre de défaillances (AdD)

La méthode AdD c'est une méthode de type déductif. vise a déterminer l'enchainement et les combinaisons d'évenement pouvant conduire a un événement redouté pris comme référence .

Utilisé pour l'analyse a posteriori les causes d'accidents qui se sont produits.on parle alors d'analyse par arbre des causes [22][25].

3.5.1 Mise en œuvre de la méthode

a. Principe

- Définir l'évenement final indésirable.
- Représenter graphiquement les combinaisons d'évenement par un arbre.
- Arbre formé de niveaux successifs tel que chaque événement soit générer a partir d'évenement infirieur par l'intermédiaire de portes logiques « ET » et « OU ».
- Se poser la question : « qu'est -ce qu'il faut pour que l'évenement se produise ? ».
- Construction de l'arbre arrêtée lorsque :
 - Les événements élémentaires sont indépendants entre eux.
 - Leur probabilité peut être estimée.
 - Il est décidé de ne pas les décomposer en combinaison d'évenement plus simple.

b. Déroulement

- Définition de l'évenement final indésirable ;
- Etude du système;
- Construction de l'arbre:
 - Evaluation de la probabilité des événements élémentaires.
 - Calcul de la probabilité de l'évenement final.
 - Mise en évidence des chemins critiques.
 - Modifications de la structure de l'arbre par l'adjonction de barrières supplémentaires.

Symbolisme simplifié

Tableau 3- 2: Symboles représentant les différents évènements dans l'AdD.

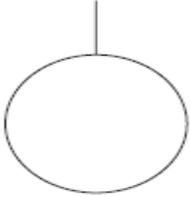
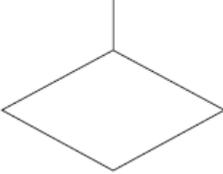
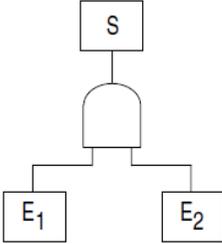
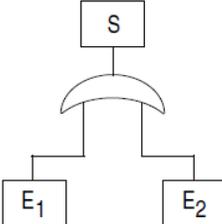
| Symbole | Nom du symbole | Signification du symbole |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|  | Cercle | Evénement de base. |
|  | Losange | Représentation d'un événement qui ne peut être considéré comme élémentaire. |
|  | Rectangle | Evénement sommet ou événement intermédiaire. |

Tableau 3- 3: Symboles représentant les deux portes logiques utilisées dans l'AdD.

| Symbole | Nom du symbole | Signification du symbole |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Porte « ET » | L'événement de sortie S est généré si les événements E1 et E2 sont présents simultanément |
|  | Porte « OU » | L'événement de sortie S est généré si l'un au moins des événements E1 et E2 sont présents |

3.6 Arbre d'évènements (AdE)

Cette méthode s'applique préférentiellement sur des sous-systèmes bien déterminés. Elle apporte une aide précieuse pour traiter des systèmes comportant de nombreux dispositifs de sécurité et de leur interaction [24].

3.6.1 Principe

A partir d'un événement initiateur ou d'une défaillance d'origine, l'analyse par arbre d'évènements permet donc d'estimer la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection, ou d'intervention ...

3.6.2 Déroulement

La démarche généralement retenue:

- Définir l'événement initiateur à considérer ;
- Identifier les fonctions de sécurité prévues pour y faire face ;
- Construire l'arbre;
- Décrire et exploiter les séquences d'événements identifiées [22].

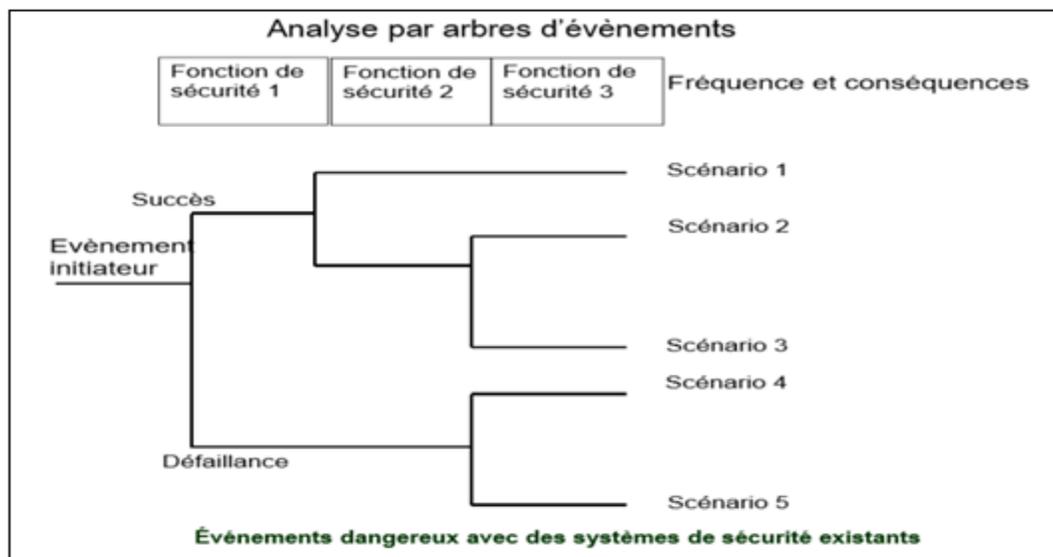


Figure 3- 5: Le déroulement de la méthode AdE.

Chapitre 4

Le système étudié

Chapitre 4 : Le système étudié

Avec un marché local tout couvert, MFG a dédiée plus de 50% de son production à l'exportation permettant que l'Algérie passe du stade importateur au stade exportateur. Pour renforcer sa place dans le marché international, MFG a installé une deuxième ligne de production en 2016 mais l'ancienne ligne reste en marche jusqu'à nos jours dépassant la durée de vie de la majorité de ses équipements et donc la nécessité de non seulement le contrôle strict des différents paramètres liés au procès mais aussi la surveillance des paramètres liés au flux entrant.

Ce chapitre sera consacré à la présentation de la première ligne qui est choisie à cause de son état actuel dégradé et à la compréhension de notre système étudié en connaissant ces composants et les conditions pour lesquelles son fonctionnement est assuré.

4.1Présentation de la ligne Float.1

4.1.1 Atelier de composition

Cet endroit est destiné à la préparation de la matière première où nous trouverons des équipements de levage, pesage et de mélange.

Nous trouvons dans cet atelier en premier la zone de stockage des différentes matières y compris le sable, ce dernier est placé dans une trémie après son traitement et transporté pour un stockage d'une courte durée par un élévateur vers des silos où l'alimentation est assurée par l'intermédiaire des balances électroniques situés à la partie inférieure des silos, de différentes échelles adaptées aux quantités nécessaires des matières premières. Le mélange bien choisi est dirigé vers un pré-mélangeur à l'aide d'une bande transporteuse pour être homogénéisé et transporté par la suite vers des enfourneuses pour être fusionné.

4.1.2 Four de fusion

Le four de fusion d'Algérie est un four à flamme transversale avec une capacité de fusion de 600 t/j. Il est prévu six paires de brûleurs et utilise le gaz naturel comme combustible principal. Il est composé d'un ensemble des enfourneuses, de partie de fusion, de gorge, de partie de refroidissement.

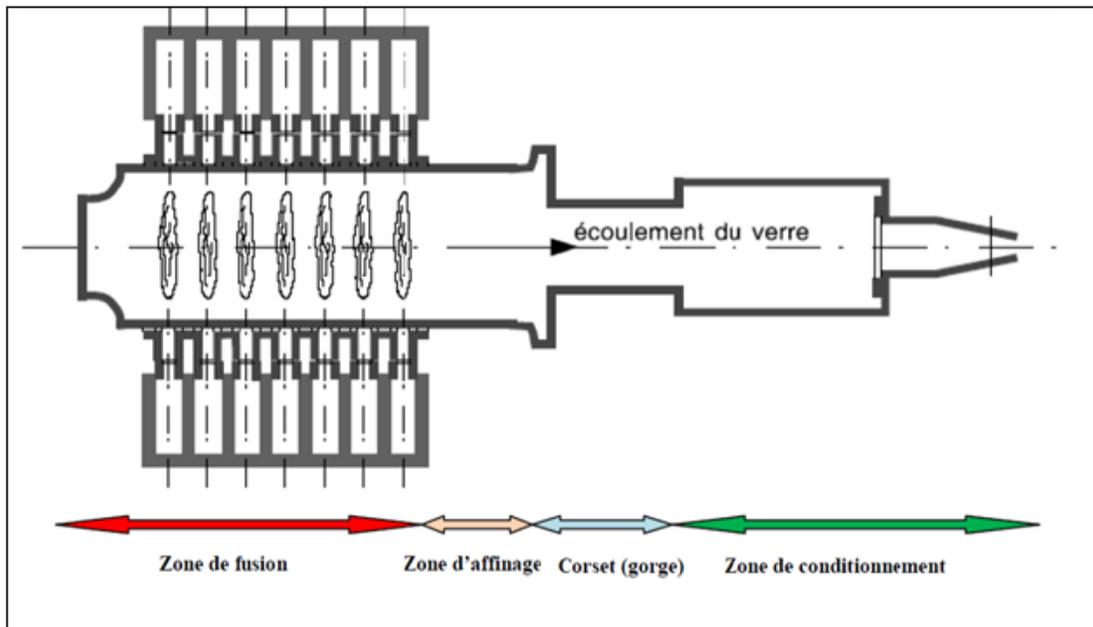


Figure 4- 1: Les différentes zones de four.

a. Zone de fusion

C'est la zone où la charge vitrifiable se transforme en liquide par l'intermédiaire de la chaleur cédée par la combustion assurée par des brûleurs, chaque brûleur est composé de trois injecteurs sauf le dernier possède deux injecteurs. Elle comporte plusieurs parties complémentaires entre elles (corps de fusion, chambres régénératrices, système d'inversion, carneaux principal et secondaires).

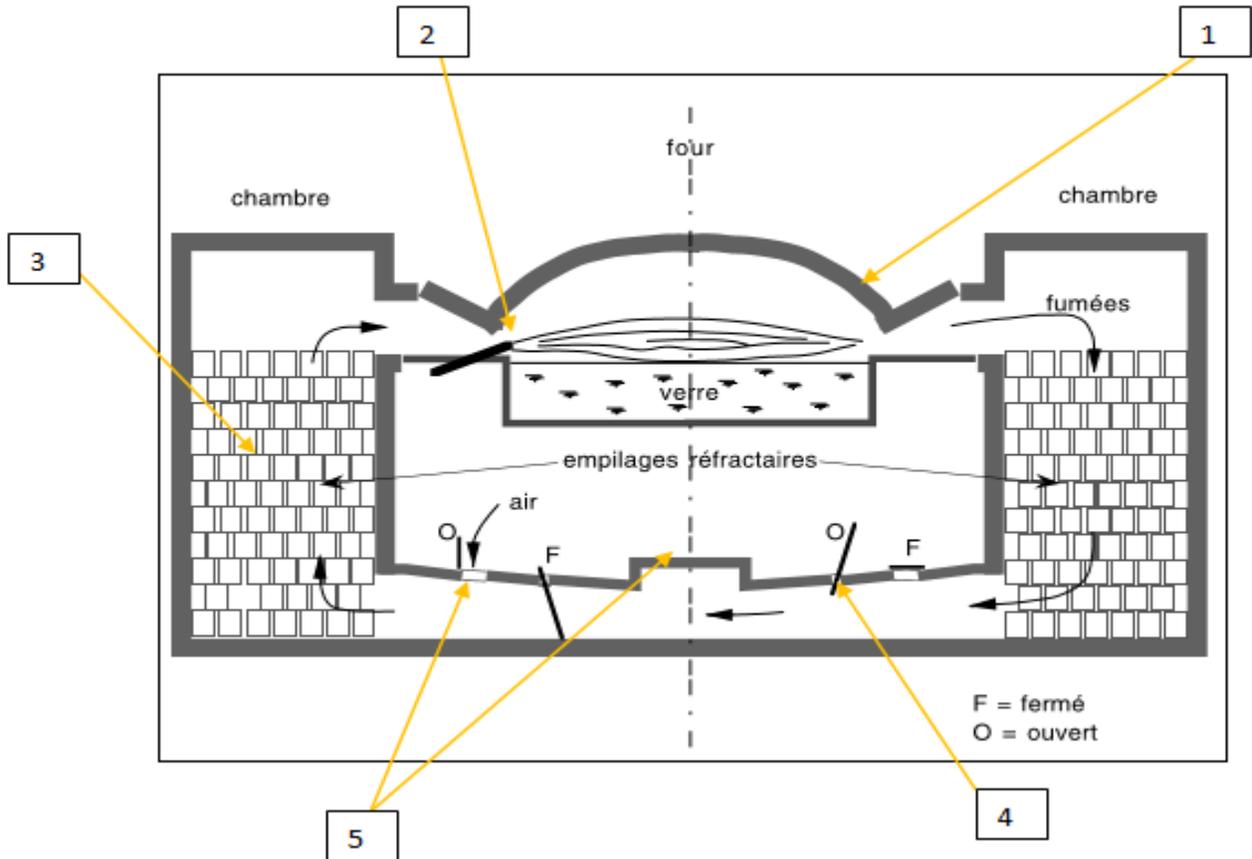


Figure 4- 2: Four à flammes transversales.

- 1-Corps de four.
- 2-Brûleurs.
- 3-Chambre régénératrice.
- 4-Système d'inversion.
- 5-Carneaux principales et secondaires.

- **Corps du four**

C'est la partie où se produit la fusion du verre. Il est constitué d'une voûte en briques de silice et des parois en briques AZS. Cette fusion est assurée par les flammes qui sont formées grâce aux six brûleurs (trouvés dans des ports au niveau des parois du four).

- **Chambre régénératrice**

C'est le lieu où se fait le transfert thermique entre les fumées chaudes et les briques d'empilage en silice qui servent à augmenter la surface d'échange thermique entre ces deux derniers. Cette température est transférée par la suite à l'air de combustion avant qu'il entre dans le four pour assurer une bonne combustion.

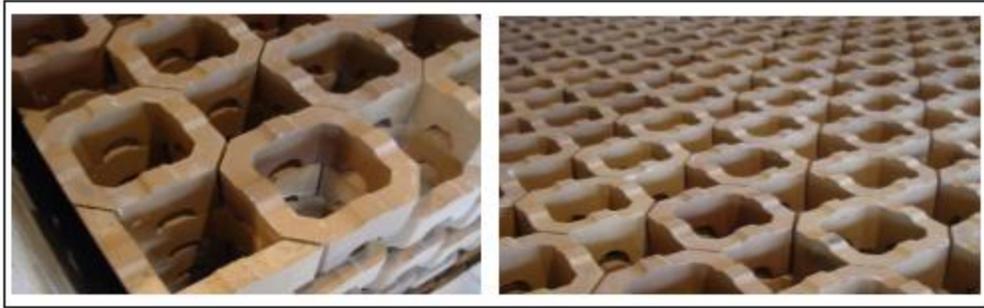


Figure 4- 3: Brique d'empilage du four MFG.

- **Système d'inversion**

L'inversion est assurée par un système mécanique qui permet d'inverser la flamme de part et d'autre chaque **20min** pour garantir que la fusion de verre soit équitable des deux cotés du bassin de fusion.

- **Carneaux principal et secondaires**

Les carneaux secondaires sont des conduites qui servent à acheminer les fumées et l'air de combustion ; l'air de combustion d'un côté pour qu'il puisse entrer dans le four de fusion et les fumées de l'autre côté pour les évacuer vers la cheminée.

Après que les fumées sont sorties de carneau secondaire, elles sont évacuées dans une longue conduite appelé carneau principal vers une cheminée d'une longueur de **82 m**.

b. Zone d'affinage

Elle s'étale de dernier port jusqu'à la gorge. C'est au niveau de cette zone que les bulles d'air contenant dans le verre fondu sont libérées et donc le dégazage du verre est assuré.

c. La gorge

Elle est considérée comme la zone de travail où nous pouvons intervenir pour le réglage de débit de verre. Des équipements permettant l'homogénéisation (**07 malaxeurs**) et le l'élimination des impuretés (**Barrage métallique**) sont placés à ce niveau et sont refroidis par écoulement d'eau froide à l'intérieur des équipements eux-mêmes.

Le système de malaxage vertical est composé par trois grandes parties : sept malaxeurs verticaux, moteur d'entraînement et un dispositif de réglage de vitesse de rotation.

D'ordinaire la vitesse de rotation est de **10à18 tours/min**. Plus la vitesse de rotation est rapide, l'agitation pourra apporter des bulles d'air dans le verre, Plus la vitesse de rotation est lente, l'agitation pourra réduire l'homogénéisation.

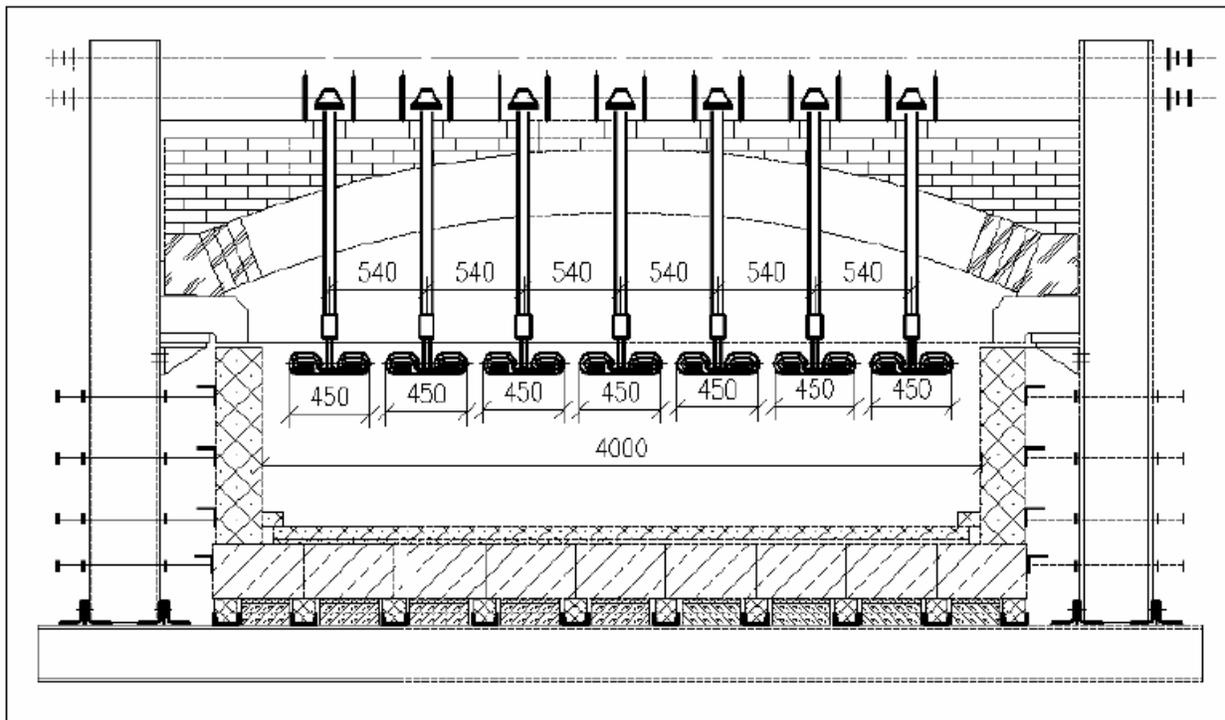


Figure 4- 4: Schéma présentant les sept malaxeurs.

d. Zone de conditionnement

Cette zone (appelée aussi bassin de repos) est comprise entre la gorge et le bain d'étain. Son rôle est de conditionner le verre à une température de 1100°C environ par injection d'air de dilution. Le but de le refroidir est de pouvoir être façonné au bain d'étain.

4.1.3 Bain d'étain

Une installation de 60m de longueur et de 7.6m de largeur qui contient environ 200 t d'étain fondu pour une durée de vie estimée de 10 ans, l'atmosphère de bain est composée essentiellement de l'azote et l'hydrogène avec des pressions bien définies dont la consommation est respectivement **1600 m³/h** et **130 m³/h**[3].

Le verre se flotte sur l'étain à cause de la différence de densités. Ces deux ne réagissent pas entre eux et restent séparés, leur résistance mutuelle rend la surface du verre parfaitement lisse.

Ce bain d'étain est composé par des structures métalliques inférieure et supérieure protégée par des briques spéciaux et d'un système de refroidissement afin d'empêcher des fuites non contrôlées d'étain.

La température à l'intérieur du bain d'étain est régulée par des résistances électriques placées au niveau de la voûte et les dimensions (épaisseur et largeur) du ruban du verre sont contrôlées par des top-rollers (roues dentées), des roues dentées tournant d'une vitesse donnée avec une pénétration bien précise choisie en fonction de l'épaisseur souhaité.

4.1.4 Etenderie

A sa sortie du bain d'étain, la feuille de verre est à une température d'environ **600°C**. Sa plasticité est donc encore assez faible, mais suffisante néanmoins pour être soulevée légèrement afin d'être placée sur un convoyeur à rouleaux. Celui-ci va entraîner la plaque de verre vers l'étenderie. Où le verre se refroidira de façon régulière et sous contrôle constant. Il acquiert vers **500°C** les propriétés d'un solide parfaitement élastique. Et c'est à cette température qu'est effectuée la recuisons qui permet de stabiliser ces propriétés.

Plusieurs ventilateurs et équipements de chauffage ainsi des moyens de mesures de température sont installés pour le contrôle strict de régime de refroidissement.

4.1.5 La découpe

Après que le verre sort de bout chaud, il se retrouve au bout froid où il sera coupé en plateaux de superficies standard et débordé automatiquement. A l'aide des releveuses à ventouses, les plaques sont placées verticalement sur des chevalets.

4.2 Choix du système étudié

Nous avons comme système à étudier, l'atelier de préparation de matière première et la fonderie (**four de fusion et bain d'étain**). Nous avons choisi cette zone car elle présente plus des risques par rapport aux autres à cause des conditions régnantes de haute température et de haute pression. En plus de ces conditions difficiles à maîtriser, nous avons la présence des différents équipements utilisés dans le procès et qui doivent être entretenir et sous surveillance.

Elle est considérée comme la zone où elles sont réalisées les deux opérations les plus importantes dans la fabrication du verre : **Lafusion et le façonnage**. Ces deux opérations définissent le comportement de la plaque du verre au niveau de l'étenderie et la zone de découpe c'est-à-dire qu'elles définissent les caractéristiques du notre verre.

Comme il est mentionné ci-dessus, la zone choisie comprend aussi l'atelier de préparation de la matière première où se fait le mélange de toutes les matières entrantes dans la production du verre qui doivent respecter certains critères y comprises l'humidité et la température du sable.

Ces deux paramètres ne sont pas contrôlés d'une manière efficace au niveau de MFG. Donc nous allons proposer un dispositif qui va rendre ces deux paramètres faciles à accéder et à contrôler.

Ce dispositif est un **séchoir rotatif** qui va diminuer le taux d'humidité et augmenter la température du sable à une valeur bien défini qui assure la bonne fusion du verre et donc une meilleure qualité du produit fini.

Dans ce qui suit, nous allons calculer toutes les dimensions de séchoir et son mécanisme d'entraînement.

4.3 Dimensionnement du séchoir rotatif proposé

Un sécheur rotatif a deux fonctions distinctes ; il sert comme convoyeur et comme dispositif de séchage. Les solides présentés à l'extrémité supérieure se déplacent vers l'extrémité inférieure ou de décharge à l'aide de la position des viroles assurée par l'inclinaison fixée durant la conception. Selon l'arrangement pour le contact entre le gaz de séchage et les solides, un sécheur peut être à co-courant ou contre-courant. Un ensemble de pelles de soulèvement est installé à l'intérieur du cylindre rotatif pour soulever les solides afin d'assurer le contact avec le gaz.

Le pelletage désigne l'équipement interne du sécheur rotatif. Son rôle est de brasser le produit, de le faire progresser le long du tube et de créer une pluie de particules aussi uniforme que possible de manière à obtenir de bons transferts thermiques. Il n'existe pas de règle générale pour définir un pelletage. C'est sur ce point que l'expérience du fabricant se manifeste pleinement.

De plus, un bon pelletage doit prendre en compte l'évolution des caractéristiques du produit le long du sécheur.

La hauteur des pelles dépend du taux de remplissage. Elle est dans la plupart des cas comprise entre $D/12$ et $D/8$. Leur nombre sur une section varie entre 6 et 10, D étant exprimé en mètres.

Pendant que le sécheur tourne, des solides sont pris par les pelles, soulevés pour une certaine distance autour du tambour et versés par l'air dans un rideau de cascade [26]. La majeure partie du séchage se produit dans cette phase de transport du solide, car les solides sont en contact étroit avec le gaz [16].

4.3.1 Bilan énergétique

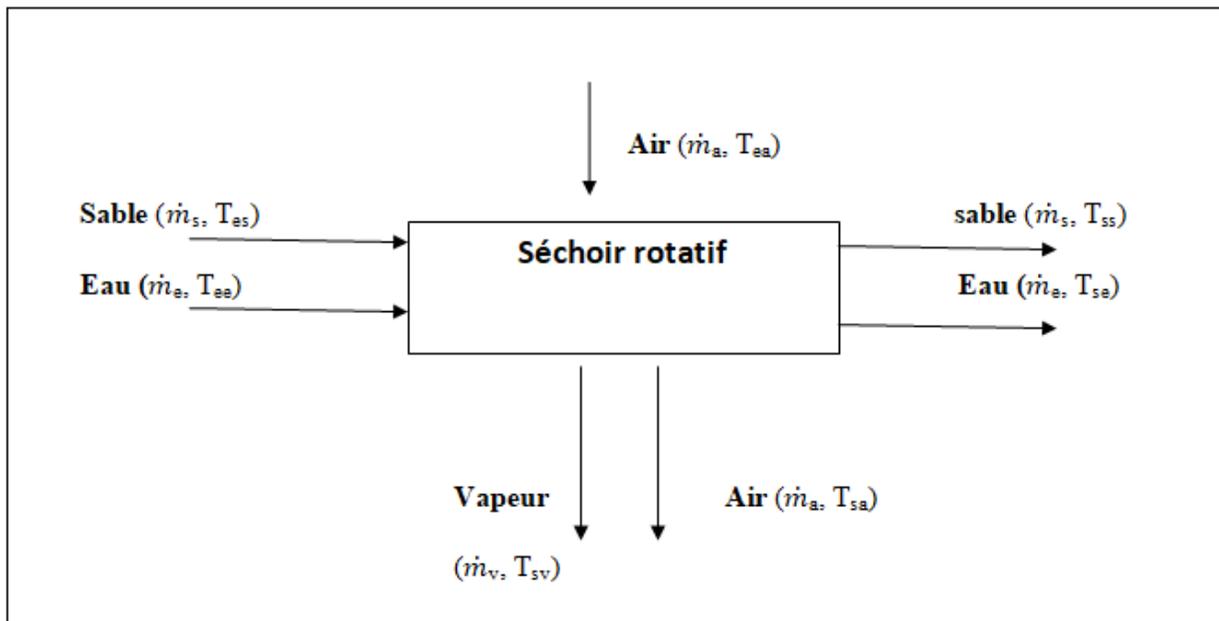


Figure 4- 5: Flux entrant et sortant du séchoir rotatif.

Pour dimensionner notre séchoir, il faut avoir tous les paramètres nécessaires. Parmi ces paramètres, les débits du sable et débit d'air chaud entrant dans le séchoir.

Pour les calculer, nous allons établir un bilan énergétique qui met en évidence tous les débits entrants et sortants du séchoir.

D'après la figure 4-5 ci-dessus, nous avons comme résultats le bilan suivant :

$$\dot{m}_s h_{se} + \dot{m}_{ee} h_{ee} + \dot{m}_a h_{ae} = \dot{m}_s h_{ss} + \dot{m}_{es} h_{es} + \dot{m}_a h_{as} + \dot{m}_v h_v (1)$$

$$\dot{m}_s (h_{se} - h_{ss}) = \dot{m}_a (h_{as} - h_{ae}) + \dot{m}_{es} h_{es} - \dot{m}_{ee} h_{ee} + \dot{m}_v h_v \quad / \mathbf{h} = \mathbf{C}_p \times \mathbf{T}$$

$$\dot{m}_s C_{ps} (T_{se} - T_{ss}) = \dot{m}_a C_{pa} (T_{as} - T_{ae}) + \dot{m}_{es} C_{pe} T_{es} - \dot{m}_{ee} C_{pe} T_{ee} + \dot{m}_v C_{pv} T_v (2)$$

Où :

\dot{m}_s : Débit de sable (Kg/s).

$\dot{m}_{ee}, \dot{m}_{es}$: Débits d'eau d'entrée et de sortie (Kg/s).

\dot{m}_a : Débit d'air (Kg/s).

\dot{m}_v : Débit de vapeur (Kg/s).

T_{se}, T_{ss} : Température entrée, sortie du sable (K).

T_{ae}, T_{as} : Température entrée, sortie d'air (K).

T_{ee}, T_{es} : Température entrée, sortie d'eau (K).

T_v : Température de vapeur (K).

C_{ps} : Capacité thermique massique de sable= 794 J/Kg.K.

C_{pa} : Capacité thermique massique d'air= 1104 J/Kg.K.

C_{pe} : Capacité thermique massique d'eau= 4185 J/Kg. K.

C_{pv} : Capacité thermique massique de vapeur =1900 J/Kg. K.

4.3.2 Calcul des débits

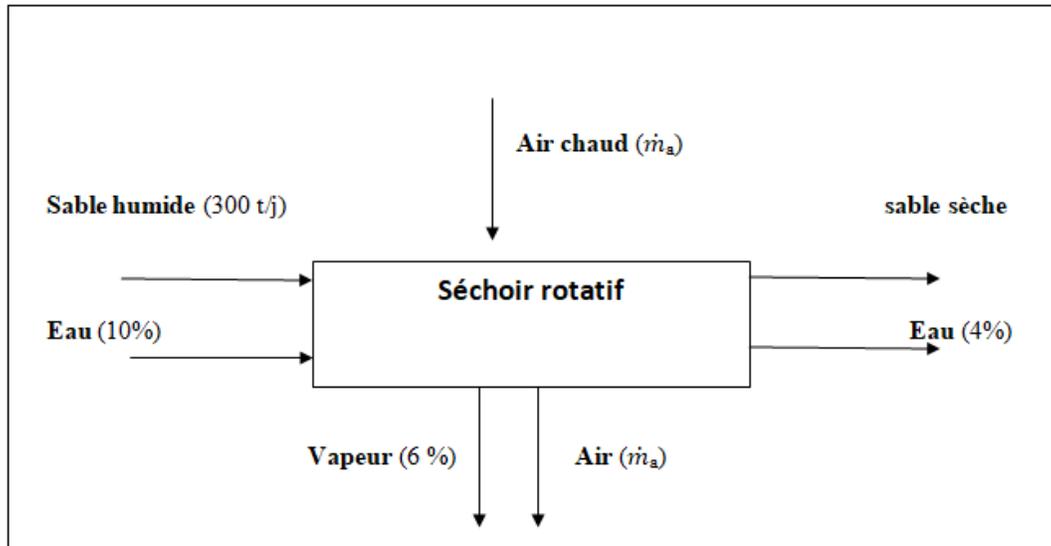


Figure 4- 6: Valeurs d'humidité du sable à l'entrée et à la sortie du séchoir.

- **Calcul du débit d'air**

Pour calculer le débit d'air chaud entrant dans le séchoir, nous allons utiliser l'expression du débit spécifique qui est donnée par :

$$G = \frac{\dot{m}_a}{D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 3600} \quad (3)$$

Le débit d'air spécifique G varie selon les produits à traiter et, notamment, en fonction de leur granulométrie. En général G pour le sable, il est proche de $1,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [16].

Le diamètre d'un séchoir rotatif est généralement varié entre **0.3-5 m** et a une longueur qui varie entre **3-90 m** [26]. Ces paramètres sont déterminés généralement par l'expérience mais comme nous n'avons pas les moyens pour la réaliser, nous allons choisir le minimum initialement pour calculer les débits.

A partir de l'équation (3), nous tirons l'expression de \dot{m}_a :

$$\dot{m}_a = G \times D^2 \times \frac{\pi}{4} \times 3600 \quad (3)$$

Alors le débit d'air chaud entrant est égal :

$$\dot{m}_a = 457.812 \text{ kg/h}$$

Pour le calcul de débit de sable, nous avons besoin des autres débits entrants et sortants du séchoir en fonction de celui-ci afin de simplifier le bilan énergétique ci-dessus.

- **Calcul des débits d'entrée et de sortie d'eau**

Comme la quantité d'eau contenue dans le sable à l'entrée est de 10%, le débit d'eau d'entrée sera égal à :

$$\dot{m}_{ee} = 0.1 \times \dot{m}_s$$

Nous faisons la même chose pour le débit de sortie mais avec une quantité d'eau de 4% :

$$\dot{m}_{es} = (\dot{m}_s + \dot{m}_{es}) \times 0.04 \quad \rightarrow \quad 0.96\dot{m}_{es} = 0.04 \dot{m}_s$$

$$\dot{m}_{es} = 0.042\dot{m}_s$$

- **Calcul du débit de vapeur**

Le débit de vapeur est la différence entre le débit d'eau d'entrée et le débit d'eau de sortie, donc :

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{ee} - \dot{m}_{es} = 0.1 \times \dot{m}_s - 0.042\dot{m}_s$$

$$\dot{m}_v = 0.058 \dot{m}_s$$

- **Calcul du débit de sable**

D'après l'équation (2) et en remplaçant les paramètres calculés, nous tombons sur l'expression suivante :

$$\dot{m}_s C_{ps} (T_{se} - T_{ss}) = \dot{m}_a C_{pa} (T_{as} - T_{ae}) + 0.042 \dot{m}_s C_{pe} T_{es} - 0.1 \dot{m}_s C_{pe} T_{ee} + 0.058 \dot{m}_s C_{pv} T_v \quad (4)$$

Enfin nous trouvons :

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_a c_{pa}(T_{as} - T_{ae})}{c_{ps}(T_{se} - T_{ss}) - 0.042 c_{pe} T_{es} + 0.1 c_{pe} T_{ee} - 0.058 c_{pv} T_v} \quad (5)$$

Tel que :

$T_{se} = 10$ °C (C'est la température d'hiver et en plus le sable est stocké dans un milieu obscur).

$T_{ss} = 35$ °C (Une valeur déterminée par l'expérience au niveau de MFG, pour garantir la qualité de verre).

$T_{as} = 50$ °C (On la prend par hypothèse).

$T_v = 100$ °C.

$T_{ee} = 10$ °C.

$T_{es} = 35$ °C.

$T_{ae} = 300$ °C (Comme la température de l'entrée de cheminée est comprise entre 450-500 °C et à cause de transfert de chaleur à travers la cheminée et la canalisation qui assure le cheminement des fumées jusqu'à l'entrée du séchoir, la température va s'abaisser jusqu'à 300 °C).

D'après l'équation (5), la valeur de débit de sable sera égale :

$$\dot{m}_s = 3848 \text{ Kg/h}$$

4.3.3 Dimensions du séchoir rotatif

Chaque séchoir rotatif est caractérisé par des paramètres bien précis parmi lesquels : le diamètre, la longueur, la vitesse de rotation et le temps de séjour du produit à sécher dans le séchoir. Leur calcul est lié fortement au mode de transfert de chaleur à l'intérieur du séchoir qui est dans notre cas, un transfert par convection.

• **Détermination du coefficient d'échange volumique**

Pour calculer ces paramètres, nous avons besoin du coefficient d'échange volumique moyen \bar{U} (en $W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$) est défini par la formule suivante :

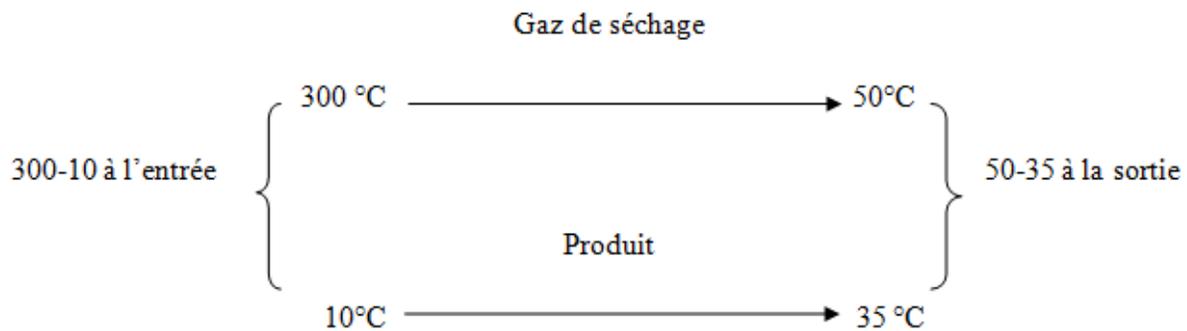
$$\bar{U} = \frac{Q_G}{V_T \Delta T_m} = \frac{\dot{m}_a c_{pa} (T_{ae} - T_{as})}{D^2 L \frac{\pi}{4} \Delta T_m} \quad (6)$$

Tel que :

Q_G (W) : Quantité de chaleur cédée par le gaz de séchage par unité de temps,

V_T (m³) : Volume d'un tube sécheur,

D et L : Diamètre et longueur du cylindre rotatif du séchoir.



ΔT_m : Écart moyen de température entre le gaz de séchage (air) et le produit, il est donné par l'expression suivante :

Donc :

$$\Delta T_m = \frac{290 - 15}{\ln\left(\frac{290}{15}\right)}$$

Alors :

$$\Delta T_m = 92.85 \text{ °C}$$

Passons au calcul de \bar{U}

D'après l'équation (6) nous avons :

$$\bar{U} = 1782.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

Le coefficient d'échange volumique est principalement lié au débit d'air et au diamètre du sécheur par la formule de **Friedman et Marshall** :

$$\bar{U} = k \frac{G^n}{D}$$

Où :

G ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$): Débit d'air spécifique.

K : Un coefficient qui dépend du nombre et la forme des pelles, tiré de l'équation de **Friedman et Marshall** :

$$k = \frac{\bar{U}}{\left(\frac{G^n}{D}\right)} = \frac{1782.6}{\left(\frac{1.8^{2/3}}{0.3}\right)} = 361.4$$

$$k = 361.4$$

- **Calcul des dimensions du séchoir**

- **Le diamètre**

La quantité de sable humide utilisé dans la production de 300 tonnes/j qui contient 10% d'eau

Donc la quantité d'eau dans 300 t du sable doit être égale à :

$$300 \times 0.1 = 30 \text{ t/j.}$$

$$\leftrightarrow \text{quantité de sable sèche} = \frac{(300 - 30) \text{ tonnes}}{j} = 11250 \text{ kg/h.}$$

Nous considérons que le débit d'air est proportionnel au débit de produit à traiter, alors le débit massique d'air chaud sera égal :

$$\dot{m} = 457.812 \times \frac{11250}{3848} = 1338.46 \text{ kg/h} = 0.37 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = 0.37 \text{ kg/s}$$

Le diamètre de séchoir est tiré de la relation de débit spécifique :

$$G = \frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times D^2} \Leftrightarrow D = \sqrt{\left(\frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times G}\right)}$$

$$D = 0.51m$$

- **La longueur**

Nous calculons au nouveau le coefficient d'échange thermique \bar{U} en prenant en considération le diamètre calculé :

$$\bar{U} = k \frac{G^n}{D} = 361.4 \frac{1.8^{2/3}}{0.51} = 1048.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}.$$

$$\bar{U} = 1048.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Selon la relation (6) du coefficient d'échange thermique :

$$L = \frac{\dot{m} C_{pa} (T_{ae} - T_{as})}{\frac{\pi}{4} D^2 \bar{U} \Delta T_m}$$

$$L = 5.13 \text{ m}$$

• **Détermination du temps de séjour**

Le temps de séjour est le temps nécessaire pour sécher la quantité entrante dans le séchoir (qui égale à **3848 kg/h**), il est donné par l'expression suivante :

$$t = \frac{V_p \rho_{app}}{\dot{m}_s} \frac{1}{60} = \frac{D^2 \frac{\pi}{4} L \xi \rho_{app}}{60 \dot{m}_s}$$

Avec :

V_p : Le volume de produit à sécher.

ρ_{app} : La masse volumique apparente du produit à sécher.

ξ : Le coefficient de remplissage, $\xi = V_p/V_T$, il varie entre 0.1 et 0.3.

Nous avons pris la moyenne c'est-à-dire $\xi = 0.2$

$$t = \frac{0.51^2 * \pi * 5.13 * 0.2 * 1540}{4 * 3848} = 0.083 \text{ h} = 5 \text{ min}$$

$$t = 5 \text{ min.}$$

- **Extrapolation des paramètres mécaniques**

- **Vitesse de rotation**

Le calcul de la vitesse de rotation se fait sur la base de la vitesse périphérique. Celle-ci s'exprime de la façon suivante :

$$U_p = \pi N D \quad (7)$$

Avec : U_p ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) : Vitesse périphérique de la virole.

N ($\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$) : Vitesse de rotation.

D (m) : Diamètre de la virole.

La vitesse périphérique est une caractéristique variant d'un constructeur à l'autre. Elle dépend non seulement du produit à sécher, mais aussi des équipements internes du tube.

Pour le diamètre $D = 0.3$ m (diamètre pris par hypothèse), la vitesse de rotation $N = 16$ tr/min (Prouvée par l'expérience) [16].

Donc :

$$U_p = 16 * 0.3 * \pi = 15 \text{ m. min}^{-1}$$

Donc pour le diamètre calculé $D = 0.51$ m nous avons d'après l'équation (7) :

$$N = 9.36 \text{ tr/min}$$

- Inclinaison du tube du sécheur

C'est la pente du cylindre rotatif, conjuguée à la vitesse de rotation de celui-ci, qui permet l'avancement du produit dans le sécheur.

La pente du cylindre est déduite des autres caractéristiques du sécheur par la formule suivante :

$$t = 0.23 \frac{L}{D} \frac{1}{P} \frac{1}{N^{0.9}} \pm 1.97 \frac{BLG}{F}$$

Avec :

- t (min) : Temps de séjour dû à la rotation,
- L (m) : Longueur de la virole,
- D (m) : Diamètre de la virole,
- P : Pente du tube, c'est-à-dire tangente de l'angle que fait la virole avec l'horizontale,
- G ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) : Débit spécifique d'air,
- B (m^{-1}) : Constante dépendant de la granulométrie $B = 5(\overline{d_p})^{-0.5}$, dans laquelle d_p (μm) est le diamètre moyen des particules,
- N ($\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$) : Vitesse de rotation,
- F ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) : Débit spécifique de produit entrant dans le sécheur.

La désignation des signes \mp

Le **signe (+)** dans la formule ci-dessus correspond à une circulation opposée de l'air et du produit dans le sécheur (**contre-courant**).

Le **signe (-)** correspondant à une circulation à **co-courant**.

Calcul du coefficient B

La constante B est donné par la relation suivante : $B = 5(\overline{d_p})^{-0.5}$

La taille moyenne de sable est de **500 μm** (donnée de l'entreprise), le coefficient B sera égal à :

$$B = 0.223 \text{ m}^{-1}$$

Détermination du nouveau débit spécifique d'air

$$G = \frac{\dot{m}}{D^2 \frac{\pi}{4}}$$

$$G = 1.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Détermination du débit spécifique de produit entrant dans le sécheur

$$F = \frac{11250 \times 4}{3600 \times (0.51)^2 \times \pi} = 15.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Le deuxième terme de l'équation permettant de calculer l'erreur sur le temps de séjour dans le séchoir :

L'appareil fonctionnant à co-courant, le temps de séchage sera égal à :

$$t_s = t - 1.97 \times \frac{BLG}{F}$$

Donc :

$$t_s = 4.73 \text{ min}$$

Enfin, nous allons déterminer la pente qui sera égale à :

$$P = \frac{0.23 \times L}{D} \times \frac{1}{N^{0.9}} \times \frac{1}{t_s}$$

$$P = 0.065 = 3.71^\circ$$

C'est une valeur acceptable par rapport au temps de séjour du produit dans le séchoir.

4.3.4 Dimensionnement du mécanisme d'entraînement

Il existe trois types de dispositifs d'entraînement : A **chaîne**, à **courroies** ou par **engrenage**. Les courroies, comme les chaînes, sont des éléments flexibles qui permettent de transmettre la puissance lorsque l'arbre moteur et l'arbre entraîné sont éloignés l'un de l'autre. Une transmission par courroies ou par chaînes constitue une solution plus simple et plus économique qu'une

transmission par engrenages. Ces éléments se caractérisent par une élasticité qui permet d'absorber les chocs et les vibrations, ce qui contribue à rendre la transmission plus silencieuse et augmenter la durée de vie de l'équipement donc ils constituent le choix le plus judicieux.

Le cylindre rotatif repose sur deux supports en bronze et le mécanisme d'entraînement est assuré par deux poulies l'une est entraînée par l'autre à l'aide d'une courroie et montées sur un arbre lié au cylindre rotatif qui est à son tour, entraîné par le moteur électrique [27].

- **Calcul de la puissance nécessaire pour faire tourner le cylindre**
 - **Calcul du couple moteur**

Le cylindre rotatif est en contact en A et B à d'autres corps (le corps de séchoir d'un côté et un mécanisme d'entraînement d'un autre). Nous voulons calculer le couple résistant au niveau du point A (Contact avec le mécanisme d'entraînement) qui est donnée par la relation suivante :

$$C_r = N \times R$$

Avec :

R : le rayon du cylindre.

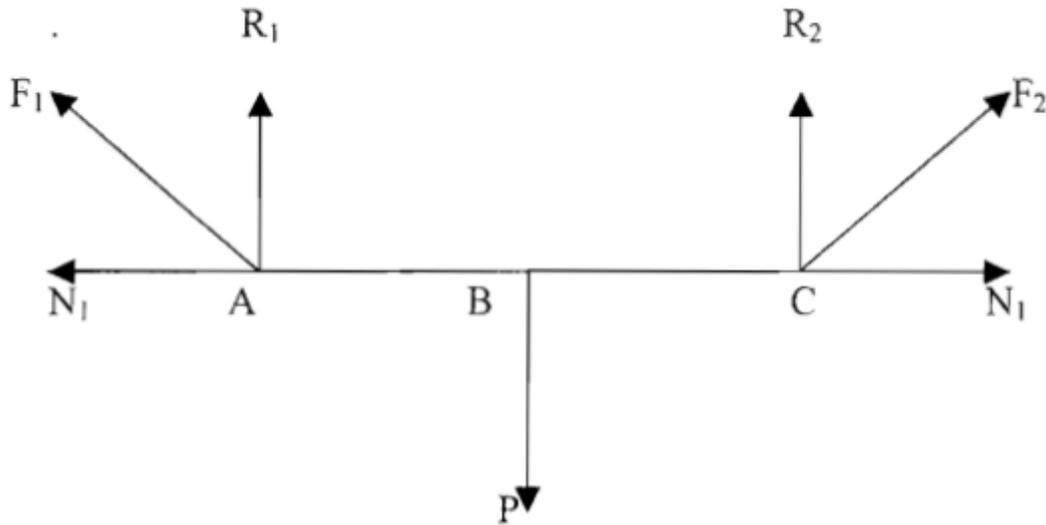


Figure 4- 7: Configuration des efforts sur le système.

- A, C : Les points de contacts avec d'autres Corps.
- B : Centre de gravité.
- F_1, F_2 : Les forces de frottements.
- N_1 : La force tangentielle.
- R_1, R_2 : Les forces normales supportées par le point de contact.
- P : La force de gravitation.

Nous avons : $P = R_1 + R_2$ et par symétrie, $R_1 = R_2$

Donc : $P = 2R_1 = 2R_2$

f : Coefficient de frottement est définis comme le rapport de la force tangentielle, sur la force normale supporté par le point de contact alors, $f = \frac{N_1}{R_1}$

D'après la figure 4-7, nous avons : $N = R \tan \theta$

Donc nous pouvons déduire que : $\tan \theta = f$

Donc : $N = f \times \frac{P}{2}$ où $P = mg$

Le coefficient de frottement f dépend des paramètres suivant :

- Couple matériaux.
- Lubrification.
- L'état de surface de matériaux.
- La température.

D'après le tableau **annexe 2** : nous prenons **$f=0.15$** [27]

Pour calculer la force de gravitation P , il faut calculer la masse totale en rotation c'est-à-dire la masse du cylindre rotatif et la masse du produit qui traverse le séchoir :

$$M_T = M_{cylindre} + M_e.$$

1. La masse du produit pour la durée de séchage égale a :

$$M_e = \frac{\dot{m}_s \times t_s}{60} = \frac{3848 \times 4.73}{60} = 303.35 \text{ kg}$$

2. La masse du cylindre :

D'après les calculs, nous avons trouvé le diamètre intérieur **$D_1=0.51\text{m}$** , nous considérons que le diamètre extérieur est **$D_2=0.55 \text{ m}$** .

Donc le volume intérieur du cylindre V_1 et le volume extérieur V_2 seront donnés par les relations suivantes :

$$V_1 = \frac{\pi}{4} \times L \times D_1^2 = 1.05 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{\pi}{4} \times L \times D_2^2 = 1.21 \text{ m}^3$$

Alors le volume du cylindre sera égal : **$V = V_2 - V_1 = 0.16\text{m}^3$** .

Nous avons choisi comme matériaux pour le cylindre l'acier dont la masse volumique est :

$$\rho_{acier} = 7800 \text{ kg/m}^3.$$

$$\text{Donc : } M_{cylindre} = \rho_{acier} \times V = 1248 \text{ kg.}$$

$$M_T = 1551.35 \text{ kg}$$

Avec les valeurs trouvées des masses, le couple résistant déterminé est de :

$$Cr=N \times R = \frac{f \times P \times R}{2} = \frac{f \times R \times g \times M_T}{2}$$
$$Cr= 313.88Nm$$

- **Calcul de la puissance motrice**

La puissance motrice du moteur est donnée par la relation suivante : $P_{a \text{ mot}} \geq \frac{P_{ared}}{\eta}$

Où la puissance admissible au niveau du réducteur de vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_{ared} = \frac{C_a \times \omega}{\eta}$$

Tel que :

C_a : Couple admissible au niveau du réducteur qui doit être supérieur ou égal $2 \times Cr$

ω : La vitesse angulaire $= \frac{2 \times \pi \times N}{60}$.

Nous choisissons un rendement du réducteur de $\eta=0.9$ donc la puissance admissible au niveau du réducteur sera égale à :

$$P_{ared} \geq 2 \times 313.88 \times \frac{2 \times \pi \times 9.36}{60 \times 0.9} = 683.68 \text{ W.}$$
$$P_{ared} \geq 683.68 \text{ W.}$$

Donc la puissance au niveau du moteur $P_{a \text{ mot}} \geq 759.64 \text{ W.}$

D'après les résultats que nous avons trouvés et à partir de la valeur de la puissance motrice ; nous choisissons un moteur monophasé avec les caractéristiques suivantes :

Tableau 4- 1: Caractéristique du moteur monophasé choisie.

| | |
|---------------------------------------|--------|
| Puissance nominale (W) | 844 |
| Tension/ fréquence (V/Hz) | 230/50 |
| Intensité nominale (A) | 4.58 |
| Vitesse de rotation du rotor (tr/min) | 1450 |
| Nombre de paires de pôles | 2 |

Justification des paramètres choisis

- La puissance nominale

La relation entre la puissance nominale du moteur et la puissance motrice (ou bien utile) est la suivante :

$$\frac{P_u}{P_n} = \eta_{mot}$$

Nous fixons le rendement du moteur à 0.9 et $P_u = 759.64 \text{ W}$ (calculée au-dessus).

Alors la puissance nominale électrique que nous devons fournir au moteur est égale :

$$P_n = \frac{P_u}{\eta_{mot}} = 844 \text{ W.}$$

$$\mathbf{P_n = 844W.}$$

- L'intensité nominale

Pour un moteur monophasé synchrone, l'intensité nominale et la puissance nominale sont liées par la relation suivante :

$$P_n = UI_n \cos \varphi$$

Généralement le $\cos \varphi = 0.8$ pour le moteur monophasé synchronisé ;

Donc l'intensité nominale sera égale :

$$I_n = \frac{P_n}{U \cos \varphi} = \frac{844}{230 \times 0.8} = 4.58A$$

$$I_n = 4.58A$$

Comme le tableau 4-1 le montre, la vitesse de rotation du rotor est de 1450tr/min, il tourne très vite mais sa force est faible. Par contre, la vitesse de rotation du cylindre rotatif est de 9.36 tr/min.

Pour garantir que la vitesse élevée du moteur n'affecte pas le fonctionnement du séchoir, nous allons mettre en place un réducteur de vitesse avec un facteur de 1/50 qui va diminuer la vitesse du moteur à 29tr/min et augmenter sa force (couple) en la multipliant fois 50 [27].

- **Calcul de la courroie de transmission**
 - **Nomenclature et géométrie de courroie**

Notre système de transmission est composé d'une poulie entrainante et une poulie entrainée, reliées entre eux par une courroie que nous allons déterminer son type par la suite.

La figure suivante illustre ce type des systèmes :

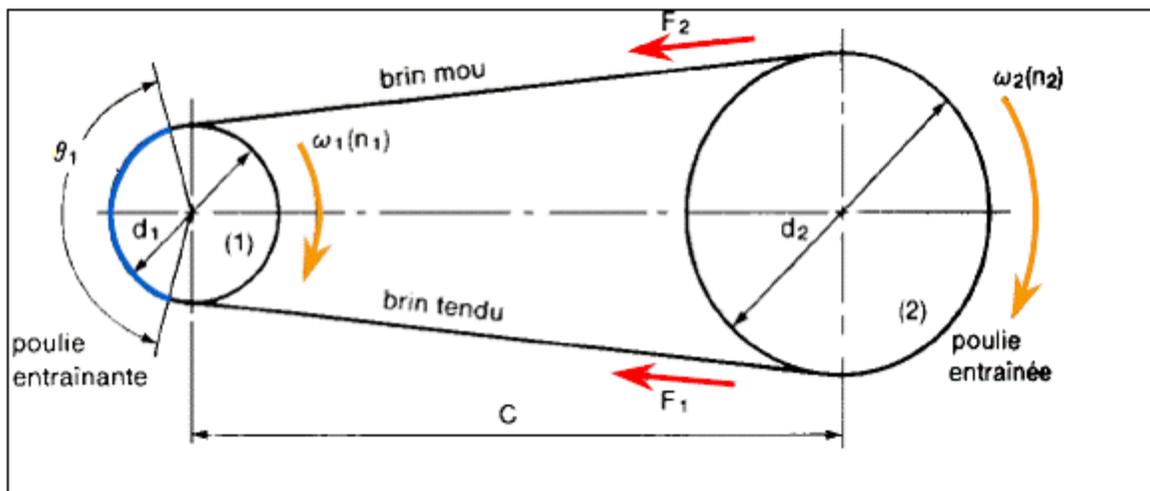


Figure 4- 8: Paramètres d'un système de transmission par courroie.

Les paramètres de ce système sont les suivants :

d_1 : Diamètre de la petite poulie (mm).

d_2 : Diamètre de la grande poulie (mm)

C : Entraxe (distance entre les axes de rotation des poulies, en mm).

n_1, n_2 : Vitesses de rotation respectives de la petite et de la grande poulie (tr/min).

ω_1, ω_2 : Vitesses angulaires des poulies (rad).

F_1 : Traction du brin moteur (N).

F_2 : Traction du brin entraîné (N).

θ_1, θ_2 : Angles de contact entre la courroie et les poulies, en degrés ($^\circ$) ou radians (rad)

f : Coefficient de frottement entre la courroie et les poulies.

v : Vitesse de la courroie (m/s).

Notre choix se porte sur une courroie trapézoïdale dont les caractéristiques sont les suivantes :

- La forme trapézoïdale de la courroie lui donne un bon contact sans glissement, avec les poulies, par principe mécanique de coincement.
- Un rendement élevé de 70 à 96 % lorsque le système de transmission est bien conçu.
- Durée de vie raisonnable (bonne résistance à la fatigue et l'usure).

La valeur de la puissance nominale que nous avons trouvée est égale à **844 W**, donc d'après le tableau 4-2 le type de la courroie le plus adéquat est le **type B**.

Tableau 4- 2 : Dimensionnement des courroies trapézoïdales classiques et SI classiques.

| Désignation | | Largeur b (po et mm) | Épaisseur e (po et mm) | Puissance transmise par courroie (hp et kW) | Diamètres normalisés des poulies (po et mm) | |
|---------------------|-----|----------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------|
| | | | | | minimal | Incrément |
| Système impérial | A | 0,50 | 0,31 | 0,2 à 5 | 2,6 | 0,2 |
| | B | 0,66 | 0,41 | 0,7 à 10 | 4,6 | 0,2 |
| | C | 0,88 | 0,53 | 1 à 21 | 7,0 | 0,5 |
| | D | 1,25 | 0,75 | 2 à 50 | 12,0 | 0,5 |
| | E | 1,50 | 0,91 | 4 à 80 | 18,0 | 1,0 |
| SI | 13C | 13 | 8 | 0,1 à 3,6 | 65 | 5 |
| | 16C | 16 | 10 | 0,5 à 7,2 | 115 | 5 |
| | 22C | 22 | 13 | 0,7 à 15,0 | 180 | 10 |
| | 32C | 32 | 19 | 1,3 à 39,0 | 300 | 20 |

* D'après la norme ANSI/RMA-IP-20-1977. Utilisation autorisée par la RMA.



- **Détermination des diamètres des poulies**

Nous avons fixé le coefficient de réduction de la vitesse à 1/50 afin d'avoir une vitesse de rotation de la poulie entrainante égale à 29 tr/min.

Le rapport de transmission R est défini comme :

$$R = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{29}{9.36} = 3.1$$

Le diamètre de la petite poulie, d_1 , pour un type de courroies B classique est compris entre **125** et **1120** mm (Annexe 3).

Nous allons prendre le minimum puisque nous avons besoin de fixer l'un des diamètres pour trouver l'autre, donc : **$d_1 = 125$ mm**

Par ailleurs, nous savons que le rapport de transmission de la courroie est donné par :

$$R = \frac{d_2}{d_1} = 3.1 = R$$

Alors

$$d_2 = 387.5400 \text{ mm}$$

- **L'angle d'enroulement**

L'angle d'enroulement de la petite poulie, comme le montre la figure 4-8 est donné par :

$$\Theta_1 = 180^\circ - 2 \sin^{-1} \left[\frac{d_2 - d_1}{2C} \right]$$

Pour le calculer, nous avons besoin de la valeur de l'entraxe C qui représente la distance entre les centres des deux poulies :

Pour un rapport de transmission $R = 3.1 > 3$ nous avons : $d_2 \leq C < 3(d_1 + d_2)$ [28]

Nous prenons donc $C = d_2 = 387.5 \text{ mm}$ pour le calcul :

Alors la valeur de l'angle d'enroulement sera égale à :

$$\Theta_1 = 140.4^\circ$$

- **Dimensionnement de la courroie d'entraînement entre le réducteur et le cylindre**

- **Calcul de la Puissance brute**

Pour obtenir une longue durée de vie de la courroie, avec une fiabilité acceptable, on peut évaluer la puissance brute P_r , à l'aide de l'équation empirique suivante : [27]

$$P_r = \left[C_1 \frac{C_2}{d_1} - C_3 (rd_1)^2 - C_4 \log (rd_1) \right] rd_1 + C_2 r \left[1 - \frac{1}{K_a} \right] \quad (8)$$

Les C_i sont des constantes de la section de la courroie, tirés du tableau 4-3 ci-dessous

Tableau 4- 3: Constantes utilisées pour calculer la puissance brute des courroies. [27]

| Désignation | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-------------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|
| A | 0,8542 | 1,342 | $2,436 (10)^{-4}$ | 0,1703 |
| B | 1,506 | 3,520 | $4,193 (10)^{-4}$ | 0,2931 |
| C | 2,786 | 9,788 | $7,460 (10)^{-4}$ | 0,5214 |
| D | 5,922 | 34,72 | $1,522 (10)^{-4}$ | 1,064 |
| E | 8,642 | 66,32 | $2,192 (10)^{-4}$ | 1,532 |
| 13C | $3,316 (10)^{-2}$ | 1,088 | $1,161 (10)^{-8}$ | $5,238 (10)^{-3}$ |
| 16C | $5,185 (10)^{-2}$ | 2,273 | $1,759 (10)^{-8}$ | $7,934 (10)^{-3}$ |
| 22C | $1,002 (10)^{-1}$ | 7,040 | $3,326 (10)^{-8}$ | $1,500 (10)^{-2}$ |
| 32C | $2,205 (10)^{-1}$ | 26,62 | $7,037 (10)^{-8}$ | $3,174 (10)^{-2}$ |

Pour les courroies de type B

$C_1=1.506$; $C_2=3.520$; $C_3=4.193.10^{-4}$; $C_4=0.2931$.

Et la constante r est donné par la relation suivante :

$r = \frac{n_1}{1000}$, la vitesse de la petite poulie (tr/min) divisé par 1000, soit :

$$r = 0.029$$

K_a : Facteur appliqué de correction qui dépend du rapport de transmission, tiré du tableau 4-4

Tableau 4- 4: Facteur appliqué de correction en fonction du rapport de transmission.

| $n1 / n2 = d2/d1$ | k_a |
|-------------------|---------|
| 1,00 à 1,01 | 1,00000 |
| 1,02 à 1,04 | 1,0112 |
| 1,05 à 1,07 | 1,0226 |
| 1,08 à 1,10 | 1,0344 |
| 1,11 à 1,14 | 1,0463 |
| 1,15 à 1,20 | 1,0586 |
| 1,21 à 1,27 | 1,0711 |
| 1,28 à 1,39 | 1,0840 |
| 1,40 à 1,64 | 1,0972 |
| 1,65 | 1,1106 |

Par ailleurs, nous savons que :

$R=3.1 > 1.65$, donc d'après la norme (ANSI-RMA-IP-20 : Norme pour les courroies trapézoïdales classiques) : $K_a= 1.1106$

Donc d'après la relation (8) :

$$P_r = 4.75 \text{ kW.}$$

- Calcul de la puissance nette

En pratique les conditions de fonctionnement seront différentes des conditions de calcul. La puissance calculée est corrigée par deux facteurs K_L (dépend de la longueur primitive) et K_θ (dépend de l'angle d'enroulement) nous avons alors :

$$P'_r = K_L \cdot K_\theta \cdot P_r$$

La Figure 4-9 indique que pour un angle d'enroulement de 140.4° , $k_\theta = 0.89$

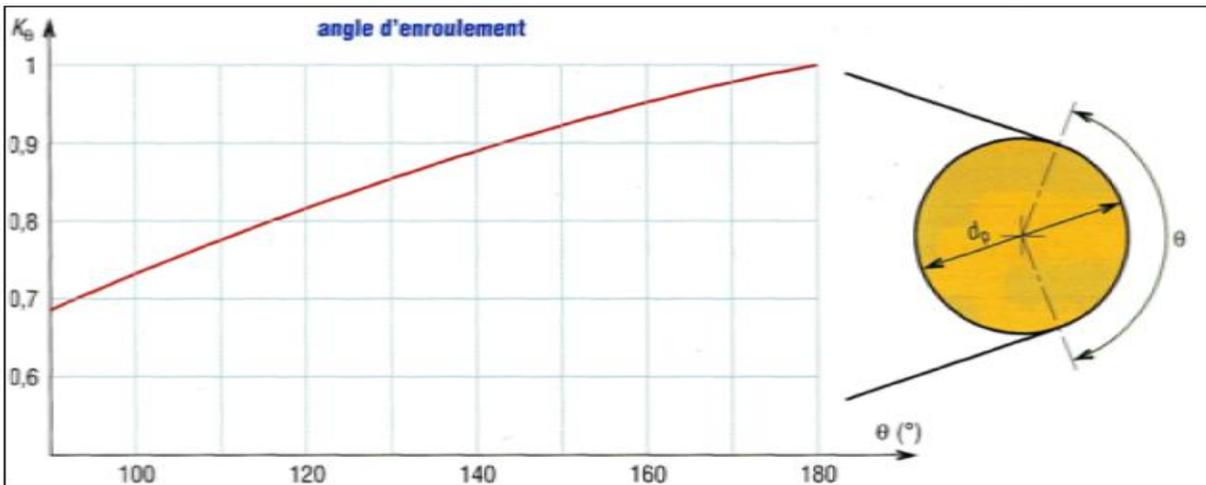


Figure 4- 9 : Coefficient de correction k_θ appliqué à l'angle d'enroulement.

Pour déterminer k_L , il faut calculer d'abord la longueur primitive de la courroie, qui est donnée par la relation suivante :

$$L_p = 2C + 1.57 (d_1 + d_2) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4C}$$

$$L_p = 1624.08 \text{ mm.}$$

La Figure 4-10, montre que pour une longueur primitive 1624.08 mm, $k_L = 0.94$.

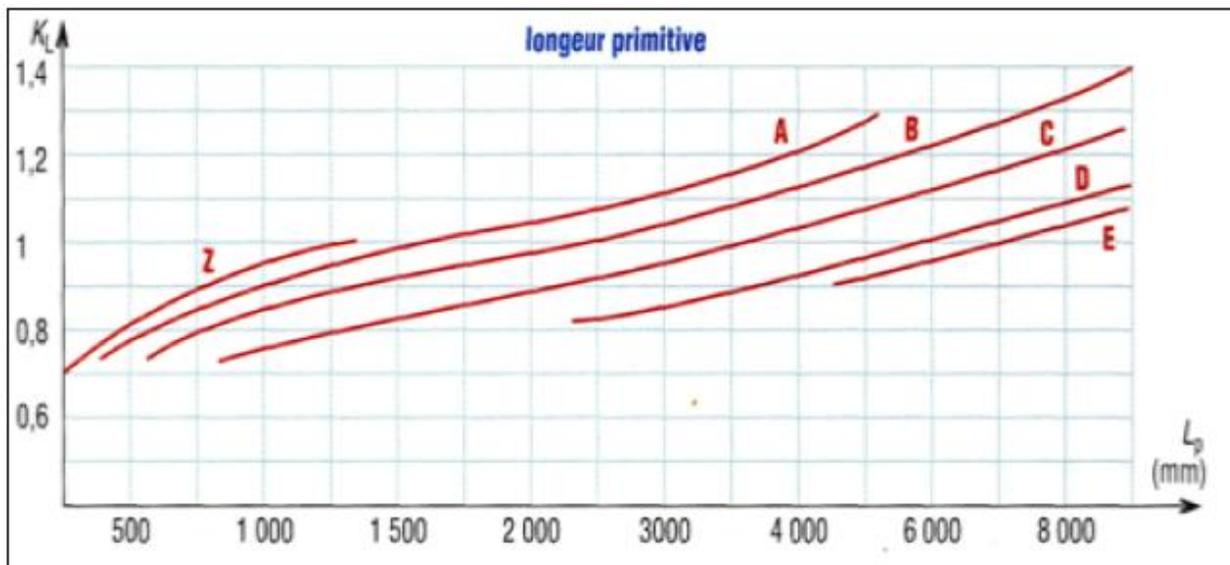


Figure 4- 10: Facteur de correction k_L appliqué à la longueur primitive.

La longueur interne de la courroie L_s est calculée par la relation suivante :

$$L_s = L_p - \Delta$$

Δ : Facteur de conversion en fonction de la section et de la longueur de la courroie

la valeur de $\Delta = 1.8 p_0 = 45.72 \text{ m}$ (L'annexe 4)

Nous obtenons donc :

$$L_s = 1578.36 \text{ mm}$$

- Normalisation de la longueur primitive

Pour un $k_L = 0.94$, la longueur normalisée la plus proche de L_p est 60 pouce = **1524 mm**, tirée du tableau dl'annexe 5.

Donc la valeur de la puissance nette : $P_r = 3.97 \text{ kW}$

• Calcul de la puissance effective

$$P' = k_s P_{a \text{ red}}$$

Nous avons une transmission uniforme sans à-coups et un service dur 16 à 24 h/jours, donc, le facteur de service $k_s = 1.4$ (l'annexe 6)

Donc :

$$P' = 0.95 \text{ kW}$$

• Calcul du nombre de courroie

Le nombre de courroie est donné par la relation suivante :

$$n_c = \frac{P'}{P_r} = \frac{0.95}{3.97} = 0.24$$

Donc il nous faut une seule courroie pour l'entraînement du cylindre.

• Calcul de l'entraxe final

Le choix des courroies de longueur normalisée modifie l'entraxe initial, donc la valeur finale de celui-ci est donnée par :

$$C = C' - \frac{B}{2C'}$$

Tel que :

$$C' = \frac{L_p - A}{2}$$

$$A = \frac{\pi}{2} (d_1 + d_2)$$

$$B = \frac{1}{4} (d_2 - d_1)^2$$

Donc la valeur de C devient :

$$C = 359.5 - \frac{17226.5}{2 \times 359.5} = 335.54 \text{ mm}$$

$$\mathbf{C = 335.54 \text{ mm}}$$

- **Calcul de la fréquence de passage**

La fréquence de passage (f_r) permet de considérer la fatigue causée par la flexion répétée durant l'enroulement, f_r est défini par l'équation suivante :

$$f_r = \frac{V}{L_p}$$

Avec :

$$V = \frac{\pi d_1 n_1}{60}, \text{ la vitesse de la petite poulie}$$

$$\mathbf{V = 0.189m/s}$$

On a donc :

$$\mathbf{f_r = 1.16 \times 10^{-4} s^{-1}}$$

Avec :

- Cuire : $1.4 \text{ s}^{-1} < fr < 2 \text{ s}^{-1}$
- Matériaux synthétique : fr peut atteindre 8 s^{-1}

Nous avons obtenu $fr = 1.16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} < 8 \text{ s}^{-1}$ donc la courroie de notre système est à la base d'un **matériau synthétique** choisi par rapport aux caractéristiques souhaitées.

Les caractéristiques techniques de la courroie réducteur/ cylindre sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4- 5: Caractéristiques techniques de la courroie d'entraînement entre le réducteur/cylindre.

| | |
|---------------------------------------------|-----------------------|
| Angle d'enroulement θ (°) | 140.4 |
| La longueur primitive L_p (mm) | 1624.08 |
| La longueur normalisée L_n (mm) | 1578.36 |
| Entraxe C (mm) | 335.54 |
| La fréquence de passage (s^{-1}) | 1.16×10^{-4} |

4.3.5 Estimation du coût

Tableau 4- 6: Le coût estimé du cylindre rotatif.

| Elément | Prix (€) |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Cylindre rotatif (corps du séchoir) | 7600 |
| Moteur électrique monophasé synchronisé | 149 |
| Réducteur de vitesse à roue et vis sans fin | 153.54 |
| Courroie trapézoïdale | 11.31 |
| Poulie, D=387.5mm | 162.9 |
| Poulie, D=125 mm | 16.9 |
| Isolation thermique en laine du verre | 11.17 pour 1m^2 . Avec une $S=8.86 \text{ m}^2$, le prix total=98.92 |
| Peinture antirouille | 5 pour 1m^2 . Avec une $S=8.86 \text{ m}^2$, le prix total=44.3 |
| Total : 8188.97€=1637794 DA | |

Dans cette partie du chapitre, nous avons déterminé les caractéristiques principales des trois éléments constituant notre équipement : Le cylindre rotatif, le moteur et la courroie.

Pour le cylindre, nous avons déterminé les différentes dimensions qui vont nous permettre de le placer par la suite. Nous avons déterminé aussi les caractéristiques du mécanisme d'entraînement permettant de faire tourner le cylindre.

Ce dispositif (séchoir rotatif) sera intégré dans le système à étudier. Nous avons le considéré comme étant un sous-système pour connaître ses modes de défaillances et leur contribution dans le dysfonctionnement de tout le système.

4.4 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle nous permet d'avoir des connaissances approfondies sur n'importe quel système, ses composants et son environnement ; ce qui facilite sa décomposition en des sous-systèmes dans le but de faire des études et des analyses pour connaître les risques associés.

Pour la décomposition de notre système **la fonderie**, nous avons appliqué la méthode SADT (Structured Analysis and Design Technique). Il s'agit d'une méthode de modélisation par niveaux successifs qui a pour but d'offrir une vision globale et synthétique du système en ne retenant qu'un petit nombre d'informations jugé essentiel à la compréhension sous forme de modèle graphique appelé diagramme. Dans lequel on présente la fonction globale dans un boîtier appelé boîte mère ou bien A0, les données d'entrée, de sortie, et de contrôle (énergie, réglage, configuration, exploitation) [29].

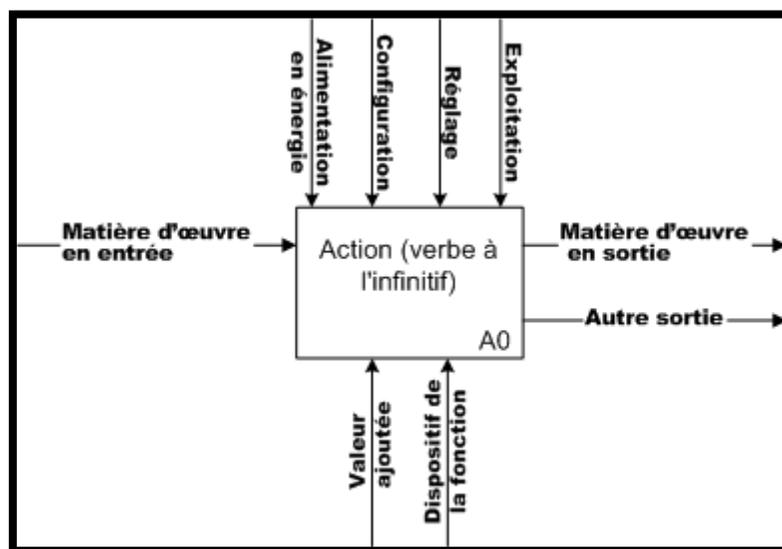


Figure 4- 11: Modèle de diagramme.

La modélisation de la boîte mère est développée du modèle A-0 selon une démarche descendante, La technique graphique de la modélisation est basée sur un formalisme qu'il convient de respecter : [30]

- Les boîtes représentent la décomposition du problème en parties, elles modélisent les activités ou fonctions du système ;
- Les flèches relient les boîtes et codifient les interfaces et/ou les contraintes entre les boîtes ;
- Chaque diagramme de niveau inférieur ne montre qu'une quantité déterminée de détails et s'intègre exactement dans le diagramme de niveau supérieur, en préservant les relations de chaque élément avec son environnement ;
- Dans les fonctions de niveau inférieur, il est interdit de reprendre le nom d'une fonction déjà utilisée au niveau supérieur ;
- La numérotation des boîtes se fait de façon hiérarchique. Ainsi A0 contient A1, A2, A3, ... puis A1 contient A11, A12, A13, ...

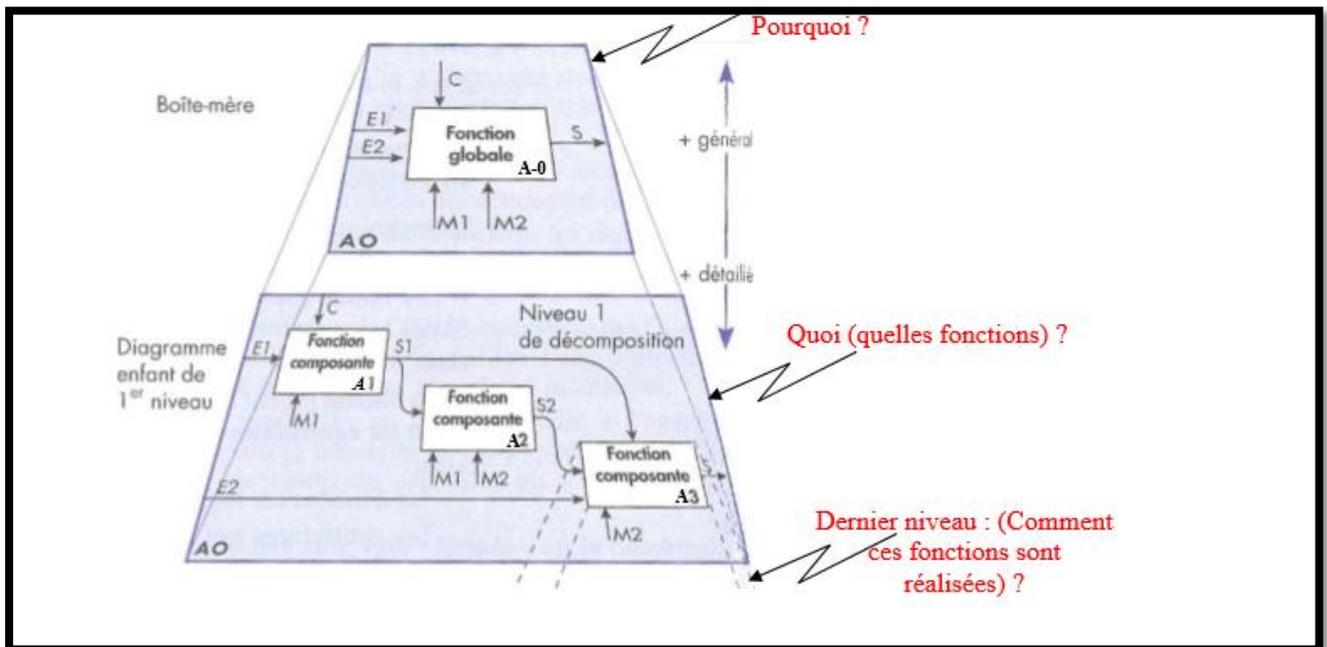


Figure 4- 12: Diagramme SADT.

Le système global est composé de trois sections différentes l'une de l'autre en terme de fonction principale, qui sont :

- Atelier de préparation de la matière première.
- Le four (le bassin de fusion, la gorge et le bassin de repos).
- Bain d'étain.

L'application de cette méthode est dans **l'annexe 7**.

Pour clôturer ce chapitre, nous pouvons dire que notre système choisi prend en considération tous les éléments cruciaux et nécessaires pour effectuer une analyse des risques. Le four présente le cœur de la ligne mais le bain d'étain détermine l'état final du produit. Les deux opèrent dans des conditions difficiles à contrôler où nous pouvons avoir des situations dangereuses avec des effets non négligeables.

Après l'analyse fonctionnelle, nous allons passer à l'analyse des risques liés à notre système où les résultats seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Application des méthodes d'analyse des risques

Chapitre 5 : Application des méthodes d'analyse des risques

Pour commencer l'analyse des risques de n'importe quel système, il faut comprendre son mode de fonctionnement, connaître les entrées et les sorties de chaque sous-système et les différents équipements qu'y font parties et qui assurent l'accomplissement de sa fonction.

Tous ces points ont été traités dans le chapitre précédent donc nous pouvons entamer notre analyse qui va se porter sur la détermination des modes de défaillances des différents sous-systèmes et leurs effets en appliquant la méthode AMDEC. Ensuite nous allons choisir des paramètres qui gèrent notre système (ou bien un sous-système qui est jugé le plus critique) et voir quelles sont les conséquences causées par leurs dérives en passant par la méthode HAZOP. Enfin, nous allons déterminer les probabilités d'occurrences des événements redoutés et leurs conséquences directes en appliquant l'arbre de défaillances et l'arbre des événements respectivement.

5.1 Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leur criticités (AMDEC)

Comme nous avons un système où plusieurs équipements mécaniques et électriques sont en service, nous appliquerons la méthode AMDEC pour déterminer leurs modes de défaillances pouvant engendrer un événement non désirable. Avant de commencer notre application, nous avons décomposé notre système à trois sous-systèmes :

- L'atelier de préparation de la matière première.
- Le four (Bassin de fusion, la gorge et le bassin de repos).
- Le bain d'étain.

Nous avons choisi trois grilles différentes pour estimer la fréquence, la gravité et le niveau de détection de chaque mode de défaillance (Présentées par les tableaux ci-dessous). Les deux premières sont incluses dans le calcul de la criticité de ces modes.

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

Tableau 5- 1: Echelle de gravité.

| Valeurs de G | Gravité de la défaillance. | |
|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Mineure | Aucune dégradation notable du matériel. |
| 2 | Significative | Nécessite une remise en état de courte durée/une réparation sur place. |
| 3 | Majeure | Nécessite une intervention importante. |
| 4 | Catastrophique | Détérioration complète du matériel et atteinte à la sécurité du personnel. |

Tableau 5- 2: Echelle de probabilité.

| Valeur de P | Signification |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1 | Défaillance improbable. |
| 2 | Défaillance rare : une défaillance par un. |
| 3 | Défaillance possible : une défaillance par trimestre |
| 4 | Défaillance occasionnelle : plusieurs fois par trimestre. |
| 5 | Défaillance fréquente : au moins une défaillance par mois. |
| 6 | Défaillance très fréquente : au moins une défaillance par semaine. |

Tableau 5- 3: Echelle de détection.

| Valeurs de D | signification |
|---------------------|------------------------|
| 1 | Détection automatique. |
| 2 | Détection manuelle. |
| 3 | Détection visuelle |
| 4 | Sans détection |

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

Tableau 5- 4: Grille de criticité AMDEC.

| AMDEC | | Gravité | | | |
|-------------|---|---------|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Probabilité | 6 | 6 | 12 | 18 | 24 |
| | 5 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| | 4 | 4 | 8 | 12 | 16 |
| | 3 | 3 | 6 | 9 | 12 |
| | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 |

| | |
|--|-------------------|
| | Acceptable |
| | Tolérable (ALARP) |
| | Inacceptable |

Interprétation des résultats

Les résultats de la méthode AMDEC sont synthétisés dans des tableaux qui sont présentés en **annexe 8**.

L'application de la méthode AMDEC nous a permis d'identifier les modes de défaillances de chacun des composants étudiés et de les hiérarchiser selon le niveau de criticité estimée.

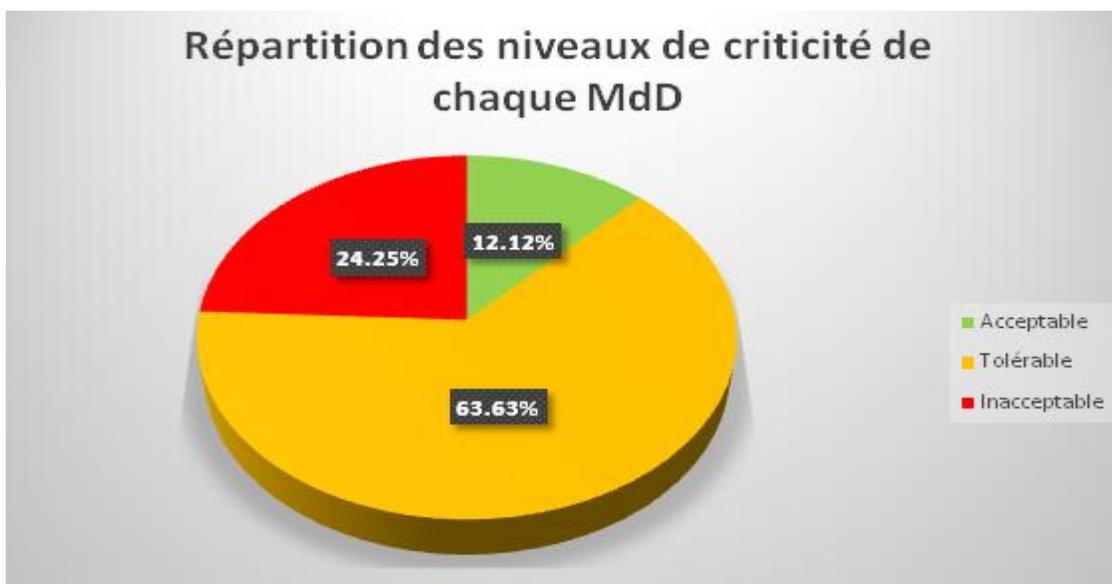


Figure 5- 1: Proportion des niveaux de criticité des modes de défaillances.

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

Selon la répartition des niveaux de criticité de chaque mode de défaillance présentée par la figure ci-dessus (Figure 5-1), nous avons trouvé que les modes de défaillances ALARP sont les plus fréquents mais les modes de défaillances inacceptables (Qui engendrent la **surpression** et la **chute de température**) ne sont pas négligeables.

Pour savoir quel est le système le plus critique et qui nécessite une étude approfondie, nous avons calculé le pourcentage d'apparition de chaque effet dans chaque sous-système. Les résultats sont présentés par le tableau ci-dessous.

Tableau 5- 5 : Pourcentage d'apparition de chaque effet dans chaque sous-système.

| Sous-système | Effet | % |
|-------------------------|--------------------------------|----------|
| Bassin de fusion | Surpression | 36.36 |
| | Chute de température | 18.18 |
| | Retour de flamme | 18.18 |
| | Abaissement du niveau de verre | 27.27 |
| | | |
| La gorge | Surpression | 0 |
| | Chute de température | 25 |
| | Retour de flamme | 0 |
| | Abaissement du niveau de verre | 0 |
| | | |
| Bassin de repos | Surpression | 0 |
| | Chute de température | 0 |
| | Retour de flamme | 0 |
| | Abaissement du niveau de verre | 0 |
| | | |
| Bain d'étain | Surpression | 0 |
| | Chute de température | 10 |
| | Retour de flamme | 0 |
| | Abaissement du niveau de verre | 0 |

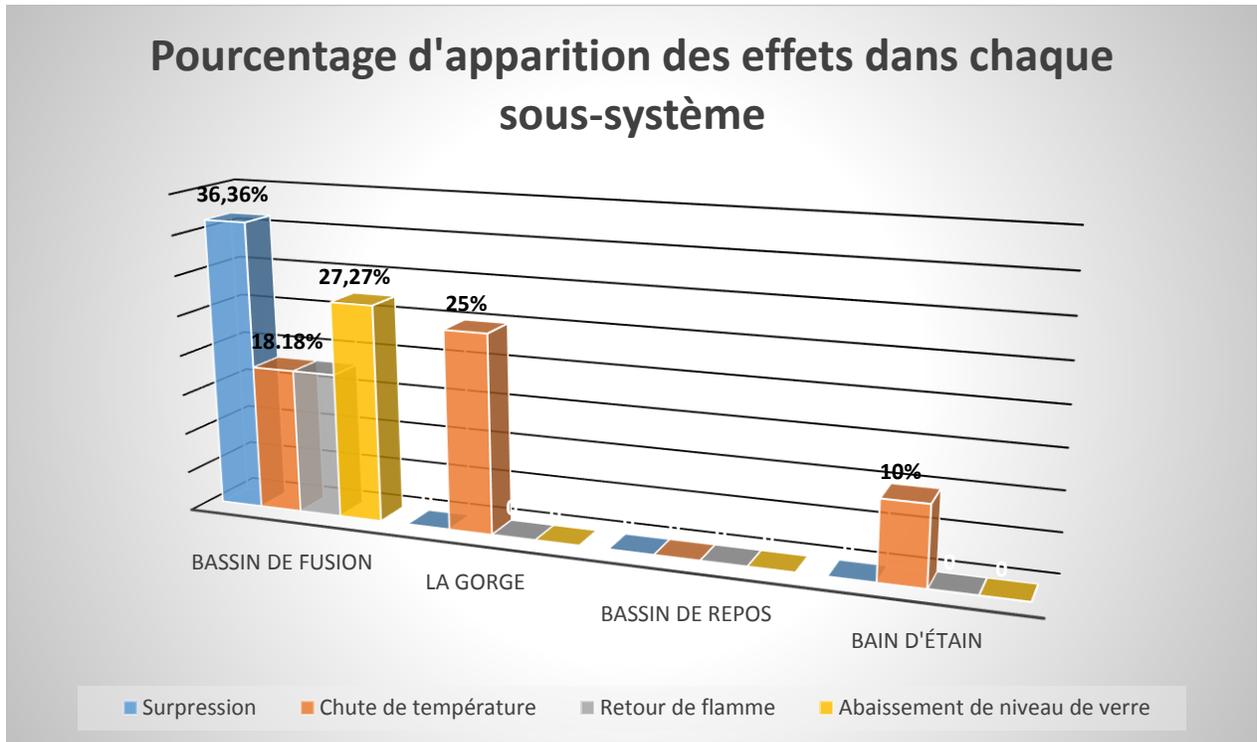


Figure 5- 2 : Répartition des effets dans chaque sous-système.

Selon les résultats trouvés et présentés par la figure 5-2, le bassin de fusion est le sous-système le plus critique puisqu'il présente des modes de défaillances qui peuvent engendrer la surpression et la chute de température. Nous avons choisi la chute de température et pas le retour de flamme malgré qu'ils aient le même pourcentage d'apparition car le retour de flamme nécessite une condition supplémentaire comme une fuite de gaz qui est très rare.

Comme le bassin de fusion est le sous-système le plus critique, nous allons appliquer par la suite la méthode HAZOP seulement sur ce sous-système pour trouver plus des causes pour les deux effets mentionnés ci-dessus.

5.2 HAZard Operability (HAZOP)

Comme nous avons mentionné auparavant, le système le plus critique est le bassin de fusion (En d'autre terme : Le four). Ce système se fonctionne à la base des fluides (gaz naturel et air comprimé de combustion) à des conditions bien déterminées de température et de pression donc nous pouvons le considérer comme un système thermo-hydraulique où la méthode HAZOP est la plus adéquate à appliquer pour trouver plus des causes de chute de température.

- Le nœud

L'application de la méthode HAZOP nécessite la détermination des nœuds qui prennent en considération les entrées et les sorties pour connaître la nature des fluides découlant dans les différentes conduites et les paramètres à étudier.

Le tableau suivant présente les composants à l'entrée et à la sortie de notre nœud (Figure 5-3).

Tableau 5- 6 : Eléments composant le bassin de fusion.

| Nœud | Entrants | Sortants |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Bassin de fusion (Un seul nœud) | Conduite d'air de combustion. | Carneau principal (Fumées). |
| | Conduite de gaz de combustion. | Carneaux secondaires (Air de combustion et les fumées). |
| | Conduite d'eau de refroidissement. | / |

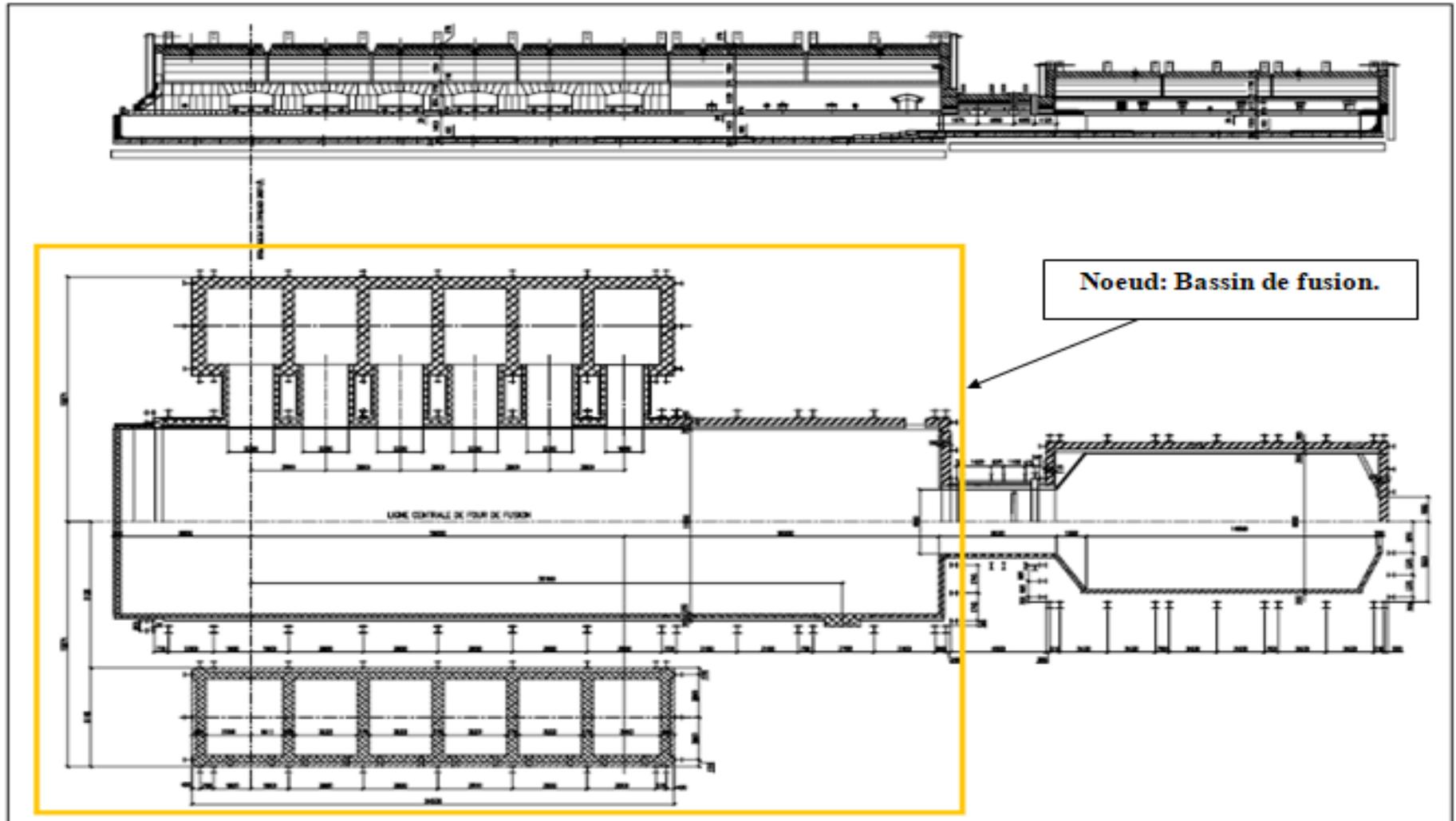


Figure 5- 3: Représentation de nœud utilisé dans la méthode HAZOP.

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

- Interprétation des résultats

Nous avons concentré sur des paramètres précis pour chaque composant qui sont nécessaires pour son fonctionnement et qui peuvent engendrer des phénomènes dangereux en cas de dérive. Le tableau suivant va montrer les causes des ERs (événements redoutés) trouvées dans les résultats de la méthode HAZOP :

Tableau 5- 7: Causes de chaque évènement redouté pour chaque composant.

| Conséquences | Composants | Causes |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Surpression | Carneau principal. | Ouverture partielle de registre de réglage de pression et faible force d'aspiration de registre de cheminée. |
| | Carneaux secondaires. | Blocage en position ouverte de la vanne régulatrice d'air de combustion et défaillance de l'inverseur coté fumées. |
| Chute de température | Conduite d'air de combustion. | Non-ouverture de la vanne. |
| | | Défaillance du moteur de ventilateur. |
| | Conduite de gaz de combustion. | Rupture totale de la conduite. |
| | | Blocage en position fermée de la vanne régulatrice. |
| Bassin de fusion. | Perte d'alimentation du gaz ou d'air de combustion. | |

Comme le tableau ci-dessus le montre, en appliquant la méthode HAZOP sur notre sous-système, nous avons trouvé plus de causes pour la chute de température ce qui va nous aider dans l'application de la méthode « Arbre de Défaillances » qui sert à présenter toutes les causes trouvées dans les deux méthodes déjà appliquées d'une façon structurée et ordonnée.

5.3 Arbre de défaillances (Add)

Comme nous avons assez des évènements pour constituer l'arbre de défaillances, qui sont tirés des résultats des deux méthodes appliquées auparavant (**AMDEC** et **HAZOP**), nous allons utiliser un logiciel qui rend la construction de l'arbre plus facile et sa structure plus organisée.

Le logiciel **Arbre Analyste** est logiciel de sûreté de fonctionnement qui permet de standardiser les modélisations par arbre de défaillances. Il est employé dans des différents secteurs industriels pour lesquels une étude par cet outil est nécessaire. Il permet d'éditer, d'afficher, de calculer et de traiter les résultats. [31]

L'Arbre Analyste nous permet de structurer notre arbre en utilisant des portes logiques **ET** ou bien **OU** qui lient entre les différents évènements élémentaires et les évènements à développer.

Les deux arbres de défaillances donnant les différents évènements causant la chute de température et la pression dans le four sont présentés par les deux figures **5-4** et **5-5** ci-dessous.

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

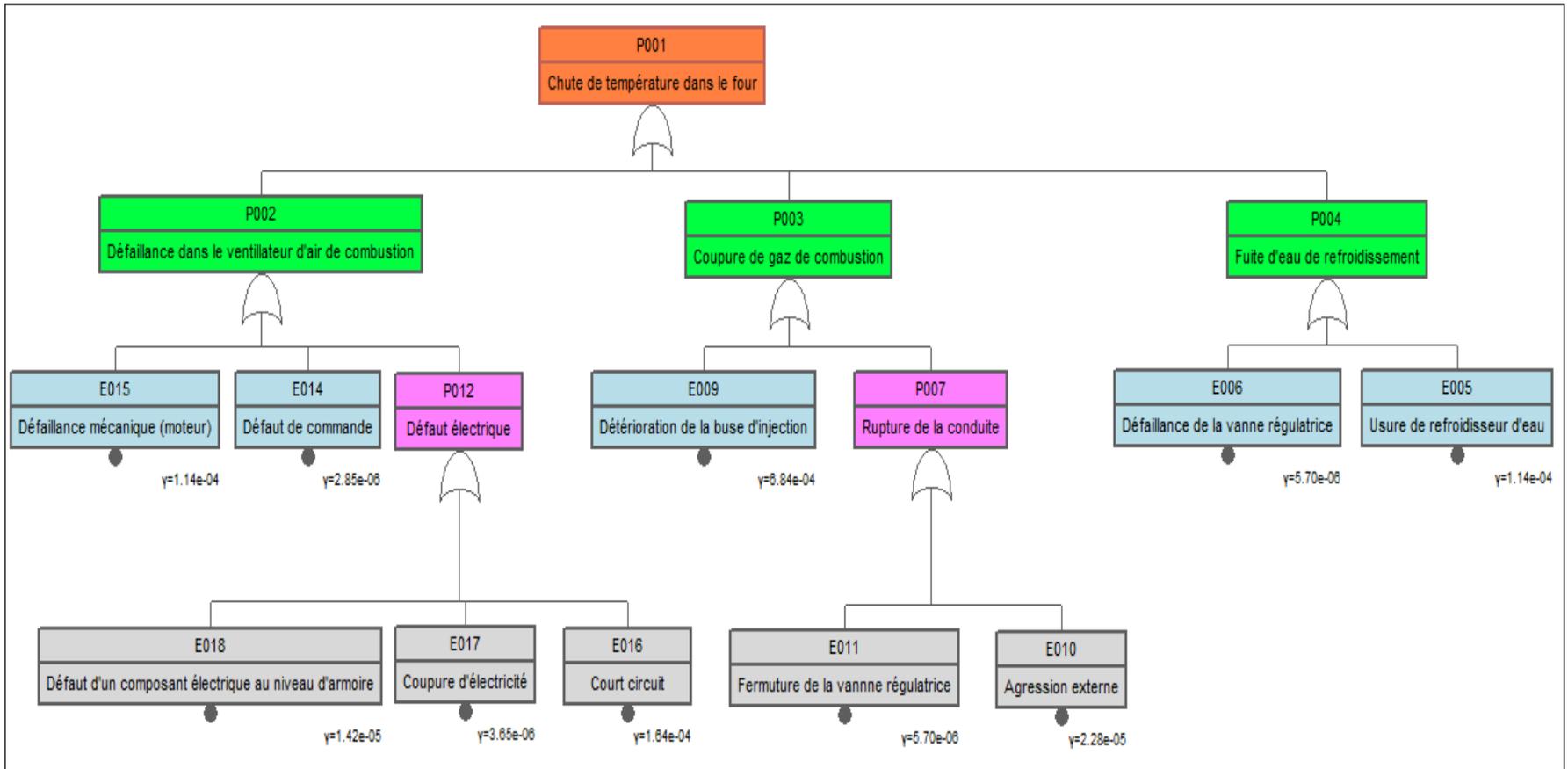


Figure 5- 4 : Arbre de défaillances de chute de température dans le four.

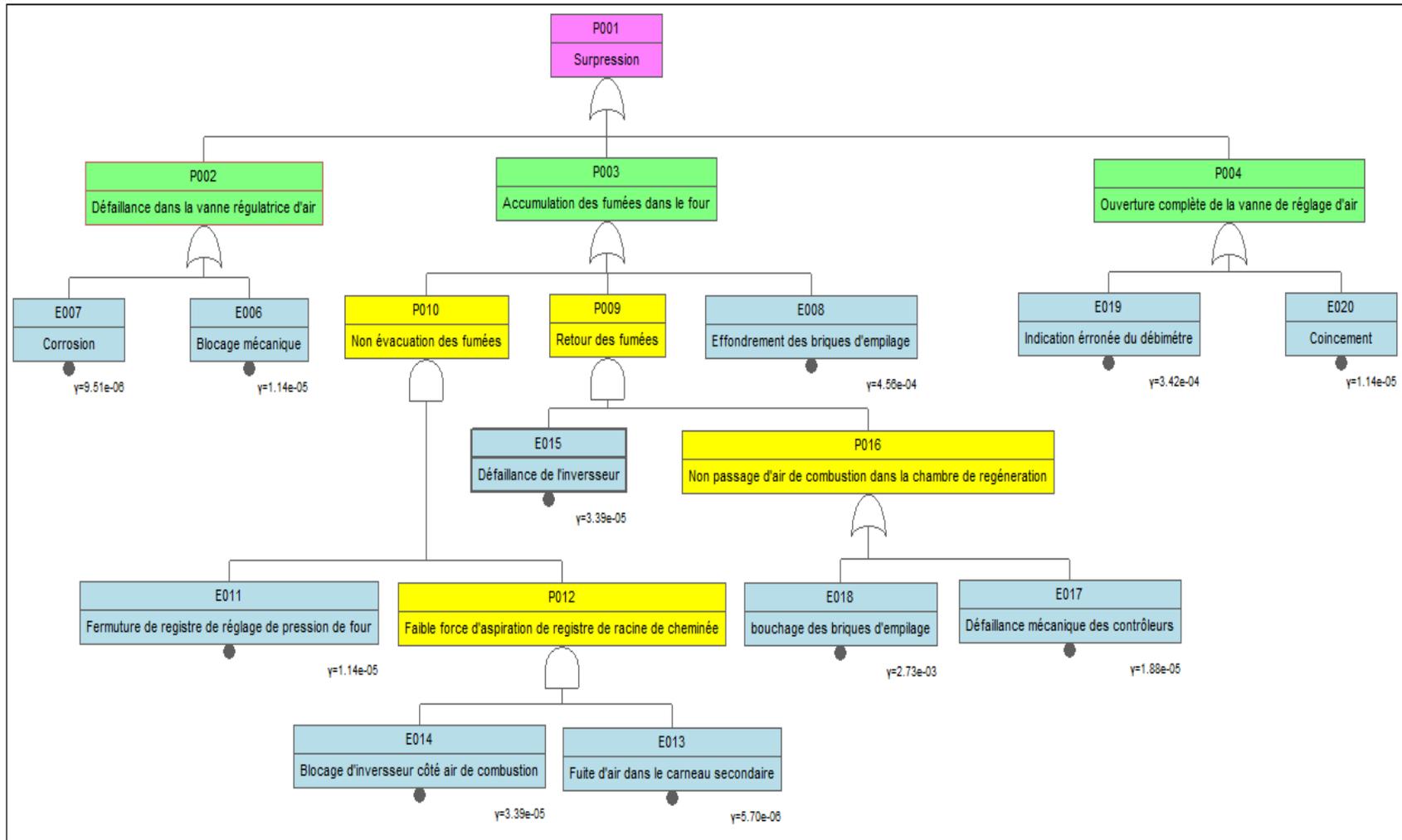


Figure 5- 5: Arbre de défaillances de surpression dans le four.

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

Calcul des probabilités

Le but de ce calcul est de préciser quel est ER le plus probable. Pour calculer les probabilités des évènements redoutés, nous avons calculé les probabilités de chaque évènement élémentaire à la base d'un avis d'expert puisque les bases de données dans ce domaine (**Domaine de verre**) n'existent pas et les informations que nous avons trouvées dans la littérature ne sont pas suffisantes pour estimer les probabilités.

Les probabilités sont calculées de la manière suivante :

- Pour les portes logiques « Et » : $P(A \text{ et } B) = P(A) \times P(B)$;

- Pour les portes logiques « Ou » : $P(A \text{ ou } B) = P(A) + P(B)$.

Les probabilités calculées sont exprimées en nombre de défaillance par an.

- **Chute de la température**

Le tableau ci-dessous présente la codification et les probabilités de chaque évènement élémentaire causant la chute de température dans le four.

Tableau 5- 8: Probabilités des évènements de base de la chute de température.

| Codification | Elément de base | Probabilité |
|--------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|
| E005 | Usure de refroidisseur a eau | 1.14×10^{-4} |
| E006 | Défaillance de la vanne régulatrice | 5.7×10^{-6} |
| E009 | Détérioration de la buse d'injection | 6.84×10^{-4} |
| E010 | Agression externe | 2.28×10^{-5} |
| E011 | Fermeture de la vanne régulatrice | 5.7×10^{-6} |
| E014 | Défaut de commande | 2.85×10^{-5} |
| E015 | Défaillance mécanique (moteur) | 1.14×10^{-4} |
| E016 | Court-circuit | 1.64×10^{-4} |
| E017 | Coupure d'électricité | 3.65×10^{-5} |
| E018 | Défaillance d'un composant électrique au niveau d'armoire | 1.42×10^{-5} |

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

- Calculs

P001 est la probabilité de l'événement redouté « **Chute de température** », comme la figure 5-4 montre elle est égale :

$$\mathbf{P001= P002+P003+P004}$$

Nous avons : **P002=E015+E014+P012**

Tel que : **P012= E018+E017+E016**

$$\mathbf{P002=E015+E014+E018+E017+E016}$$

$$\mathbf{P003= E009 +P007}$$

Tel que : **P007= E011+E010**

$$\mathbf{Donc : P003=E009+E011+E010}$$

$$\mathbf{P004= E006+E005}$$

Alors : **P001= E015+E014+ E018+E017+E016+ E009+E011+E010+ E006+E005**

$$\mathbf{P001=1.14 \times 10^{-4} + 2.85 \times 10^{-5} + 1.42 \times 10^{-5} + 3.65 \times 10^{-5} + 1.64 \times 10^{-4} + 6.84 \times 10^{-4} + 5.7 \times 10^{-6} + 2.28 \times 10^{-5} + 5.7 \times 10^{-6} + 1.14 \times 10^{-4} = 1.18 \times 10^{-3}}$$

$$\mathbf{Donc: P001=1.18 \times 10^{-3} / \text{an.}}$$

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

- **Supression**

Le tableau ci-dessous présente la codification et les probabilités de chaque évènement élémentaire causant la surpression dans le four.

Tableau 5- 9: Probabilités des évènements de base de la surpression.

| Codification | Evénements de base | Probabilité |
|---------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|
| E006 | Blocage mécanique | 1.14×10^{-5} |
| E007 | Corrosion | 9.51×10^{-6} |
| E008 | Effondrement des briques d'empilage | 4.56×10^{-4} |
| E011 | Fermeture de registre de réglage de pression de four | 1.14×10^{-5} |
| E013 | Fuite d'air dans le carneau secondaire | 5.7×10^{-6} |
| E014 | Blocage d'inverseur côté air de combustion | 3.39×10^{-5} |
| E015 | Défaillance de l'inverseur | 3.39×10^{-5} |
| E017 | Défaillance mécanique des contrôleurs | 1.88×10^{-5} |
| E018 | Bouchage des briques d'empilage | 2.73×10^{-3} |
| E019 | Indication erronée de débitmètre | 3.42×10^{-4} |
| E020 | Coincement | 1.14×10^{-5} |

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

- Calculs

P001 est la probabilité de l'événement redouté « **Surpression** », comme la figure 5-5 le montre elle est égale :

$$\mathbf{P001 = P002 + P003 + P004}$$

Nous avons : $\mathbf{P002 = E006 + E007}$

Et $\mathbf{P003 = P010 + P009 + E008}$

Tel que : $\mathbf{P010 = E011 \times P012}$ et $\mathbf{P012 = E014 \times E013}$

Donc : $\mathbf{P010 = E011 \times E013 \times E014}$

$\mathbf{P009 = E015 \times P016}$ et $\mathbf{P016 = E018 + E017}$

Donc : $\mathbf{P009 = E015 \times (E018 + E017)}$

Alors : $\mathbf{P003 = (E011 \times E013 \times E014) + E015 \times (E018 + E017) + E008}$

Et : $\mathbf{P004 = E019 + E020}$

Donc :

$$\mathbf{P001 = E006 + E007 + (E011 \times E013 \times E014) + E015 \times (E018 + E017) + E008 + (E019 + E020)}$$

$$\mathbf{P001 = 1.14 \times 10^{-5} + 9.51 \times 10^{-6} + (1.14 \times 10^{-5} \times 5.7 \times 10^{-6} \times 3.39 \times 10^{-5}) + 3.39 \times 10^{-5} \times (2.73 \times 10^{-3} + 1.88 \times 10^{-5}) + 4.56 \times 10^{-4} + (3.42 \times 10^{-4} + 1.14 \times 10^{-5}) = 8.3 \times 10^{-4}}$$

$$\mathbf{Donc : P001 = 8.3 \times 10^{-4} / \text{an.}}$$

D'après les calculs, nous pouvons constater que la chute de température est l'événement le plus probable mais nous ne pouvons pas négliger l'effet de la surpression, qui peut causer des conséquences néfastes pour la ligne de production que ne nous pouvons pas les estimer juste en basant sur les résultats ci-dessus. Donc nous allons focaliser notre étude sur les deux événements en appliquant une autre méthode pour visualiser la succession des phénomènes dangereux possibles et calculer ensuite leurs probabilités d'occurrence.

5.4 Arbre des événements (ADE)

Les évènements redoutés étudiés ci-dessus, deviennent des évènements initiateurs dans la méthode à appliquer dans ce qui suit. Donc nous allons commencer par la suppression ou la chute de température et après nous allons trouver d'une manière structurée les conséquences de ces deux évènements en appliquant la méthode Arbre des Evènements (AdE).

Pour appliquer cette méthode, nous allons utiliser le logiciel GRIF. C'est un logiciel d'analyse des systèmes qui permet de déterminer les indicateurs fondamentaux de la sûreté de fonctionnement : Fiabilité-Disponibilité-Performance-Sécurité [32].

C'est un logiciel qui laisse le choix aux utilisateurs d'opter pour la technique de modélisation la plus adéquate à la résolution du système étudié : Blocs diagrammes, arbres de défaillances, graphes de Markov, réseaux de Pétri [32].

Le GRIF est structuré en trois packages : Booléen, simulations et Markovien. Nous avons utilisé le booléen car il comprend les modules que nous avons besoin comme Tree (Arbre de défaillances) et ETree (Arbre des évènements).

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

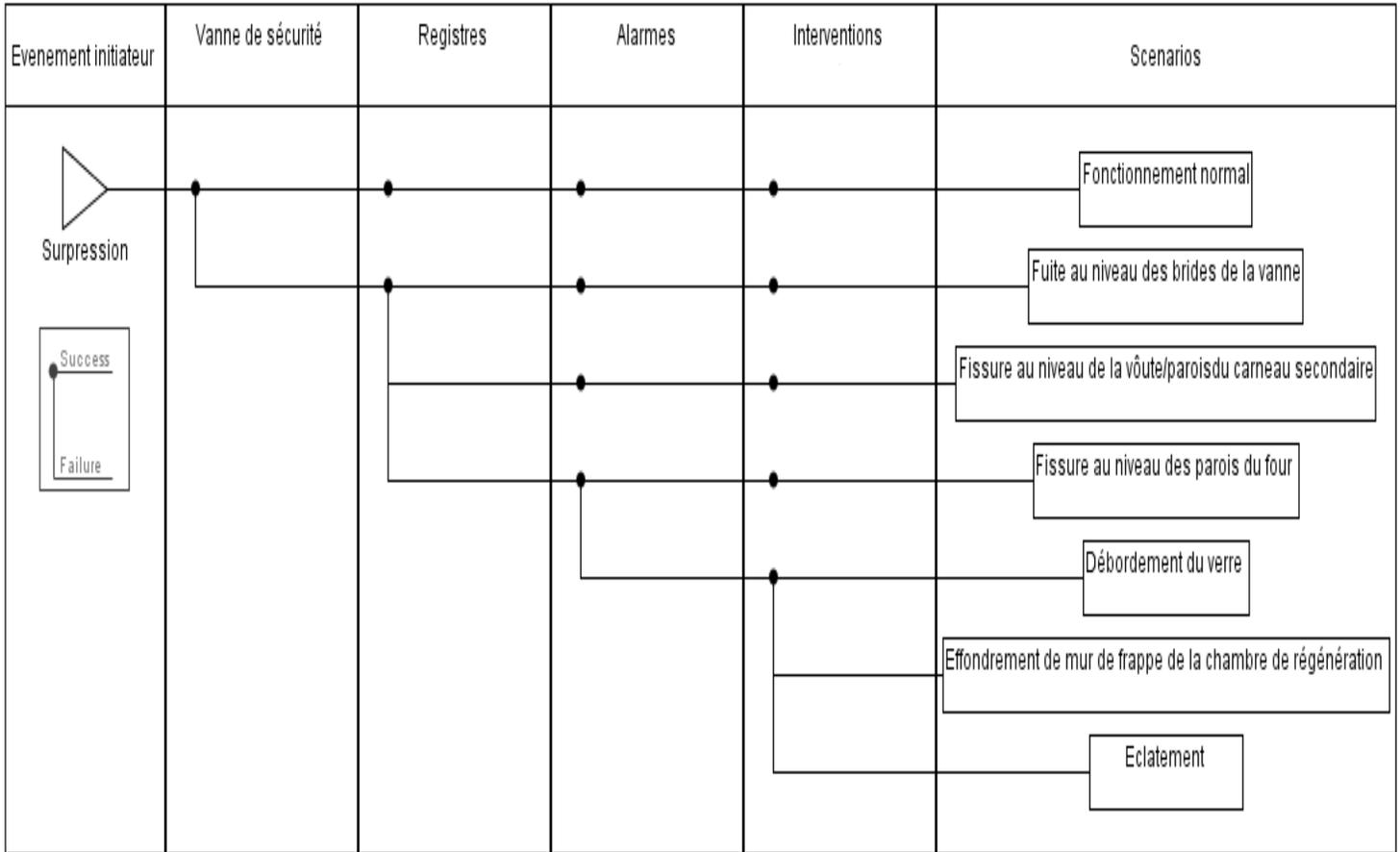


Figure 5- 6 : Arbre des événements de la surpression.

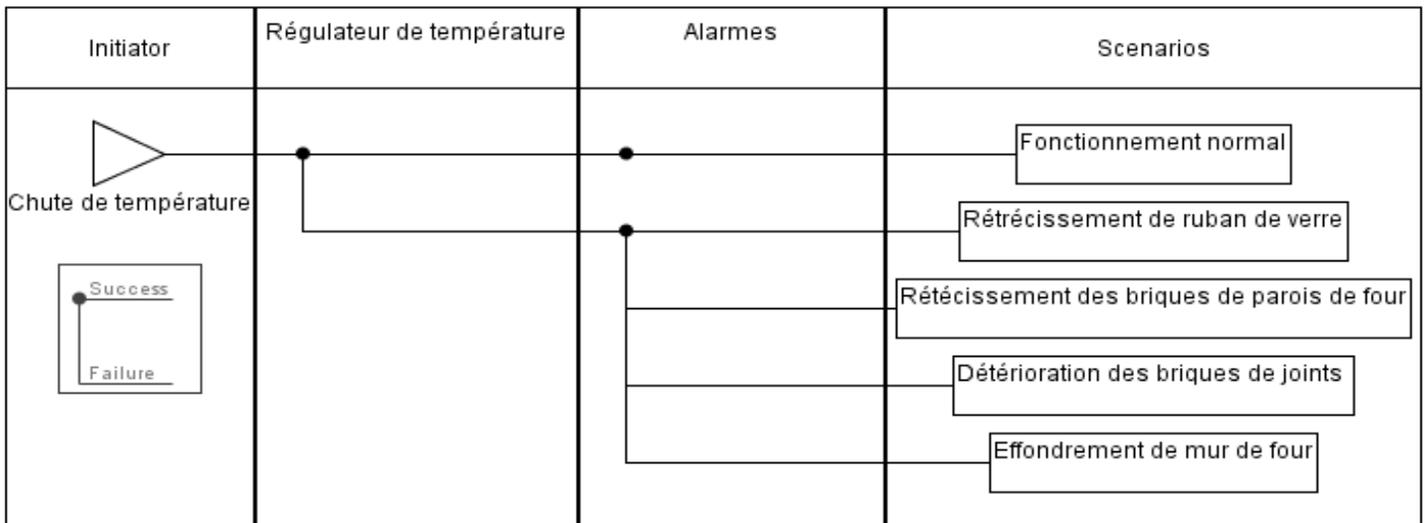


Figure 5- 7: Arbre des événements de la chute de température

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

Calcul des probabilités

Pour calculer les probabilités des événements initiateurs, nous avons besoin de calculer d'abord les probabilités de défaillances des équipements de sécurité puisque la défaillance de ces équipements est considérée la cause directe de la réalisation des phénomènes dangereux liés aux ces événements initiateurs.

- **Surpression**

Tableau 5- 10: Probabilité de défaillance des équipements de sécurité (surpression).

| Equipement | Probabilité de défaillance | Codification |
|--------------------|----------------------------|--------------|
| Vannes de sécurité | 2.85×10^{-6} | P1 |
| Registres | 1.14×10^{-5} | P2 |
| Alarmes | 2.1×10^{-2} | P3 |
| Interventions | 9.5×10^{-5} | P4 |

La probabilité de l'événement initiateur « **surpression** » est calculé auparavant et elle vaut :

$$P_{001} = 8.3 \times 10^{-4} / \text{an.}$$

Donc la probabilité d'occurrence des scénarios est égale à :

$$P_1 = P_{001} \times P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 = 8.3 \times 10^{-4} \times 2.85 \times 10^{-6} \times 1.14 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^{-2} \times 9.5 \times 10^{-5}.$$

$$\text{Alors: } P_1 = 5.37 \times 10^{-20} / \text{an.}$$

- **Chute de la température**

Tableau 5- 11: Probabilité de défaillance des équipements de sécurité (chute de température).

| Equipement | Probabilité de défaillance | Codification |
|---------------------------|----------------------------|--------------|
| Régulateur de température | 3.8×10^{-6} | P5 |
| Alarmes | 3.1×10^{-2} | P6 |

La probabilité de l'événement initiateur « **chute de température** » est calculé auparavant et elle vaut :

$$P_{001} = 1.18 \times 10^{-3} / \text{an.}$$

Donc la probabilité d'occurrence des scénarios est égale à :

$$P_2 = P_{001} \times P_5 \times P_6 = 1.18 \times 10^{-3} \times 3.8 \times 10^{-6} \times 3.1 \times 10^{-2}$$

$$\text{Alors : } P_2 = 1.39 \times 10^{-10} / \text{an.}$$

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

Tableau 5- 12 : Niveaux des taux d'occurrences.

| Niveau de probabilité | Définition | Taux d'occurrence par an |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 5 | Evénement très probable dans la vie du système. A été observé d'une façon répétitive sur d'autres sites. | $>10^{-2}$ |
| 4 | Evénement probable dans la vie du système. A été observé plusieurs fois sur d'autres sites. | De 10^{-3} à 10^{-2} |
| 3 | Evénement peu probable dans la vie du système. S'est produit quelques fois sur d'autres sites. | De 10^{-4} à 10^{-3} |
| 2 | Evénement très peu probable dans la vie du système. S'est produit rarement sur d'autres sites. | De 10^{-5} à 10^{-4} |
| 1 | Evénement qui s'est produit très rarement sur d'autres sites. | $<10^{-5}$ |

D'après les résultats des calculs que nous avons effectués, nous pouvons dire que les deux événements redoutés secondaires (l'effondrement de mur du four et l'éclatement) sont très rares dans le site où nous avons effectué notre étude ou bien dans d'autres sites similaires mais l'effondrement du mur du four reste plus probable que l'éclatement des parois.

Malgré que ce phénomène est très rare et qu'il n'a jamais survécu pendant les 11 ans de service de la ligne de production, il peut survenir dans n'importe quel moment et il peut causer des effets très grave à cause de l'état dégradé du four qui ne peut pas résister aux différentes variations des paramètres de service (Température et pression).

Chapitre.5 : Application des méthodes d'analyse des risques.

Conclusion

Après l'analyse des risques effectuée dans ce chapitre, nous avons prouvé que l'évènement redouté secondaire « l'effondrement du mur » est l'évènement le plus probable en vue de l'état actuel du four et ses équipements. Cet évènement peut engendrer des phénomènes dangereux ayant des effets très graves que nous ne pouvons pas les mettre en évidence car nous n'avons pas une base de données ou un retour d'expérience pouvant nous aider donc nous allons agir sur la source pour éviter que cet évènement survienne et garantir que ces phénomènes dangereux n'auront pas lieu. Et c'est le but de chapitre suivant.

Chapitre 6

Mesures de réduction des risques

Chapitre 6 : Mesures de réduction des risque

Nous avons montré dans le chapitre précédent, que « l'effondrement de mur » causé par la chute de température au sein du four de fusion est l'évènement le plus probable. Pour empêcher cet évènement de survenir nous allons agir sur la source qui est la température.

Pour cet effet, nous allons proposer un système de régulation en boucle fermée qui va réguler la température des parois du four en régulant le débit du gaz de combustion par l'intermédiaire d'une électrovanne proportionnelle.

Lorsque le capteur de température indique une valeur différente de la consigne, le système va transmettre un signal à l'actionneur qui est l'électrovanne dans notre cas pour augmenter le débit du gaz. Une fois le débit du gaz est augmenté, le débit d'air de combustion va être augmenté automatiquement car ils sont proportionnels.

Le but est d'assurer une bonne combustion pour garantir que la température ne diminue pas au-dessous de la valeur d'entrée (la consigne).

6.1 Système de régulation

L'objectif d'une régulation est d'assurer qu'un procédé soit conforme aux critères prédéfinis par un cahier de charge. Ces critères sont généralement des critères qualitatifs comme la stabilité, la précision... [33]

Nous parlons de la régulation quand la consigne traduisant l'objectif désiré du procédé est constante. Dans ce type de régulation, l'action correctrice s'effectue après que les effets des grandeurs perturbatrices aient produit un écart entre la mesure et la consigne.

- Régulateur PID

Le régulateur utilisé dans plus de 90% des systèmes de régulation est du type proportionnel-intégrale-dérivée (PID). Ses applications sont nombreuses et variées, il est utilisé en commande des procédés industriels, des moteurs, dans le monde de l'aéronautique et de l'automobile, en robotique et dans plusieurs appareils courants (comme lecteurs CD), etc.

La fonction de transfert d'un régulateur PID est :

$$G(s) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (1)$$

Où k_p , k_I et k_D sont les gains de proportionnalité, d'intégration et de dérivation.

Chacun de ces gains a une action bien précise :

- Le gain proportionnel : Il rend le système plus rapide, plus précis mais il peut provoquer son instabilité.
- Le gain de dérivation : Il rend le système plus stable.
- Le gain d'intégration : Il rend le système plus précis.

6.2 Choix du type de régulateur

Nous avons choisi le modèle de régulateur en se basant sur le modèle mathématique suivant qui représente la variation de la température au niveau des parois.

Nous avons référé à la méthode de capacitance localisée pour le trouver. Pour appliquer cette méthode, il faut que la variation spatiale soit nulle donc nous allons calculer le nombre de Biot pour confirmer ça :

$$Bi = \frac{hL}{K} \quad (2)$$

Tel que :

Bi : Le nombre de Biot.

H : Le coefficient d'échange thermique ($W/m^2.K$).

L : La longueur de brique réfractaire (m).

K : Coefficient de conductivité thermique ($W/m.K$)

Donc le nombre de Biot sera égale à :

$$Bi = \frac{2.5 \times 200 \times 10^{-3}}{4.3} = 0.11 \leq 0.1$$

Alors nous pouvons dire que la variation spatiale est négligée. Le modèle mathématique sera exprimé par l'équation suivante :

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = Q \cdot PCI - hA(T - T_\infty) \quad (3)$$

ρ : La masse volumique des briques réfractaires composant le mur du four (kg/m^3).

V : Le volume pris par les briques réfractaires de mur (briques AZS) en m^3 .

C_p : La capacité thermique massique des briques ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

T : La température au niveau des parois en K.

Q : Le débit du gaz de combustion (kg/s).

PCI : Le pouvoir calorifique inférieur du gaz (kWh/m^3).

T_∞ : La température à l'extérieur du four en K.

En passant du domaine temporel au domaine fréquentiel, nous allons déterminer la fonction de transfert de notre système que nous allons utiliser par la suite pour trouver le modèle du contrôleur.

Autour d'un point de fonctionnement, les conditions initiales sont nulles et la distribution de la température est supposée uniforme car la variation spatiale est négligée alors la fonction de transfert $G(s)$ sera exprimée par l'équation suivante :

$$\rho V C_p \cdot s \cdot T(s) = \alpha Q(s) - hA T(s) + \frac{hA T_\infty}{s} \quad / \quad \alpha = PCI(CH_4)$$

$$(\rho V C_p + hA) T(s) = \alpha Q(s) + \frac{hA T_\infty}{s}$$

$$T(s) = \frac{\alpha}{\rho V C_p s + hA} Q(s) + \frac{hA T_\infty}{s(\rho V C_p + hA)} = G(s)Q(s) + P(s)$$

$P(s)$: Perturbation dû aux conditions externes, elle est faible puisqu'elle dépend de la température à l'extérieur du four qui est négligeable par rapport au température au sein du four.

$$\text{Donc } G(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{(\alpha/\square A)}{\left(\frac{\rho C_p V}{\square A}\right)_{s+1}} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Tel que :

k : Le gain qui est égal à 0.059.

τ : La constante du temps qui est égale à 6.48 min.

G est un système de premier ordre donc nous pouvons le commander avec un **PI**.

Le schéma qui représente le système de commande est le suivant :

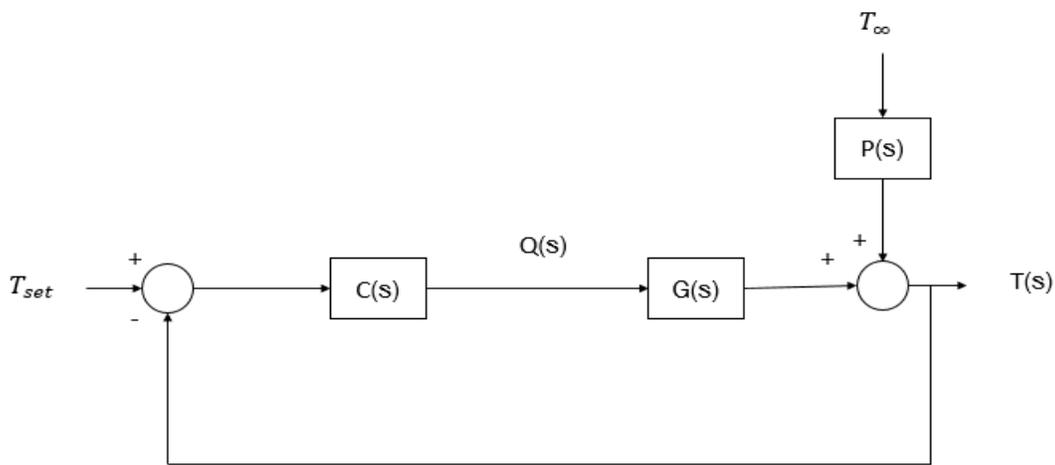


Figure 6- 1 : Schéma représentant le système de régulation.

Pour confirmer que le type de contrôleur est un PI, nous devons trouver l'expression de $C(s)$. Comme nous avons une boucle fermée, nous allons utiliser une fonction de transfert qui présente la réponse que nous désirons F_d tel que :

$$F_d = \frac{1}{\tau_d s + 1}$$

Où τ_d est un temps de réponse que nous désirons, tel que $0 < \tau_d < \tau$.

Pour satisfaire cette condition on a choisit $\tau_d = 5$ min.

Nous avons :

$$C(s) = \frac{1}{G(s)} \times \frac{F_d}{1 - F_d} = \frac{1}{G(s)} \times \frac{1}{\tau_d s} = \frac{\tau}{k\tau_d} + \frac{1}{k\tau_d s}$$

$$C(s) = k_p + \frac{k_I}{s} \quad (5)$$

Donc notre contrôleur est un PI avec : $k_p = \frac{\tau}{k\tau_d} = 22$ et $k_I = \frac{1}{k\tau_d} = 3.38 \text{ min}^{-1}$.

Après que le contrôleur de notre système est déterminé, nous allons passer par MATLAB en utilisant SIMULINK pour avoir la réponse de notre système par rapport à la consigne. Les schémas ci-dessous présente la boucle que nous avons utilisé, c'est une boucle fermée simple qui a une action correctrice qui va annuler l'écart entre la consigne et la mesure, peu importe la cause de cet écart

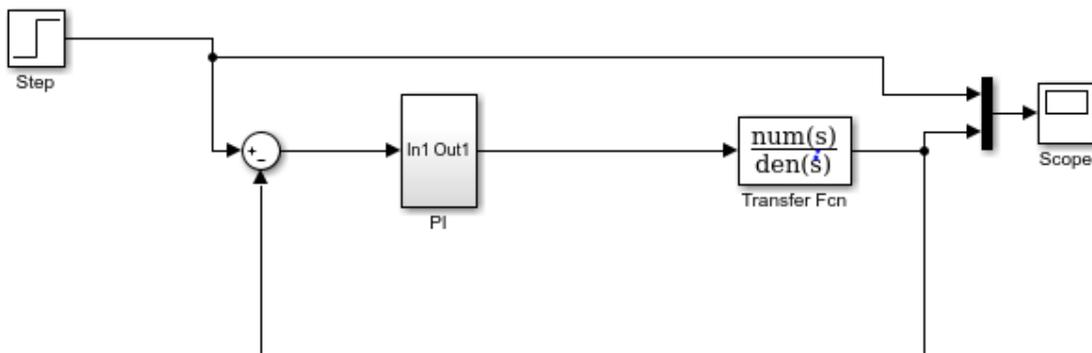


Figure 6- 2: Schéma de simulation par SIMULINK.

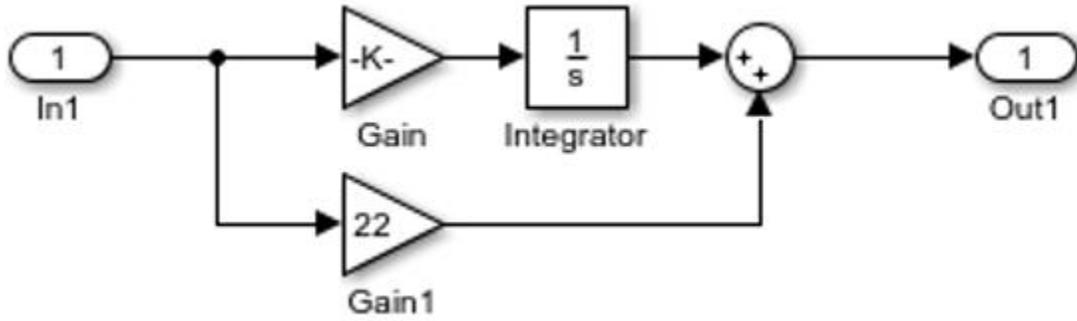


Figure 6- 3: Représentation du block PI de la boucle précédente.

Comme la figure ci-dessous montre, l'entrée de notre système est la température de fusion qui doit rester constante et qui est égale à 1530 °C.



Figure 6- 4 : Graphe représentatif de consigne.

La figure 6-5 présente la réponse du système après simulation qui a été faite à l'aide du SIMULINK.

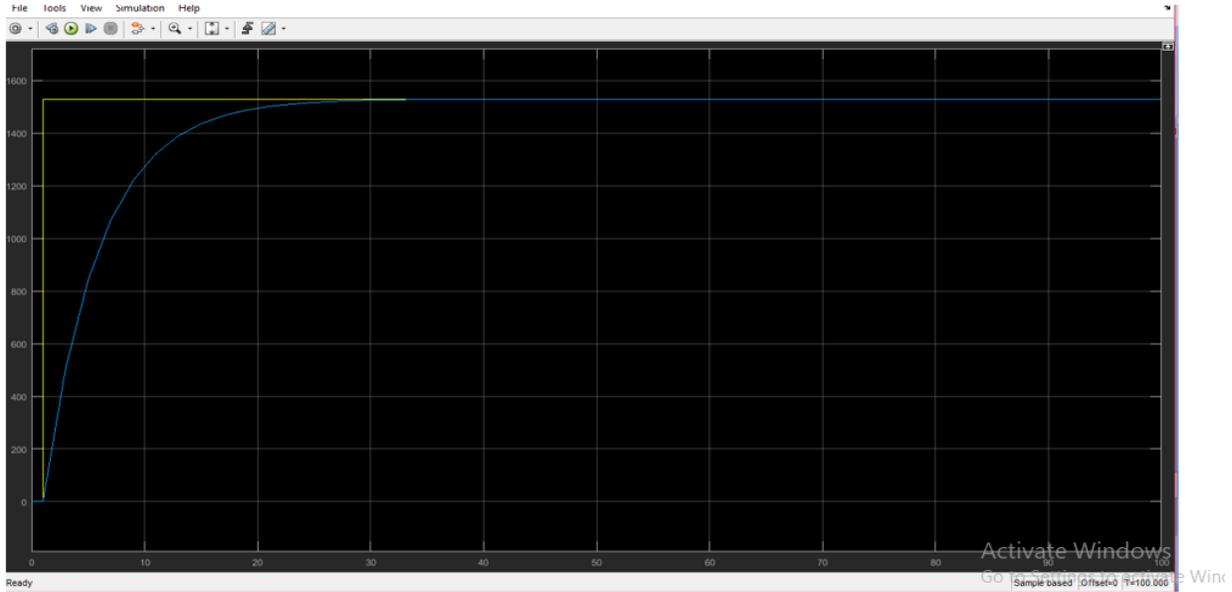


Figure 6- 5 : Réponse du système.

6.3Interprétation des résultats

1. Test avec un signal sinusoïdal

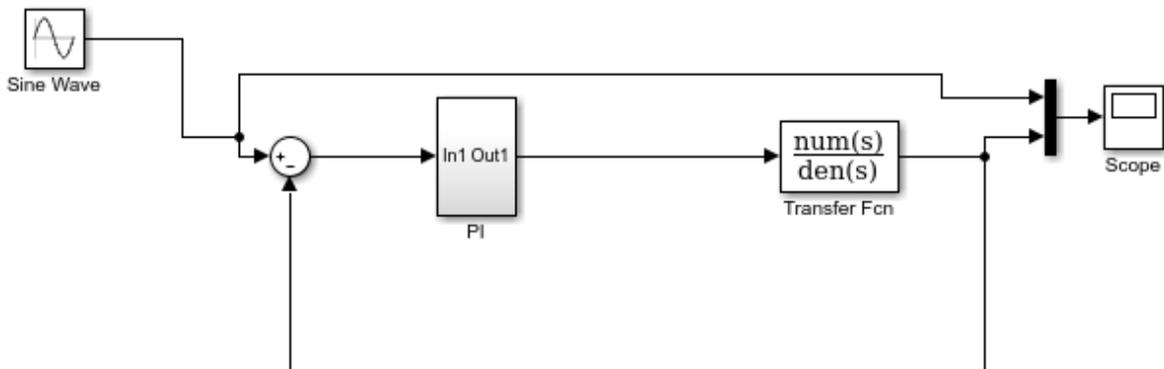


Figure 6- 6 : Schéma représentant une boucle avec un signal d'entrée sinusoïdal.

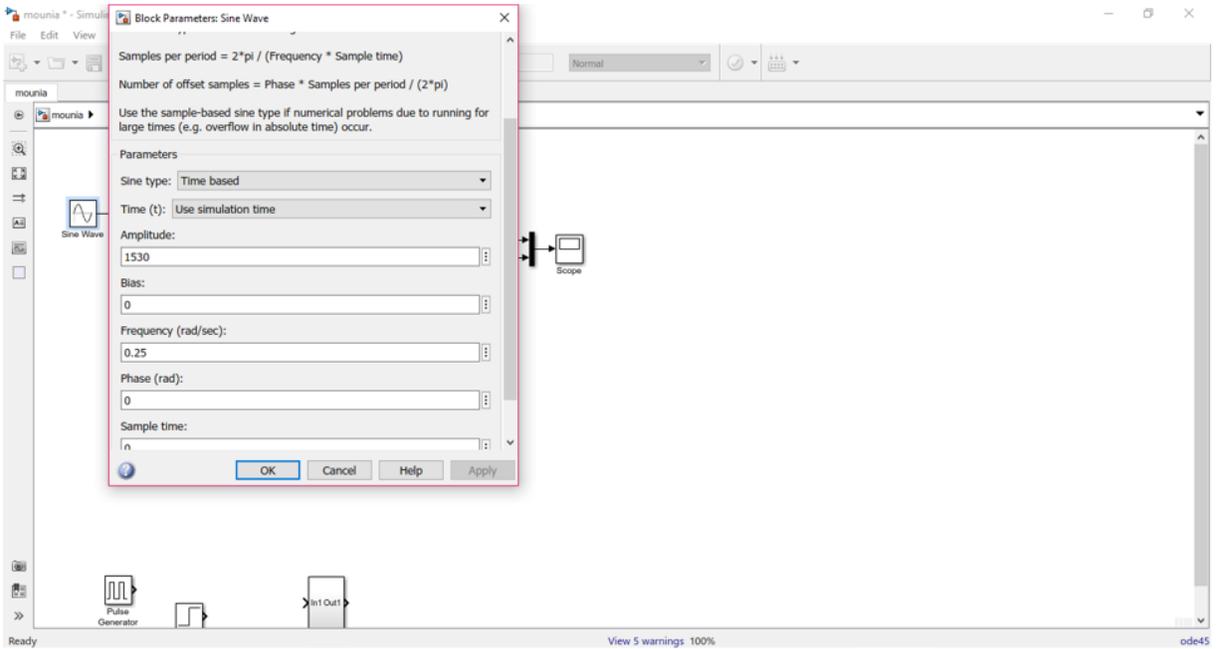


Figure 6- 7: Paramètres à entrer pour voir la réponse du système au signal sinusoïdal.

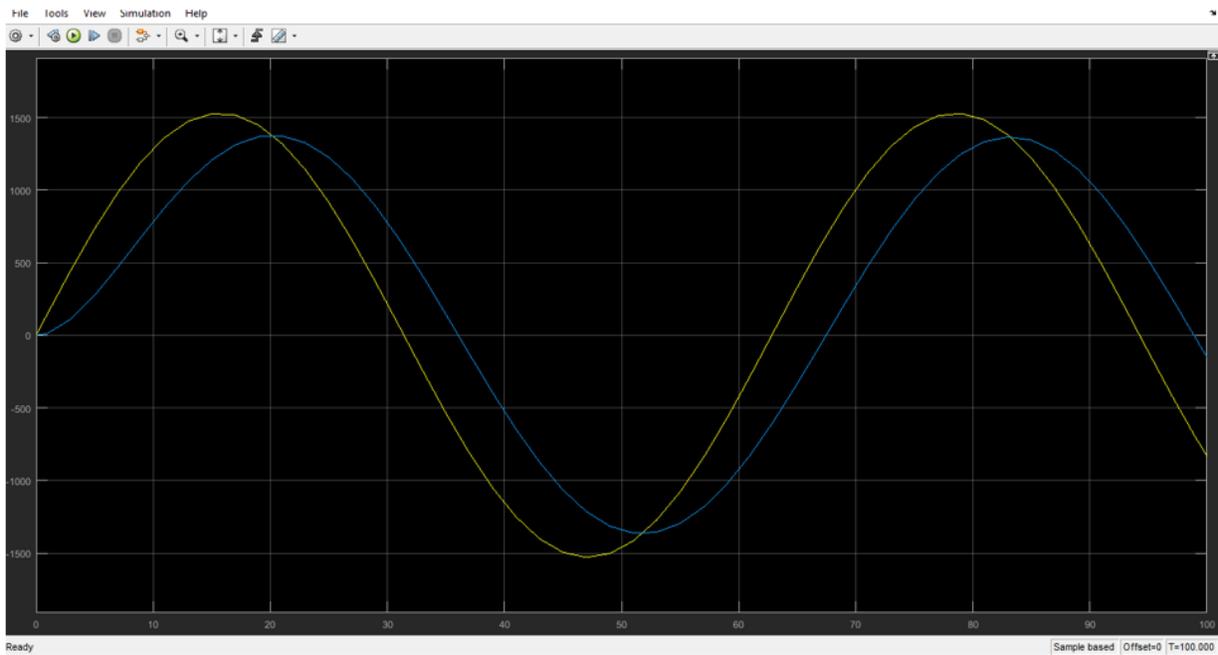


Figure 6- 8: La réponse du système au signal sinusoïdal avec une impulsion de 0.25 rad/sec.

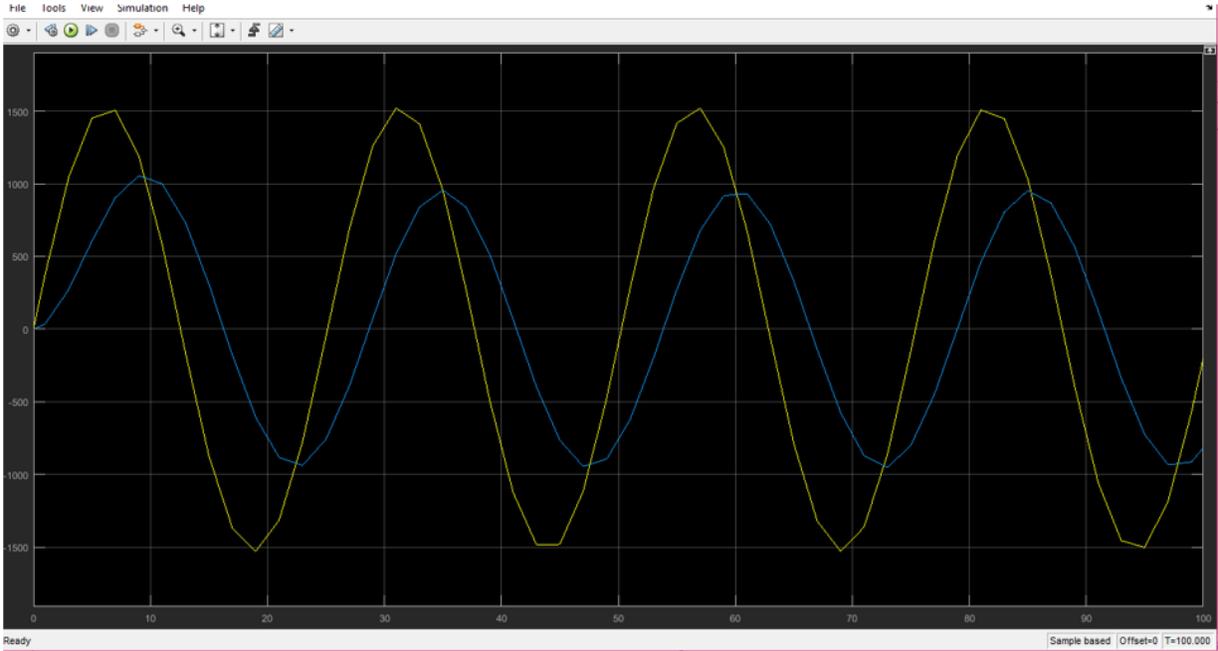


Figure 6- 9 : La réponse du système au signal sinusoïdal avec une impulsion de 0.1 rad/sec.

2. Test avec un signal carré

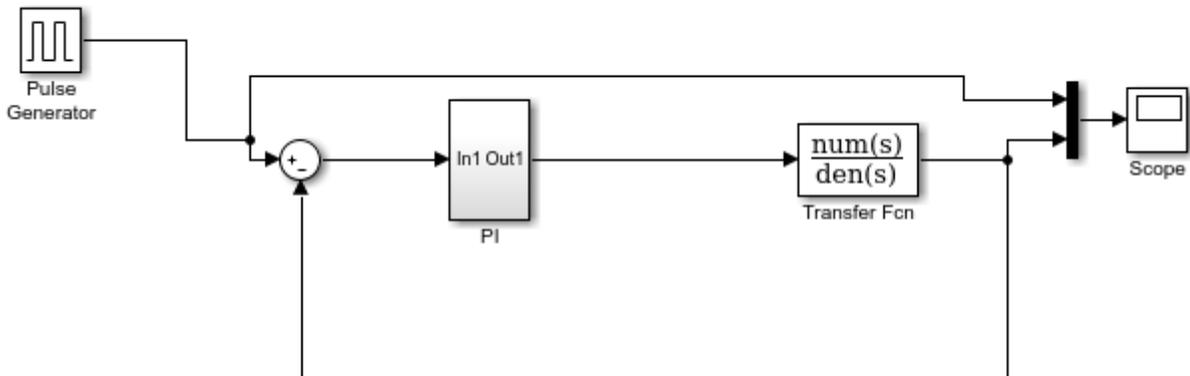


Figure 6- 10 : Schéma représentant une boucle avec un signal d'entrée carré, avec un pulse generator.

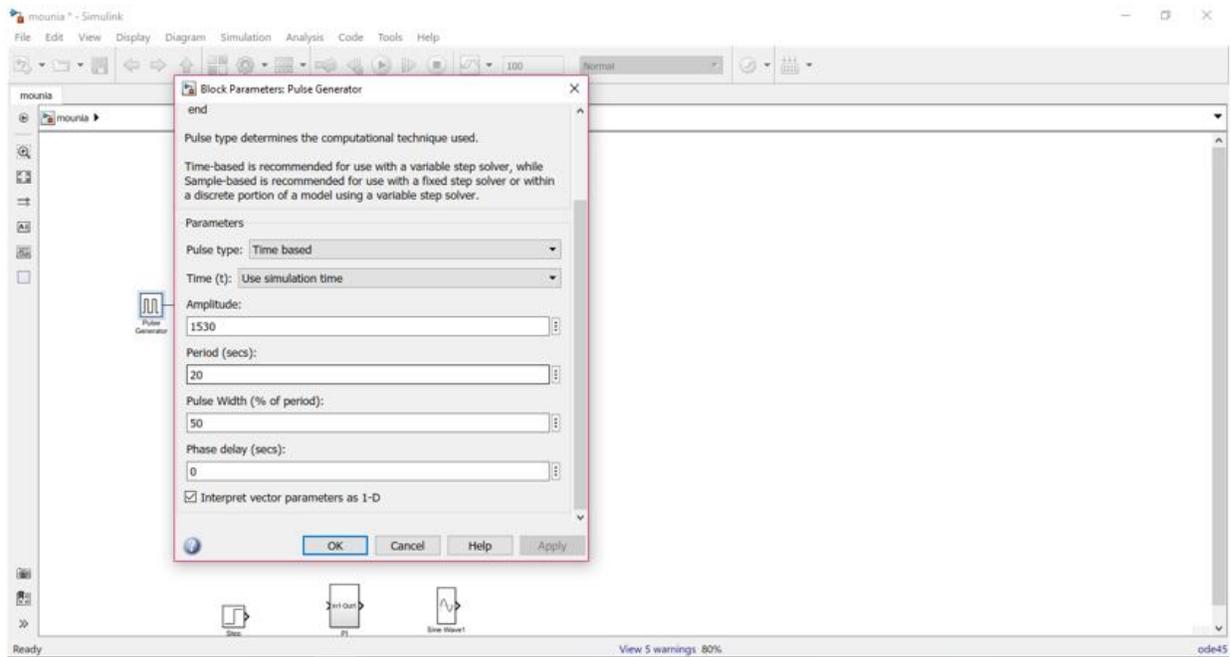


Figure 6- 11 : Paramètres à entrer pour voir la réponse du système au signal carré.

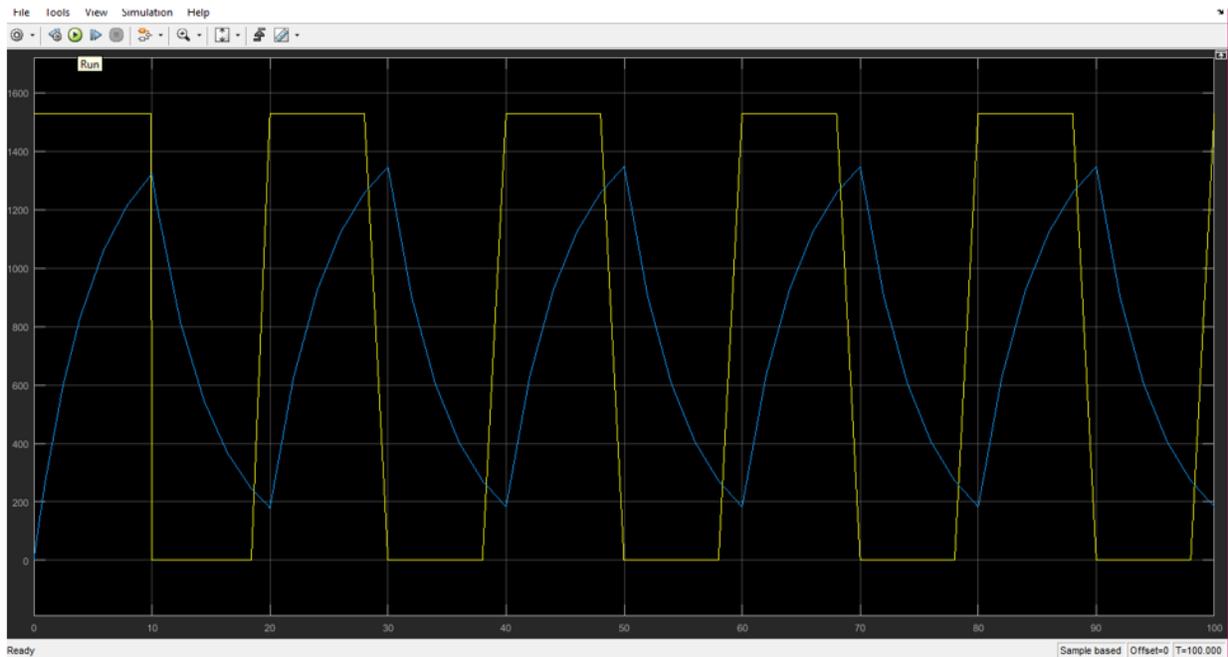


Figure 6- 12 : La réponse du système au signal carré.

Interprétation

Quand nous appliquons un signal sinusoïdal d'une impulsion de 0.1 rad/secc'est-à-dire en donnant un temps suffisant au système pour répondre, nous remarquons que le système suit la consigne et il atteint la valeur souhaité dans un temps très proche du temps désiré.

Quand nous appliquons le même signal mais d'une impulsion de 0.25 rad/sec et donc en diminuant la période ou bien le temps donné au système pour répondre, le système suit la consigne mais il n'atteint pas la valeur souhaitée dans le temps désiré,de même pour un signal carré donc nous constatons que notre système est un système lent.

3. Test avec 63% de la consigne

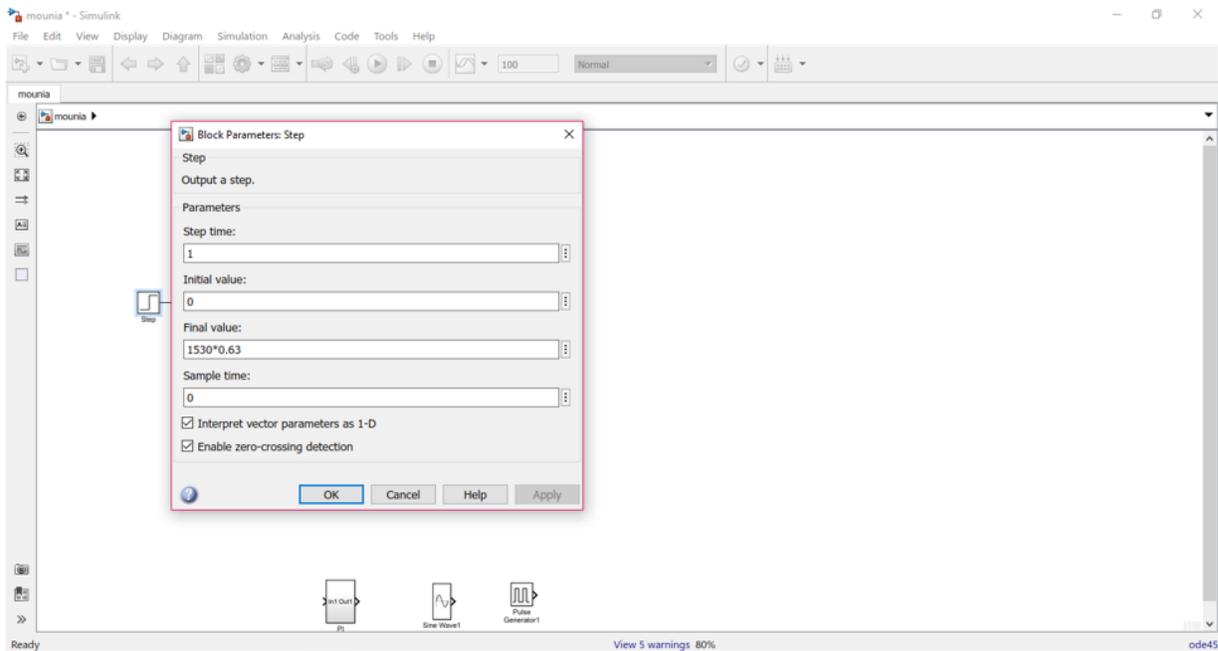


Figure 6- 13 : Paramètres à entrer pour voir la réponse du système au 63% de la consigne.

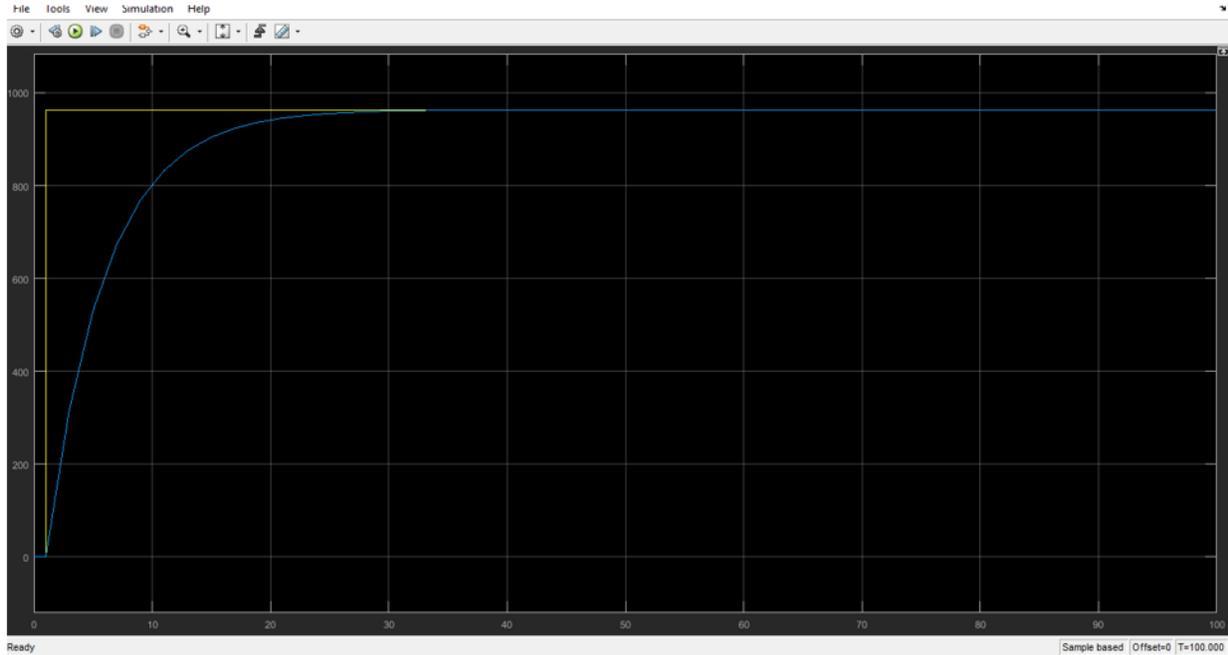


Figure 6- 14: La réponse du système au 63% de la consigne.

Interprétation

Le but de ce test est de voir si le système est rapide et stable ou pas.

Comme la figure 6-14 le montre, la poursuite est parfaite mais le temps de réponse est un peu lent.

Concernant la stabilité, le système atteint le régime permanent normalement et nous n'avons pas un dépassement dans le régime transitoire donc il est stable.

Conclusion

Après avoir déterminé le type de notre contrôleur et son test, nous avons trouvé que notre système est un système stable, précis mais il est lent. Nous pouvons justifier le retard de la réponse (le retard entre la variation de la température mesurée à la valeur souhaitée) par le temps que la température prend pour atteindre la valeur nominale (La combustion est un phénomène lent).

CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé a pour objectif la maîtrise des risques liés à l'amélioration du procédé de fabrication du verre au niveau du MFG en résolvant deux problèmes posés au niveau de cette entreprise. La première solution est de traiter le problème d'augmentation de taux d'humidité du sable durant l'hiver en dimensionnant un séchoir rotatif qui va diminuer le taux d'humidité de 6%. La deuxième va traiter le problème de chute de température pour éviter que l'effondrement de mur du four survient en régulant le débit du gaz de combustion qui va agir sur la température de four indirectement.

Pour résoudre notre problématique, nous avons suivi une démarche bien déterminée qui permet l'utilisation des différentes méthodes d'analyse des risques comme la méthode SADT qui permet d'avoir des connaissances approfondies sur n'importe quel système, ses composants et son environnement ; ce qui facilite sa décomposition en des sous-systèmes dans le but de faire des études et des analyses pour connaître les risques associés.

Nous avons commencé notre analyse par la méthode AMDEC qui nous a permis d'identifier des modes de défaillances des composants constituant les différents sous-systèmes et de les hiérarchiser selon leurs niveaux de criticité. Cette hiérarchisation nous a montré que les risques tolérables (ALARP) représentent 63.63% de l'ensemble des risques étudiés, ils sont maîtrisables mais ils nécessitent un entretien constamment.

Elle nous a montré aussi que le bassin de fusion est le sous-système le plus critique car nous avons trouvé des modes de défaillances dans ce sous-système qui engendrent quatre différents événements pouvant avoir des effets très graves soit sur la production ou sur les équipements. Ces événements sont : la chute de température, la surpression, le retour de flamme et l'abaissement du niveau du verre.

Nous avons choisi la chute de température et la surpression et nous avons continué notre analyse en appliquant la méthode HAZOP pour trouver toutes les causes de chute de la température.

Après que nous avons trouvé suffisamment des causes et des conséquences de ces deux événements redoutés, nous avons passé aux calculs de leurs probabilités d'occurrences et de leurs conséquences en appliquant l'arbre de défaillances et l'arbre des événements. Ces deux outils nous ont permis de constater que l'effondrement de mur est l'évènement redouté secondaire le plus probable qui est une conséquence de la chute de température au sein du four.

Conclusion générale.

Nous avons fini notre projet par une solution qui est facile à mettre en place mais efficace en terme de résultat. Nous avons proposé un système de régulation qui va commander une vanne régulatrice du débit de gaz de combustion pour assurer une bonne combustion dans le four de fusion et donc garantir que la température reste dans la plage convenable pour la bonne fusion et le bon état des briques réfractaires constituant le mur du four.

Afin d'améliorer notre système de régulation et son développement encore plus, nous proposons de mettre en place un système de régulation avec un Ratio-Controller qui va assurer que les débits de gaz et de l'air de combustion gardent toujours le même ratio au niveau des brûleurs même si la valeur mesurée par le débitmètre placé au niveau des conduites d'air et celles du gaz changent. Ce type des contrôleurs est très recommandé dans notre cas.

En termes de perspective aussi nous recommandons un filtre céramique, en amont du séchoir, qui sert à réduire la concentration des NOx jusqu'à 95 %, à neutraliser le SO₂ et à éliminer les poussières.

Nous conseillons aussi que les études à faire ultérieurement sur le même thème font une comparaison entre la qualité du verre avant et après l'emplacement du séchoir rotatif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SAHAR. la chimie chez Dr sahar. Généralité sur les verres [en ligne]. Août 2014, [consultés le 04 mai 2018]. Disponibles sur : <http://chimiedrsahar.blogspot.com/2014/07/les-procedes-de-raffinage-dupetrole>.
- [2] BARTON, J., GUILLEMENT, C. Le verre science et technologie. France : EDP sciences, 2005. 461p. ISBN : 2-86883-789-1.
- [3] LARBI, M., ZEROUB, H. Le verre dans le bâtiment [en ligne]. Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie des matériaux. Boumerdes : université Mhelmed Bougara, [consulté le 16 avril 2018]. Disponible sur : <https://www.memoireonline.com>.
- [4] Fédération de l'industrie du verre. Renseignements sur le matériau « verre ». Bruxelles, 15p.
- [5] EGENHOFER, C., SCHREFLER, L. For a study on composition and drivers of energy prices and costs in energy intensive industries: the case of the flat glass industry. Bruxelles, 2014, 46p.
- [6] Center scientifique et technique de la construction (CSTC). Le verre et les produits verriers – les fonctions des vitrages. Bruxelles : Carlo de pauw, Décembre 1999. 110p.
- [7] AUCHET olivier. Contribution à la modélisation simplifiée des fours verriers. Thèse de doctorat : automatique et traitement du signal. Lorraine : école doctorale IAEM, 2005, 204p.
- [8] BENJAMINE, M., SAJE, S. Le recyclage du verre, 2004.
- [9] PAGEAN, Gérard. L'élaboration du verre. In brève histoire du verre Vol 13, n°3, n°4, 2007.
- [10] DEFOUR jean-yves. Classification des feldspaths, projet de diplôme Gem-A.
- [11] PIGEONNEAU, Franck. Phénomènes de transfert appliqués à l'élaboration des verres. Surface du verre et Interfaces, UMR 125 CNRS/Saint-Gobain, Année universitaire 2011/2012, 93 p.
- [12] FOURMENT, Jacques et FROMENTIN, Jean. Fours de verrerie, BE 8 848. Technique de l'ingénieur. 26 p, p. 04, p. 23.
- [13] CARDENOSA, Jean-Jacques. Situation environnementale des industries « industrie verrière », 2007, 72p.
- [14] LATASTE, Emilie. Comportement mécanique et endommagement de réfractaires électro-fondus sous sollicitation thermomécanique. Thèse de doctorat : Génie des matériaux. Lyon : l'institut national des sciences appliquées, 2005, 192p.

Références bibliographique.

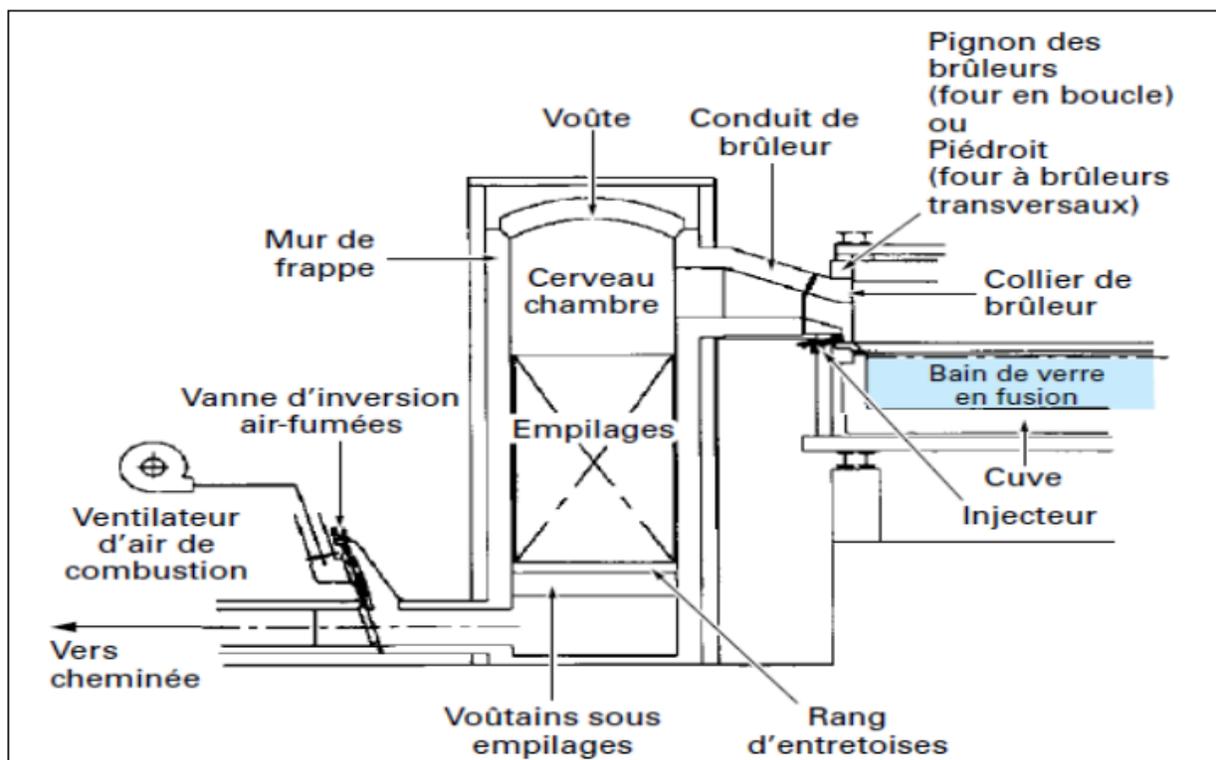
- [15] MASSARD, Ludovic. Étude du fluage de réfractaires électro-fondus du système alumine-zircone-silice. Thèse de doctorat : Sciences et Génie des matériaux. Paris : école nationale supérieure des mines, 2005,212 p.
- [16] CAVAILLE, R., CHARREAU, A. Séchage théorie et calculs, J 2480.technique de l'ingénieur, 25p.
- [17] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie(ADEME), CETIAT. Les procédés de séchage dans l'industrie. ISBN 979-1-02970-791-9
- [18] Comité d'hygiène, de sécurité et de conditions de travail (CCHST). Fiches d'information, réponses SST, Danger et risque. [En ligne]. (Crée le 1997, modifié le 02/02/2017). Disponible sur <<http://www.cchst.ca/>> (Consulté le 02/05/2018).
- [19] Centre Canadien d'hygiène et sécurité au travail (CHSCT). Notion de risque. [En ligne]. (Modifié le 02/12/2014). Disponible sur <<http://www.officiel-prevention.com/>> (Consulté le 02/05/2018).
- [20] Organisation internationale de normalisation ISO. Management du risque — Principes et lignes directrices. ISO/FDIS 31000: 2009(F), 2009, 34p.
- [21] BARTHELEMY, Bernard. Gestion globale des risques, 10 Avril 2013, AG1100 V2. Technique de l'ingénieur. Vol.26, p. 05-07-08.
- [22] CHERFAOUI, A. technique d'évaluation des risques. BOUMERDES : IAP, cours, 140p.
- [23] DEBRAY.B, CHAUMETTE.S, DESCOURIERE.S, TROMMETER.V, INERIS-DRA2006-P46055 CL47569, Q7 : Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle.
- [24] Gestion des risques pour l'ingénieur et autres professionnels : Analyse par arbre d'événements. Université de Sherbrooke. Cours [en ligne], 2014.Disponible sur :http://www.google.dz/analyse_par_arbre_d_evenements.
- [25] INRS. L'analyse de l'accident du travail, la méthode de l'arbre des causes, 2013. Edition: INRS.ED6163.
- [26] YLINIEMI, Leena. Advanced control of a rotary dryer, 1999, 114p. ISBN 951-42-5281-0.
- [27] DIAGNE, Marne Abdou. Conception d'un séchoir à cylindre rotatif pour les produits granulés à base de céréales (application au « arraw »), mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception.SENEGAL :Ecole Supérieure Polytechnique Centre de TRIES, 2003, 79p.
- [28] transmissions par poulies et courroies [en ligne]. Disponible sur : http://www.zpag.net/tecnologies_industrielles.

Références bibliographique.

- [29] SADEG, B. Quelques transparents de cours sur la méthode SADT (Structured Analysis and Design Techniques). 32p.
- [30] BTS ATI – Lycée Chevalier d'Eon – Tonnerre. Structured Analysis Design Technique (SADT). [31] Arbre Analyste <http://apsss-consulting.fr/analyse/analyste->.
- [32] Total, grif <http://grif-workshop.com/2016/04/new-version-grif-2016/2016>.
- [33] DAKOUNE, A., CHOUKAI, O. Etude et mise au point d'une boucle de régulation en cascade "cascade control" : application à la régulation en cascade de niveau d'eau dans une cuve parfaitement agitée. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie des procédés, 2013, 72p.

Annexes

Annexe 1 : Chambre de régénération.



Annexe 2 : Coefficient du frottement.

| Matériau | f (matériau à sec) | f (matériau lubrifié) |
|--------------------|--------------------|-----------------------|
| Acier/Acier | 0,5 à 0,20 | 0,10 |
| Acier/bronze | 0,15 | 0,10 |
| Acier/Antifriction | | 0,5 |
| Acier/Nylon | | 0,10 à 0,20 |
| Acier/Téflon | 0,05 à 0,15 | |
| Acier/caoutchouc | 0,25 à 0,45 | |
| Fonte/fonte | 0,15 | 0,10 |
| Fonte/Ferro do | 0,20 à 0,50 | |

Annexe 3 : Principales dimensions des courroies trapézoïdales.

| 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 | 14 | 19 | 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 | 9 | 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 |

l_p : longueur primitive ou de référence ; d_p : diamètre primitif ou de référence.
Exemple de désignation : Z1420 (pour courroie classique de longueur 1 420 mm).

Annexe 4: Facteur de conversion Δ pour les courroies classiques.

| Désignation | Longueur (po) | Facture de conversion Δ (po) |
|-------------|------------------|----------------------------------------|
| A | 26 à 128 | 1,3 |
| B | 35 à 240 | 1,8 |
| B | 240 et plus | 2,1 |
| C | 51 à 210 | 2,9 |
| C | 210 et plus | 3,8 |
| D | 120 à 210 | 3,3 |
| D | 210 et plus | 4,1 |
| E | 180 à 240 | 4,5 |
| E | 240 et plus | 5,5 |

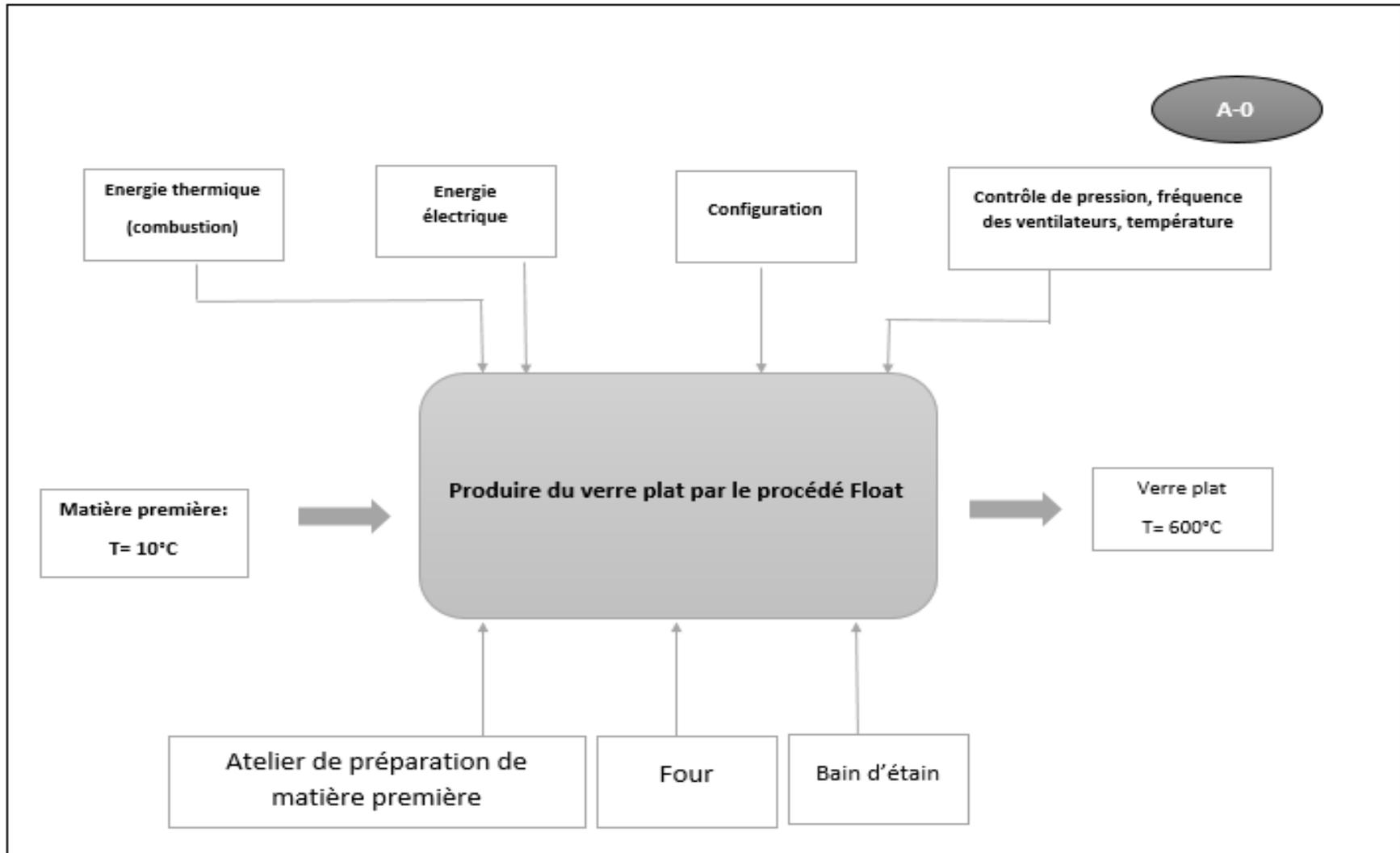
Annexe 5 : Longueur normalisé et le coefficient K_L pour les courroies classiques.

| | A | B | C | D | E |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 26 | 0,78 | | | | |
| 31 | 0,82 | 0,80 | | | |
| 35 | 0,85 | 0,80 | | | |
| 38 | 0,87 | 0,82 | | | |
| 42 | 0,89 | 0,86 | | | |
| 46 | 0,91 | 0,88 | | | |
| 51 | 0,93 | 0,89 | 0,80 | | |
| 55 | 0,97 | 0,91 | | | |
| 60 | 1,00 | 0,94 | 0,83 | | |
| 68 | 1,02 | 0,96 | 0,85 | | |
| 75 | 1,04 | | 0,87 | | |
| 80 | | | | | |
| 81 | | 0,98 | 0,89 | | |
| 85 | 1,05 | 0,99 | 0,90 | | |
| 90 | 1,07 | 1,00 | 0,91 | | |
| 96 | 1,08 | | 0,92 | | |
| 97 | | 1,02 | | | |
| 105 | 1,10 | 1,03 | 0,94 | | |
| 112 | 1,12 | 1,05 | 0,95 | | |
| 120 | 1,13 | 1,06 | 0,96 | 0,88 | |
| 128 | 1,28 | 1,08 | 0,98 | 0,89 | |
| 144 | | 1,10 | 1,00 | 0,91 | |
| 158 | | 1,12 | 1,02 | 0,93 | |
| 173 | | 1,14 | 1,06 | 0,95 | 0,92 |
| 180 | | 1,15 | 1,07 | 0,96 | 0,93 |
| 195 | | | 1,10 | 0,98 | 0,95 |
| 210 | | 1,17 | 1,13 | 1,00 | 0,97 |
| 240 | | 1,18 | 1,15 | 1,02 | 0,99 |
| 240 | | 1,22 | 1,17 | 1,04 | 1,01 |
| 270 | | 1,24 | 1,18 | 1,06 | 1,03 |
| 300 | | 1,27 | 1,20 | 1,07 | 1,04 |
| 330 | | | 1,21 | 1,09 | 1,06 |
| 360 | | | | 1,10 | 1,07 |
| 390 | | | | 1,13 | 1,09 |
| 420 | | | | 1,15 | 1,11 |
| 480 | | | | 1,15 | 1,13 |
| 540 | | | | 1,17 | 1,15 |
| 600 | | | | 1,18 | |
| 660 | | | | | |

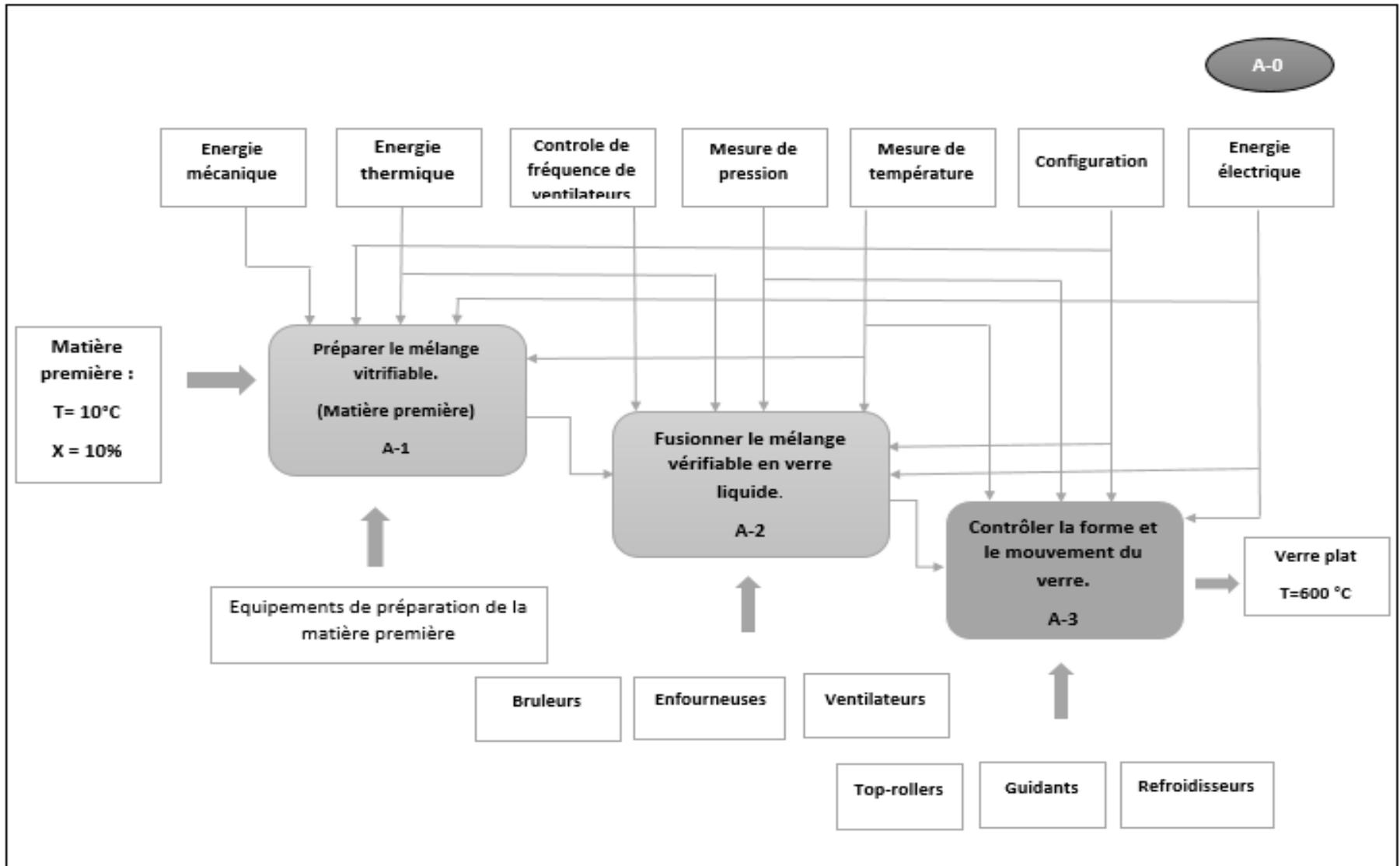
Annexe 6 : Valeur du coefficient de service en fonction de type de transmission et le temps de service.

| 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 | 1,7 | 2,1 |
| * avec des inversions de sens, des démarrages fréquents sous forts couples | | | | |

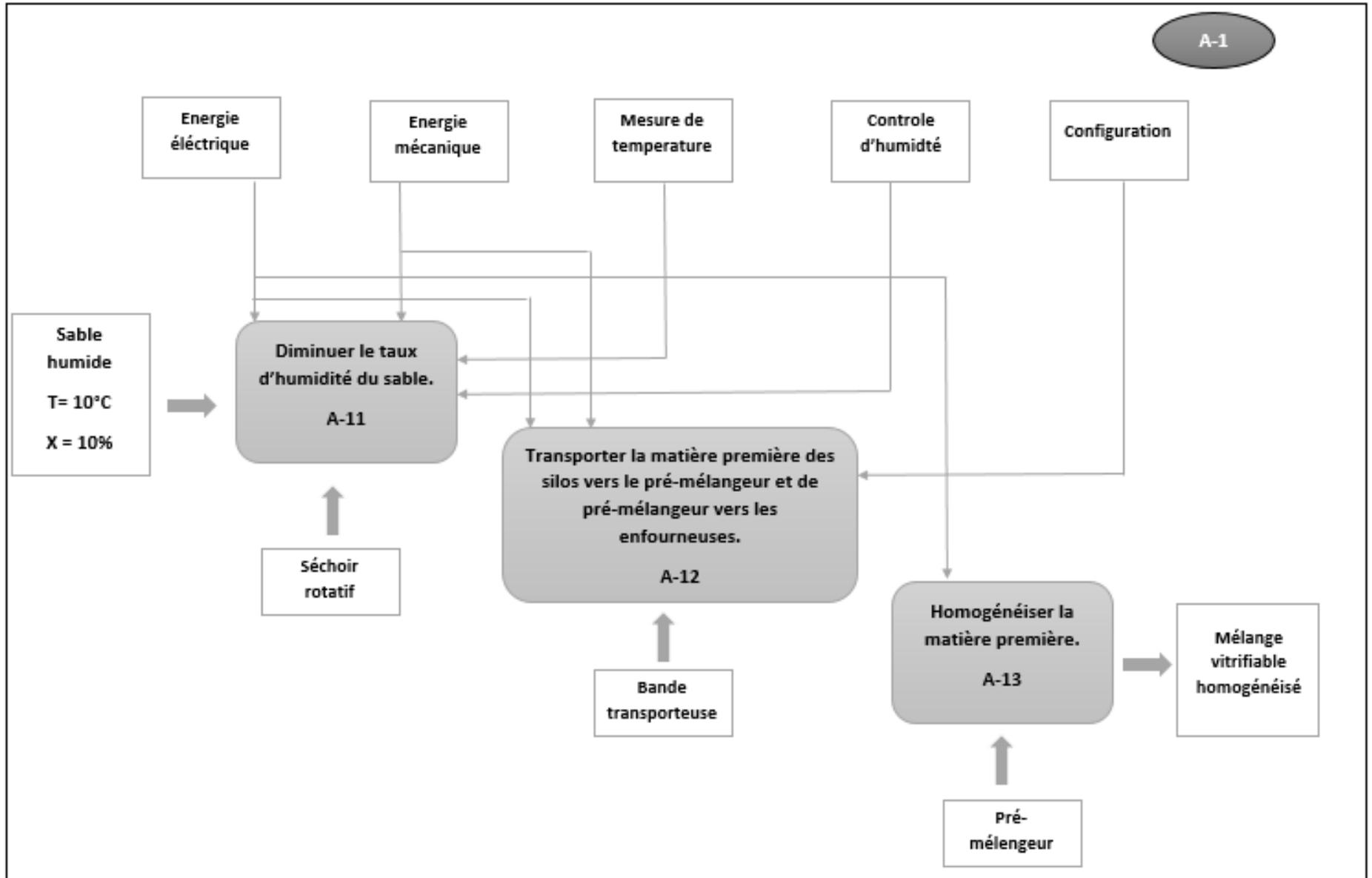
Annexe 7 : Décomposition fonctionnelle par la méthode SADT.



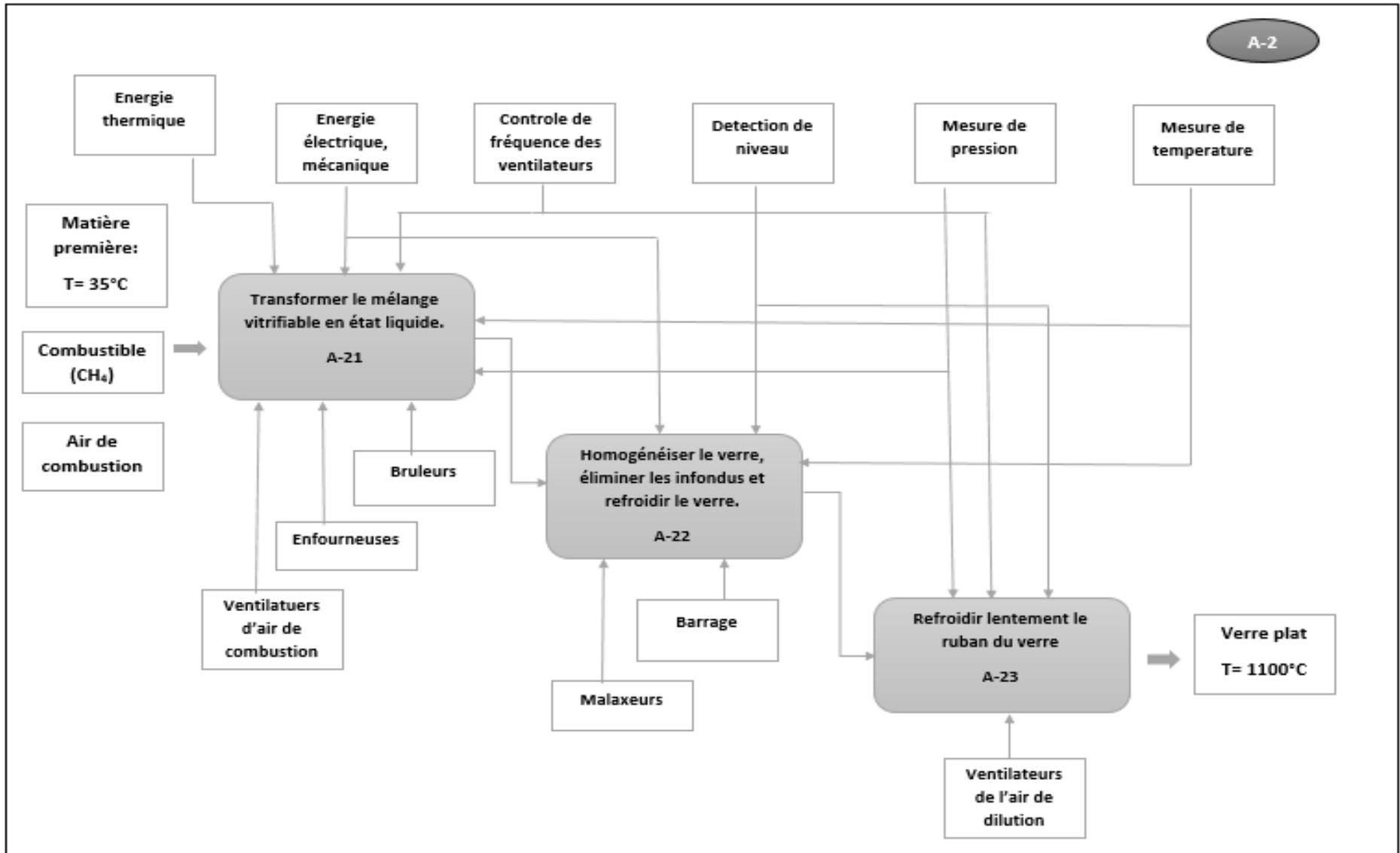
Annexe 7 : Décomposition fonctionnelle par la méthode SADT.



Annexe 7 : Décomposition fonctionnelle par la méthode SADT.



Annexe 7 : Décomposition fonctionnelle par la méthode SADT



Annexe 8 : Tableau AMDEC.

| Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et leurs criticités. | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------|---|-----------------|---|---------------------------------------------|
| Lieu : MFG | Système : Production du verre. | | | | | | | | Le : 15.04.2018 | | |
| Sous-système | Composant | Fonction | Mode de défaillance | Causes | Effets | Moyens de détection | Criticité | | | | Actions correctives |
| | | | | | | | P | G | D | C | |
| Atelier de préparation de la matière première | Séchoir rotatif | Diminuer le taux d'humidité du sable. | Défaillance du mécanisme d'entraînement (moteur+ courroies +poulies) | -Rupture des courroies. -Défaillance mécanique du moteur. | Arrêt d'alimentation du sable. | - Débitmètre -Détecteur d'humidité | 1 | 2 | 1 | 2 | -Entretien périodique de chaque équipement. |
| | | | Changement du degré d'inclinaison du cylindre (Par rapport à celui fixé dans le dimensionnement) | -Corrosion/ déformation des supports du cylindre rotatif. | Débit réduit du sable → effet sur la production. | -Thermo-couples | 3 | 2 | 1 | 6 | -Respect de durée de vie du séchoir. |

| | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------|---|---|---|---|------------------------------------------------------|--|
| | | | | | | | | | | | | |
| | Pré- mélangeur | Homogénéiser le mélange vitrifiable. | Fonctionnement dégradé. | -Défaillance de l'un de ses composants. | -Mélange non homogénéisé → Mauvaise qualité de verre. | Inexistants . | 3 | 2 | 4 | 6 | -Entretien périodique de chaque équipement. | |
| | | | Perte de fonction. | -Coupure d'électricité. -Défaillance de l'un de ses composants. | | | 3 | 2 | 4 | 6 | | |

Annexe 8 : Tableau AMDEC.

| Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et leurs criticités. | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|---|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lieu : MFG | Système : Production du verre. | | | | | | | Le : 15.04.2018 | | | |
| Sous-système | Composant | Fonction | Mode de défaillance | Causes | Effets | Moyens de détection | Criticité | | | | Actions correctives |
| | | | | | | | P | G | D | C | |
| Bassin de fusion. | Ventilateurs d'air de combustion. | Assurer l'apport d'air de combustion pour chaque port. | Refus de démarrage de ventilateur et défaillance dans le système de redondance. | -Défaillance mécanique. -Défaut de commande. -Problème électrique (Perte d'alimentation en électricité, court-circuit, défaut d'un composant électrique au niveau des armoires). | -Coupure d'air de combustion. -Chute de la température dans le four → Détérioration des briques de joint (choc thermique) → Effondrement du mur du four. -Augmentation de la proportion en gaz (CH ₄) → explosion. | - Débitmètre. -Détecteur de pression. -Détecteur de niveau. | 5 | 4 | 1 | 20 | -Augmenter la quantité d'utilisation de calcins jusqu'à l'arrêt de chargement de matières brutes. -Informers l'atelier de verre flottant de réduire la tirée. -Maintenance du ventilateur, réglage sans retard de la quantité du combustible et l'ouverture de registre de pression de four. |

| | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---|---|---|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | Ouverture complète save de la vanne pneumatique de réglage d'air. | -Corrosion. -Erosion. -Blocage mécanique. | -Rapport non proportionnel air-gaz et donc combustion incomplète. -Augmentation du débit d'air → surpression. | - Débitmètre. -Détecteur de pression. | 5 | 3 | 1 | 15 | -Maintenance et contrôle périodique. -Mode manuel. -Prévenir un système de redondance. |
| | | | Bouchage au niveau de débitmètre. | Impuretés entraînées par l'air. | Ouverture complète de la vanne pneumatique → Excès d'air de combustion (surpression) | | 5 | 3 | 1 | 15 | -Débouchage dans le niveau en question ou bien le remplacement de la vanne. |
| | Enfourneuse | Alimentation en mélange vitrifiable. | Arrêt de l'enfourneuse. | -Défaillance mécanique. | -Rupture d'alimentation en matière première. -Abaissement de niveau de verre → coupure la plaque de verre. | Détecteur de niveau. | 4 | 2 | 3 | 8 | -Informé le personnel responsable. -Ressortir l'enfourneuse partiellement, la réparer et la nettoyer ou bien la remplacer carrément. -Redémarrage avec précautions. |
| | | | Rapport non | -Défaut | -Perturbation des | | 3 | 2 | 3 | 6 | -Etablissement |

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---|---|---|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| | | | proportionnel des vitesses partielles des enfourneuses | mécanique. -Défaut de commande. | courants au niveau de verre. | | | | | | du rapport des vitesses. | |
| | | | Non ouverture/ouverture partielle de vannes de la trémie. | -Corrosion. -Défaillance mécanique de la vanne. -Dépassement de durée de vie. | -Ecoulement réduit/pas d'écoulement de la matière première. -Abaissement du niveau du verre. | | 3 | 2 | 3 | 6 | -Changement en mode manuel. -Maintenance / remplacement des vannes ou leurs composants. -Réduire la tirée. | |
| Anneaux d'étanchéité (buse d'injecteur). | éviter l'entrée d'air présent autour des brûleurs dans le four. | | -Décalage de l'axe de la brique de joint par rapport à l'axe de la bride métallique de fixation de l'injecteur. | -Maintenance mal effectuée. - Détérioration des briques de buse. | -Retour de flamme. | -Détection visuelle. | 2 | 3 | 3 | 6 | -Surveillance périodique. -Débouchage de la buse. | |
| | | | Bouchage de la buse. | -Erosion des briques de joint. -Fusion des briques entourant la buse. -Condensation de poussière de verre à l'intérieur de buse. | | | | 3 | 3 | 3 | 9 | |
| | | | Déformation de l'injecteur. | Mal refroidissement d'injecteur. | Retour de flamme et une fuite de gaz de combustion → explosion | Détection de gaz périodique en utilisant des détecteurs | 5 | 4 | 3 | 20 | -Emplacement d'un système de détection de gaz. -Emplacement des détecteurs | |

| | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---|---|---|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | portatifs. -Détection visuelle de la flamme. | | | | | de flamme pour éviter le minimum de retour de flamme. |
| | Système d'inversion. | Changer le sens d'entrée d'air de combustion (et le sens de sortie des fumées). | Défaillance des freins de contrôleur Et fin de course (frein de secours). | -Usure. -Dépassement de durée de vie. | Abaissement de la température et la pression du bassin de fusion → diminution de la pression dans le bassin de repos → rétrécissement du ruban de verre. | Inexistante. | 4 | 3 | 4 | 12 | -Changement de contrôleur. -Surveillance périodique de l'équipement. |
| | Chambre de régénération. | - Récupération des gaz brûlés et réchauffage d'air de combustion. | - Bouchage des briques d'empilage. | -Condensation de vapeur du verre. -Matières solides entraînées par les fumées. | - Augmentation de pression → Effondrement du mur de frappe de la chambre. | -Détecteur de pression des fumées. -Débitmètre d'air de combustion | 6 | 3 | 1 | 18 | -Débouchage des briques (manuellement) . -Ouverture complète de registre principal. -Vérification périodique. -Etalonnage des détecteurs. |
| | | | | | | | | | | | |

Annexe 8 : Tableau AMDEC.

| Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et leurs criticités. | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|---|---|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lieu : MFG | Système : Production du verre. | | | | | | | | | Le : 15.04.2018 | |
| Sous- système | Composant | Fonction | Mode de défaillance | Causes | Effets | Moyens de détection | Criticité | | | | Actions correctives |
| | | | | | | | P | G | D | C | |
| Gorge | Malaxeurs | -Assurer l'homogénéisation du verre. -Refroidissement du milieu. | -Fuite d'eau de refroidissement. | -Impact chaud. -Usure d'équipement. | Solidification du ruban de verre. -Diminution de la température dans le four. | Thermocouple. | 3 | 3 | 1 | 9 | -Maintenance préventive. - Ressortir les malaxeurs endommagés de la gorge. |
| | | | Pas de rotation de la pale de malaxeur. | -Défaillance mécanique du moteur. -Coupure d'électricité. | -Effet sur la qualité de verre. | | 3 | 2 | 1 | 6 | |
| | Barrage | -Refroidissement. -Empêcher le passage des infondus avant l'arrivée au bassin de repos. | -Pas d'écoulement d'eau de refroidissement. | -Coupure d'électricité. -Fuite dans les conduites d'eau. | -Déformation d'équipement. Solidification du verre. Contamination du verre. | Thermocouple. Contrôle visuelle. | 2 | 3 | 1 | 6 | Maintenance préventive et curative de barrage. |
| | | | Défaillance mécanique de la pompe d'eau. | -Vieillissement de l'équipement. -Usure. -Corrosion. | -Coupure d'eau → augmentation de la température du barrage → flexion. | Débitmètre | 2 | 3 | 1 | 6 | Utiliser la force de gravité dans le réservoir d'eau comme solution pour alimenter le réseau en eau. |
| | | | | | | | | | | | |

Annexe 8 : Tableau AMDEC.

| Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et leurs criticités. | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------|---|---|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lieu : MFG | Système : Production du verre. | | | | | | | | | Le : 15.04.2018 | |
| Sous- système | Composant | Fonction | Mode de défaillance | Causes | Effets | Moyens de détection | Criticité | | | | Actions correctives |
| | | | | | | | P | G | D | C | |
| Bassin de repos. | Ventilateurs d'air de dilution | Assurer la consigne de température de formage au niveau de bain d'étain. | Refus de démarrage de ventilateur | -Défaillance mécanique. -Défaut de commande. -Problème électrique (Perte d'alimentation en électricité, court-circuit, défaut d'un composant électrique au niveau des armoires). | Effet sur l'épaisseur du ruban au niveau de bain d'étain. | Détecteur de température et de niveau. | 2 | 2 | 1 | 4 | -Surveillance et entretien périodiques. -Maintenance/ Remplacement des vannes. -Mettre en place un système de redondance assurant la continuité d'alimentation en électricité en cas de coupure (Groupes électriques). |
| | | | Non ouverture de la vanne | -Défaut de commande. -Blocage mécanique. | -Ecoulement réduit d'air → augmentation de température dans le bassin. | Débitmètre. | 3 | 3 | 1 | 9 | |

| | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|----------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---|---|---|---|--|
| | | | Défaillance en position ouverte. | -Blocage mécanique. - Défaut électrique. | . -Débit non stable du verre liquide dans le bain d'étain→ Elargissement du ruban impliquant le contact avec les parois et donc la perte de la plaque. | Débitmètre Détection visuelle de niveau. | 3 | 3 | 1 | 9 | |
|--|--|--|----------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---|---|---|---|--|

Annexe 8 : Tableau AMDEC.

| Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et leurs criticités. | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------|---|---|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lieu : MFG | Système : Production du verre. | | | | | | | | | Le : 15.04.2018 | |
| Sous-système | Composant | Fonction | Mode de défaillance | Causes | Effets | Moyens de détection | Criticité | | | | Actions correctives |
| | | | | | | | P | G | D | C | |
| Bain d'étain | Top-rollers | Formage. | Colmatage du verre sur la molette. | Chute de température dans le bain. | Réduction de la vitesse de rotation du Top-Roller. | -Visuelles. | 3 | 2 | 3 | 6 | -Coupure d'air de refroidissement. -Elever le Top-Roller. -Augmenter les vitesse d'entrainement principal. -Exercer une force sur les bords du ruban en utilisant des outils adéquats jusqu'à le Top Roller s'appuie à nouveau sur le ruban. |
| | | | Vibration. | -Défaillance du moteur. - Augmentation de la vitesse de rotation. | -Défaillance dans le support de molette. -Détérioration de la molette. | | 2 | 3 | 3 | 6 | |
| | | | Arrêt de rotation. | -Coupure d'électricité. - Défaillance du moteur. | -Enroulement du verre sur la molette du Top Roller. | | 2 | 3 | 3 | 6 | |
| | | | Détachement du ruban de la tête du Top Roller. | -Défaillance dans le mécanisme mouvant la tweel régulatrice (Moteur, vis sans fin). -Défaillance des codeurs | -Collage du verre sur les parois du bain. →Perte de la plaque. | | 2 | 3 | 3 | 6 | |

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---|---|---|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| | | | | de vitesse au niveau de l'étenderie. | | | | | | | |
| Guidants | Orientation du ruban de verre. | Fuite d'eau de refroidissement. | - Vieillesse de l'équipement. - Fissure. | - Solidification de verre. - Augmentation de la température de guidant → déformation de l'équipement. - Emergence du guidant dans le ruban. | Inexistante. | 2 | 3 | 4 | 6 | -Maintenance préventive et curative des guidants. - Ressortir les guidants endommagés du bain. | |
| Résistances électriques | Régulation fine de la température du verre qui est progressivement réduite. | -Déformation de fil chaud. | -Fragilité. -Dépassement de durée de vie. -Utilisation à haute température. | Fil de résistance coupé → influence sur la production. -Diminution de température dans le bain. | Thermocouple. | 3 | 3 | 1 | 9 | -Remplacement des résistances concernées. -Arrêt d'écoulement de verre (descente de la tuile métallique de secours). | |
| Tweel régulatrice. | Réglage de débit de ruban de verre. | Défaillance de mécanisme mouvant la tweel. | -Coincement de la chaîne. -Défaillance mécanique du moteur. | -Perte de contrôle sur l'épaisseur du ruban de verre. - Débordement du verre. | Détection visuelle de niveau. | 2 | 2 | 3 | 4 | -Balancer vers le système de redondance (la tweel métallique). | |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|---|---|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | Déformation de la base de la tweel . | -Impact chaud → érosion. | -Débit irrégulier du verre. | Détecteur de niveau. | 1 | 3 | 1 | 3 | Changement e la tweel en respectant les consignes suivantes : -La nouvelle tweel doit être préchauffée. -La faire descendre doucement jusqu'à 20 mm du verre fondu. -Assurer que l'étanchéité autour de tweel est bien établie. |
| Conduites de gaz de protection (N ₂ , H ₂). | Assurer le cheminement du gaz de protection. | Fuite externe. | -Agression externe. - Vieillessement -Corrosion. | <u>Cas de conduite de N₂</u> : Accumulation de H ₂ → explosion | -Débitmètre | 3 | 4 | 1 | 12 | -Arrêt l'alimentation en H ₂ . -Fermer la vanne de l'azote. -Après le retour à l'état normal, il faut alimenter le bain en H ₂ après 30min d'alimentation en azote. | |

| | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---|---|---|---|--------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | <u>Cas de conduite de H₂ :</u> Chute de pression dans le bain. | -Détecteur de pression. | 3 | 2 | 1 | 6 | Il faut juste informer le personnel responsable pour régler le problème. |
|--|--|--|--|--|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---|---|---|---|--------------------------------------------------------------------------|

Annexe 9: Tableau HAZOP.

| Hazard Operability (HAZOP). | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Système : | | | | | | | | |
| Nœud: Bassin de fusion. | | | | | | | | |
| Composant | Mot clé | Paramètre | Cause | Conséquence | Détection | Mesure de sécurité existante | Proposition D'amélioration | Niveau |
| Carneau principal. | Plus de | Pression | - Ouverture partielle de registre de réglage de pression et faible force d'aspiration de registre de cheminée. (situées au niveau de carneau principal) | - Accumulation des fumées dans le four → surpression. | -Détecteur de pression. -Débitmètre. | -Maitrise de régime de pression. -Intervention immédiate. -Vannes de sécurité. | -Ouvrir à fond le registre de réglage de pression ou le registre de racine de cheminée. -Augmentation de la force d'aspiration. (Changement de la position de registre principal). | Dérive critique |
| | Moins de | | Mauvaise étanchéité. | -Fuite. -Mal évacuation des fumées. | -Renforcer l'étanchéité avec des briques d'argiles ou des poudres d'argiles. | Dérive Importante | | |

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| | | | | | | | | |
| Carneaux secondaires. | Plus | Pression | - Blocage en position ouverte de la vanne régulatrice d'air de combustion Et défaillance de l'inverseur coté fumées. | -Surpression dans le four. -Fuite d'air dans le châssis de registre coté fumée. | Débitmètre Détecteur de pression. | -Maitrise de régime de pression. -Intervention immédiate. -Vannes de sécurité. | -Contrôler l'étanchéité de l'endroit de fuite d'air. -Maintenance et vérification périodique des vannes. | Dérive critique |
| Conduite d'air de combustion. | Moins de | Pression | -Dépôt de matière dans la conduite. -Fuite dans la conduite. | -Diminution de rendement de ventilateur. -Mauvaise combustion. | Débitmètre. Détecteur de pression. | - Alarmes. -Intervention immédiate. | -Transmetteur de pression sur la conduite d'air comprimé. -Changement régulier du grillage au niveau des ventilateurs. -Maintenance et vérification périodique. | Dérive importante. |
| | Moins de | Débit | -Fuite externe. -Ouverture partielle de la vanne. | -Flamme trouble, longue et flottante → effets sur les parois et la voûte. | | -Maitrise de régime thermique et de pression dans le four. -Intervention immédiate au niveau des | -Réduire convenablement la quantité de combustible. -Augmenter la quantité de calcins jusqu'à l'arrêt de la | Dérive Importante |

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| | | | | | | injecteurs. | matière brute. -Réduire la tirée. | |
| | Pas de | Débit | -Non ouverture de la vanne. -Défaillance dans le moteur du ventilateur. | - Chute de température dans le four → mauvaise fusion, rétrécissement des briques de joint du four. | | - Alarmes. -Changement de la consigne de pilotage de procédé. -Intervention immédiate sur les vannes. -Régulateur de température. | -Maintenance de la vanne et vérification périodique du système. | Dérive intolérable |
| Conduites de gaz de combustion. | Plus de | Pression | -Défaut dans le débitmètre (indication erronée). -Blocage en position ouverte de la vanne régulatrice. - Fonctionnement intempestif de la vanne | -Rupture de la conduite. -Fuite au niveau de la bride de la vanne. | Débitmètre. Détecteur de pression. | -Vanne de sécurité (fonction : coupure de gaz). -Intervention immédiate. - Alarmes. -Régulateur de température. | -Mettre en place un système de redondance. -Etalonnage des instruments de mesure des différents paramètres. (Pression et débit). | Dérive Intolérable |

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| | | | régulatrice. | | | | | |
| | Moins de | Pression | -Fuite. -Ouverture partielle de la vanne régulatrice. | -Mauvaise alimentation des injecteurs de gaz. | | | -Faire l'inversion appuyée sur la position de commande manuelle. | Dérive Intolérable |
| | Pas de | Débit | -Rupture totale de la conduite. -Blocage en position fermée de la vanne régulatrice. | -Chute de la température dans le four. | -Débitmètre | - Alarmes. -Changement de la consigne de pilotage de procédé. -Intervention immédiate sur les vannes. -Régulateur de température. | -Réduire légèrement le débit d'air de combustion. -Descendre le registre de racine de cheminée. | Dérive Intolérable |
| Conduites d'eau de refroidissement. | Plus de | Pression | -Défaillance de la vanne régulatrice. -Réduction de la section de la conduite sous l'effet d'encastrement. | -Rupture des brides de jonction. -Rupture de la conduite. -Fuite. | -Détecteur de pression. | - Alarmes -Intervention immédiate. | -Système d'alarme en cas de surpression. | Dérive Importante |

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Conduites d'eau de refroidissement. | Moins de | Pression | -Fuite externe. - Rupture des flexibles de refroidisseur à eau. | -Perturbation d'alimentation en eau. | -Détecteur de pression | - Alarmes -Intervention immédiate | -Système d'alarme en cas de surpression | Dérive Importante |
| | Moins de | Débit | -Colmatage de la conduite. -Fuite. | -Affaissement et la déformation des équipements de refroidissement à eau. | Débitmètre. | - Alarmes -Intervention immédiate. | -Ressortir immédiatement l'équipement et le remplacer. | Dérive Importante |
| | Pas de | | -Défaut mécanique ou électrique des pompes. | | | | | Dérive Importante |
| Bassin de fusion. | Plus de | Pression | -Défaillance de la vanne régulatrice d'air de combustion. -Bouchage des briques d'empilage de la chambre de la régénération. -Défaillance dans le registre de réglage de pression de four. | -Sortie de flammes par la fissure des briques du four et l'orifice de buse →Détérioration du corps du four. -Augmentation de la consommation du combustible. | -Débitmètre. - Thermocouples. -Détecteur de pression. | - Alarmes. -Intervention immédiate. | -Maintenance et contrôle périodique. -Mode manuel. -Prévenir un système de redondance -Débouchage des briques d'empilage. -Maintenance /Remplacement de la vanne. | Dérive Importante |

| | | | | | | | | |
|--|----------|----------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|--|------------|-----------------------------------------|--------------------|
| | | | | | | | | |
| | Moins de | Pression | -Perte d'alimentation du gaz ou bien d'air de combustion. | -Réduction de la température. | | - Alarmes. | -Formation et information du personnel. | Dérive intolérable |

| Niveau | Signification |
|--------------|------------------------------------------------------------------|
| Important. | Dérive qui conduit aux effets significatifs sur les équipements. |
| Critique. | Dérive qui conduit à une surpression. |
| Intolérable. | Dérive qui conduit à une chute de température. |