



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

Faculté des Sciences et Techniques de Fès

Département de Génie Industriel



Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par

Mohamedhen El Bechir

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

Spécialité : Ingénierie en Mécatronique

**Analyse de la criticité du système solaire
et propositions d'amélioration**

Lieu : centrale thermo_solaire Ain Beni Mathar

Réf : 07/IMT19

ABENGOA
SOLAR

Soutenu le 28 Juin 2019 devant le jury :

- **Pr. SQALLI HOUSSAINI DRISS** (Encadrant)
- **Pr. TAHRI DRISS**(Examineur)
- **Pr. ENNADI ABDELALI**(Examineur)



Remerciement

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle. Il apparait une opportunité de commencer ce rapport de stage par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de ce stage, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de m'aider à un moment très profitable.

Aussi, Je tiens à remercier vivement mon maitre de stage, l'ingénieur **Meqqori amine**, chef de service opérations au sien de l'ONE (office nationale d'électricité), pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien.

Je remercie également toute l'équipe de quart et de maintenance de l'organisme ABNGOA pour leur accueil et leur esprit d'équipe.

Je remercie également monsieur **Yassine Baqqal**, pour son aide.

Mes remerciements les plus sincères vont à notre professeur encadrant à la Faculté des Sciences et Techniques-Fès Mr. **Driss sqalli houssaini**, pour les directives pertinentes qu'il m'a prodiguées, pour son encadrement clairvoyant et pour son assistance dans la rédaction de ce rapport.

Mes remerciements s'adressent également aux honorables membres du jury Mr. **Tahri Driss** et **Mr.ennadi Abdelali** qui ont accepté d'examiner ce modeste travail et de siéger à sa soutenance. Enfin, je tiens à remercier toute personne qui m'a conseillé et aidé lors de la rédaction de ce rapport de stage : ma famille, mes amis.



Dédicaces

A MA TRÈS CHÈRE MÈRE et A MON TRÈS CHER PÈRE

A ma très chère sœur et mes frères

A tous mes ami(e)s fidèles

A tous mes Professeurs qui ont contribué à mon éducation et formation.

Bref, à tous ceux qui m'ont aimé.



Abréviations

ABM: Ain Beni Mathar.

ONE: office national d'électricité

ISCC: Integred Solar Combined Cycle

TAG : Turbine à gaz ALSTOM.

TAV : turbine à vapeur ALSTOM.

Aéro : Aérocondenseur refroidissement à sec.

HRSG: Heat Recovery Steam Generator

HTF: Heat Transport Fluid

AMDEC : l'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

GVS : générateur de vapeur solaire

PV : Puissance dissipée par les appareils.

P : la puissance de refroidissement du climatiseur.



Liste des tableaux

Tableau 1: Fiche technique de l'ONE.....	4
Tableau 2: Fiche technique d'ABENERENERGIE ABM.....	7
Tableau 3: Fiche technique de la centrale ABM	8
Tableau 4: Analyse Pareto du système solaire.....	17
Tableau 5: Grille de cotation de gravité.....	19
Tableau 6: Grille de cotation de fréquence.....	19
Tableau 7: Grille de cotation de détection	20
Tableau 8: Fiche AMDEC du sous-système collecteur cylindro-parabolique.....	21
Tableau 9: Fiche AMDEC des pompes	22
Tableau 10: Analyse Pareto pour la criticité de défaillance du collecteur.....	23
Tableau 11: Analyse Pareto pour la criticité de défaillance des pompes	24
Tableau 12: Fiche technique du climatiseur	34

Liste des figures :

Figure 1: Répartition géographique de ABNGOA.....	5
Figure 2: Schéma de fonctionnement général de la centrale	9
Figure 3:Schéma de mode de fonctionnement en cycle ouvert.....	10
Figure 4:Schéma de mode de fonctionnement en cycle combiné	10
Figure 5:Schéma de mode de fonctionnement en mode hybride.....	11
Figure 6:Schéma de la boucle du champ solaire.....	14
Figure 7:Schéma du collecteur cylindro-parabolique.....	14
Figure 8:Schéma de la zone HTF	15
Figure 9:Diagramme Pareto.....	17
Figure 10:Diagramme de Pareto pour les défaillances du collecteur	23
Figure 11:Diagramme de Pareto pour les défaillances des pompes.....	25
Figure 12:Diagramme cause-effet pour la panne fuite piston du vérin.....	28
Figure 13: Schéma du soufflet de protection du vérin	30
Figure 14:Diagramme cause-effet pour la panne dégradation de garniture de la pompe	30
Figure 15:Diagramme cause-effet pour la panne de la rotule	31
Figure 16:Diagramme cause-effet pour la panne de perte de communication avec le collecteur	32
Figure 17:Diagramme cause-effet pour la panne vibration anormale de la pompe.....	35



Sommaire

Remerciement	I
Dédicaces	II
Abréviations	III
Liste des tableaux	IV
Liste des figures :	V
Introduction générale :	1
Chapitre I : présentation de l'Entreprise et mode de fonctionnement de la centrale ISCC ABM	2
1. Présentation de l'Entreprise.....	3
1.1. ONE.....	3
1.2 ABENGOA	5
2 Présentation et fonctionnement de la centrale d'ABM	7
2.1. Description de la centrale d'ABM	7
2.2 Les principales composantes de la centrale :	8
2.3 Caractéristiques techniques :	8
2.4 Principe de fonctionnement de la centrale ISCC.....	9
Chapitre II : Contexte du projet et Analyse de la criticité du système solaire	12
1. La problématique.....	13
2. Analyse statistique du système solaire	13
2.1. Présentation du système solaire.....	13
3. Analyse de la criticité du système solaire.....	16
3.1. Analyse de l'historique de défaillances.....	16
3.2. Analyse AMDEC :	18
Chapitre III : Analyse des défaillances et propositions d'amélioration	26
1. Introduction :	27
2. Maintenance préventive de l'entreprise.....	27
3 Analyse des pannes	28
3.2 Panne dégradation de garniture mécanique	30
3.3 Panne rotule endommagée.....	31
3.4 Panne perte de communication du collecteur	32
3.5 Panne vibration anormale de la pompe	35
Conclusion :	37
Bibliographie	38
Annexes	39



Introduction générale :

Dans le domaine de production d'électricité, actuellement le monde entier va migrer vers l'énergie renouvelable pour diminuer les émissions de CO2 et préserver les ressources mondiales en énergies fossiles.

Comme alternative à ces préoccupations, le développement et l'implémentation des énergies renouvelables sont incontournables. Des ressources énergétiques illimitées et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées.

Pour cela la centrale thermo_solaire Ain Beni Mathar intègre l'Énergie solaire dans ces processus de production d'électricité. Particulièrement le système de concentration à collecteurs cylindro_paraboliques. La technique des collecteurs cylindro_paraboliques est actuellement la meilleure des techniques de concentration solaire.

De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80. L'installation typique est constituée de trois éléments principaux : le champ solaire, le système de transfert de la chaleur et le système de génération électrique.

Pour que le rendement de ce système reste élevé, ainsi que sa disponibilité. L'entreprise doit effectuer une analyse critique de ce système pour déterminer les éléments critiques.

L'objectif de cette analyse est de proposer des solutions pour améliorer la maintenabilité de ce système.

Donc pour atteindre ces objectifs nous allons suivre le plan suivant :

- **Chapitre I** : dans ce chapitre nous allons présenter l'organisme, avec le principe de fonctionnement de la centrale.
- **Chapitre II** : nous allons commencer par la présentation du système solaire, puis une analyse de l'historique des défaillances pour déterminer les sous-systèmes critiques de ce système en utilisant la méthode Pareto et la méthode AMDEC.
- **Chapitre III** : nous allons faire L'analyse des défaillances les plus critiques et proposer des améliorations.

Chapitre I : présentation de l'Entreprise et mode de fonctionnement de la centrale ISCC ABM

Dans ce chapitre nous allons présenter les organismes qui existe dans la centrale et aussi le principe de fonctionnement de la centrale en spécifiant les différents systèmes pour la production de l'électricité.

1. Présentation de l'Entreprise

Au sein de la centrale Ain Beni Mathar il y a deux organismes :

- ✓ ONE : est responsable du transport de l'énergie vers le consommateur.
- ✓ ABENGOA : la responsabilité de cette Entreprise est l'exploitation d'électricité et la maintenance de la centrale.

1.1. ONE

L'Office National de l'Électricité a vu le jour en août 1963 pour remplacer la Société électrique du Maroc qui était responsable depuis 1924, de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

L'ONE est une entreprise d'État sous la tutelle administrative et technique du Ministère de l'Énergie et des Mines. De caractère industriel et commercial, elle est dotée de la personnalité civile et de l'autonomie financière et a été investi de l'exclusivité de la production et du transport.

Elle assure également la distribution de l'électricité dans plusieurs provinces du Maroc notamment en milieu rural.

Les principales missions de l'ONE sont de répondre aux besoins du pays en énergie électrique, gérer et développer le réseau de transport, voir à l'extension de l'électrification rurale, promouvoir le développement des énergies renouvelables, et, finalement, gérer la demande globale de l'énergie électrique. Il compte de nos jours 9148 collaborateurs et plus de 5.6 millions de clients.

En 2016, l'énergie électrique nette a atteint 35 414,527 GWhs en enregistrant un taux de croissance de 2,9 % par rapport à l'année 2015 [1].

1.1.1 Les domaines d'activités de l'ONE/branche électricité

➤ La Production de l'électricité

L'ONE/branche électricité a la responsabilité de fournir sur tout le territoire marocain et à tout instant une énergie de qualité.

Cette fourniture est assurée par des moyens de production qu'il exploite directement ou par des ouvrages confiés à des producteurs concessionnels. À fin 2016, la puissance totale installée de production électrique de l'Office s'élève à 8 261,694 MW, contre 8 158,5 MW en 2015.

(*) à la cote maximale des retenues.

(**) à la cote maximale du vent.

34,48 % de la puissance installée est de source renouvelable [1].

➤ Le transport de l'électricité

D'une longueur totale de 25 545 km en 2016, le réseau de transport national est interconnecté aux réseaux électriques espagnol et algérien, dans l'objectif de :

- Renforcer la fiabilité et la sécurité d'alimentation
- Bénéficier de l'économie potentielle sur le prix de revient du kWh
- Intégrer le marché électrique national dans un vaste marché euromaghrébin.

Avec le renforcement des interconnexions, le Maroc est devenu un carrefour énergétique entre les deux rives de la Méditerranée et offre l'infrastructure de base à l'émergence d'un véritable marché de l'électricité.

L'ONE est le premier distributeur d'électricité au Maroc avec une part de marché de 55%. Il dispose de dix directions régionales sur tout le territoire marocain et d'un réseau commercial de 32 Directions Provinciales et 218 Agences de Service dont 66 Agences de service provinciales. En fin 2016 il a enregistré Plus de 5.6 millions de clients dans tout le monde rural et plusieurs agglomérations urbaines. Le reste de la clientèle étant gérée par des Régies de distribution publiques ou des Distributeurs privés qui sont eux-mêmes clients Grands Comptes de l'office. L'ONE améliore régulièrement la qualité de ses services à travers autre l'externalisation des points d'encaissement, la promotion du prépaiement et la mise en place de "SIRIUS" progiciel intégré de gestion commerciale [1].

1.1.2 Fiche technique

Le tableau ci-dessous (tableau 1) représente la fiche technique de l'ONE.

Raison Sociale	Office Nationale d'électricité et d'eau Potable (ONEE)-Branche électricité (BE)
Statut juridique	Entreprise semi-public
Date de création	Octobre 2012 « par loi no 40-09 »
Siege social	65, Rue Othman Ben Affane-20000 Casablanca-Maroc
Objet sociale	Production, transport et distribution de l'énergie électrique
Coordonnées	Tél : 0522668080-FAX :0522668038 /Mail : one@one.org.ma

Tableau 1:Fiche technique de l'ONE

1.2 ABENGOA

ABENGOA est une société internationale espagnole qui applique des solutions technologiques innovantes pour la durabilité dans les secteurs de l'énergie et de l'environnement.

1.2.1 Historique et répartition géographique

ABENGOA a été Fondée à Séville le 4 janvier 1941 par les ingénieurs Benjumea Javier Puigcerver et Jose Manuel Fernandez-Pasalagua Abaurre, avec un capital de 180 000 pesetas (1 082 euros). Son but initial était de fabriquer des compteurs électriques, bien que la situation économique de l'époque ait empêché le projet. Toutefois, la société a commencé à s'engager dans le développement de projets techniques et installations électriques.

Entre 1941 et 1950, elle a commencé sa propagation au reste de l'Andalousie, le chiffre d'affaires était alors d'environ 45 millions de pesetas (270 456€). Dans les années cinquante, ABENGOA continue de se développer dans le reste de l'Espagne, puis à l'international à partir des années soixante. En 1966, 25 ans après sa création, le chiffre d'affaires de l'entreprise était de 4,88 milliards de pesetas (29 329 391€). Aujourd'hui, ABENGOA développe ses activités dans les secteurs de l'énergie et de l'environnement, grâce à l'ingénierie et les activités de construction, la concession d'infrastructure et la production Industrielle. La société est présente dans plus de 70 pays (figure 1). Depuis 2009, son siège est situé dans le campus Palmas Altas à Séville, il abrite actuellement environ 3 000 employés de la société [1].



Figure 1: Répartition géographique de ABENGOA

1.2.2. Les domaines d'activité d'ABENGOA

ABENGOA est spécialisé dans deux secteurs à forte croissance : l'énergie, l'environnement et dans lesquels il est un leader international.

1.2.2.1 Energie

ABENER de ABENGOA est la filiale qui s'occupe du volet énergétique. Elle crée des installations qui convertissent l'énergie à partir de sources renouvelables dont l'électricité et les biocarburants. Elle construit des lignes de transmission qui prennent en charge les réseaux d'électricité [1].

➤ **L'électricité solaire :**

ABENER fait la promotion, la conception, la construction et l'exploitation d'usines de production d'électricité qui utilisent le soleil à l'aide d'énergie solaire à concentration (CSP) et de la technologie photovoltaïque.

➤ **Transmission de puissance :**

ABENER est leader international dans la construction de lignes de transmission de puissance, tout en étant l'un des principaux détenteurs de lignes de transmission en Amérique latine.

➤ **Biocarburants :**

ABENER fait la promotion, la conception, la construction et l'exploitation des plantes qui produisent des biocarburants pour les transports et elle est le chef de file international dans le développement de biocarburants de deuxième génération.

➤ **Cogénérations :**

Elle conçoit, construit et exploite des centrales de cogénération qui utilisent l'énergie thermique et de l'électricité, en optimisant leur efficacité.

➤ **D'autres activités :**

ABENER réalise de grands projets pour les centrales de production classiques, telles que les centrales à cycle combiné comme celle d'Ain béni mathar ou pour la modernisation des usines. Elle construit également des installations électriques et mécaniques et des systèmes de contrôle dans les domaines de l'énergie, le transport et l'industrie. Elle développe de nouvelles technologies liées à l'hydrogène, l'énergie océanique ou l'efficacité énergétique.

1.2.2.2 Environnement

ABENGOA recycle et récupère les déchets industriels. Elle est également spécialiste de la gestion et du traitement de l'eau. Il conçoit, construit et exploite des installations de traitement des eaux, pour les rendre potable, ou pour les dessaliniser [1].

1.2.2 Fiche technique d'ABENGOA–ABENER Energie-Ain Beni Mathar

Le tableau ci-dessous (tableau 2) représente la fiche technique d'ABNGOA ABM.

Raison Sociale	ABENERENERGIERSARL
Forme juridique	Société à responsabilité limitée
Siège social	Lot Annahda,n°355-Ain Beni Mathar-Province de jerada
Gérant	Manuel J.Valverde Delgado
Registre de commerce	Oujda 19803
Patente n°	11802152
Identification Fiscale n°	10895882
CNSS	No 767-10-28

Tableau 2: Fiche technique d'ABENERENERGIE ABM

2 Présentation et fonctionnement de la centrale d'ABM

2.1. Description de la centrale d'ABM

C'est en 2008 que le Maroc a donné le coup d'envoi des travaux pour construire le site d'Ain Béni Mathar par un coût global de 4,6 milliards de DH.

C'est un site dégagé, pratiquement plat et présentant de grandes surfaces pour son extension. Le choix de ce site a été guidé par le niveau d'ensoleillement, la proximité du gazoduc Maghreb Europe, la proximité à la nappe d'eau et du réseau électrique.

La centrale d'Ain Béni Mathar est constituée par deux turbines à gaz et une turbine à vapeur avec une puissance de 150MW pour les turbines à gaz et 172 MW pour la turbine à vapeur.

À la pointe de la technologie, cette centrale solaire/gaz déploie des miroirs paraboliques thermo solaire à concentration en ligne d'une surface de chauffe de 183 000 m² qui concentrent l'énergie solaire au moyen des collecteurs solaires sur un fluide caloporteur sous haute pression et haute température, Elles permettent d'accroître la production électrique de cette centrale de 450 MW à 472 MW (20 MW à partir de la composante solaire).

En outre, la technologie de refroidissement à sec (aérocondenseur) qui permet de réduire la consommation d'eau de 5,4 millions m³ à 850.000 m³ par an, soit une économie d'eau de 80%. La centrale est dotée d'un système propre de récupération, de traitement et de stockage des rejets liquides dans un bassin d'évaporation étanche de 6 hectares.

Parmi les bénéfices de la nouvelle centrale c'est de réduire les émissions de CO₂ dans la production d'électricité [1].

Cette centrale est donc amie de l'environnement.

2.2 Les principales composantes de la centrale :

La centrale thermo solaire ABM est composé des principales installations suivantes :

- Deux Turbo Alternateur à Gaz ALSTOM (Turbine : GT13 E2-Alternateur).
- Un Turbo Alternateur à Vapeur ALSTOM (Turbine : DKYZ2-1N41B-Alternateur).
- Deux chaudières de Récupération (HRSG).
- Aérocondenseur refroidissement à sec.
- Un champ solaire avec des échangeurs de chaleur (Huile HTF/Eau d'alimentation).
- Des transformateurs 14,5kv/225 kV.
- Un poste d'évacuation d'énergie.
- Des transformateurs 14,5/6,6 kV /400v.
- Un poste à gaz naturel.
- Un poste de déminéralisation d'eau
- Bassin d'évaporation.
- Un groupe électrogène Diesel.
- Des modules de contrôle et de commande.

2.3 Caractéristiques techniques :

Le tableau ci-dessous (tableau 3) représente la fiche technique de la centrale ABM

Superficie du site	160 ha
Puissance totale installée	472 MW dont 20 MW d'origine solaire
Surface de chauffe du champ solaire	183 200 m ²
Consommation spécifique	6912,5 KJ/KWH
Disponibilité Cycle Combiné	93%
Chaleur Solaire	58,7MJ/S

Tableau 3:Fiche technique de la centrale ABM

2.4 Principe de fonctionnement de la centrale ISCC.

La Centrale électrique est constituée de deux turbines à gaz et de leurs alternateurs, de deux chaudières de récupération de chaleur, d'une turbine à vapeur commune et de son alternateur, de trois transformateurs principaux, de deux transformateurs de soutirage, d'une salle de contrôle et d'un échangeur de chaleur solaire, et de postes THT/HT (Figure 2).

L'échangeur solaire est alimenté par un champ de captage de 224 collecteurs cylindro-paraboliques déployés sur un terrain de 80ha. Les ouvrages annexes de la centrale sont constitués de circuits d'eau, de combustibles, d'un groupe électrogène de secours. On distingue 3 modes de fonctionnement dans la centrale [1] :

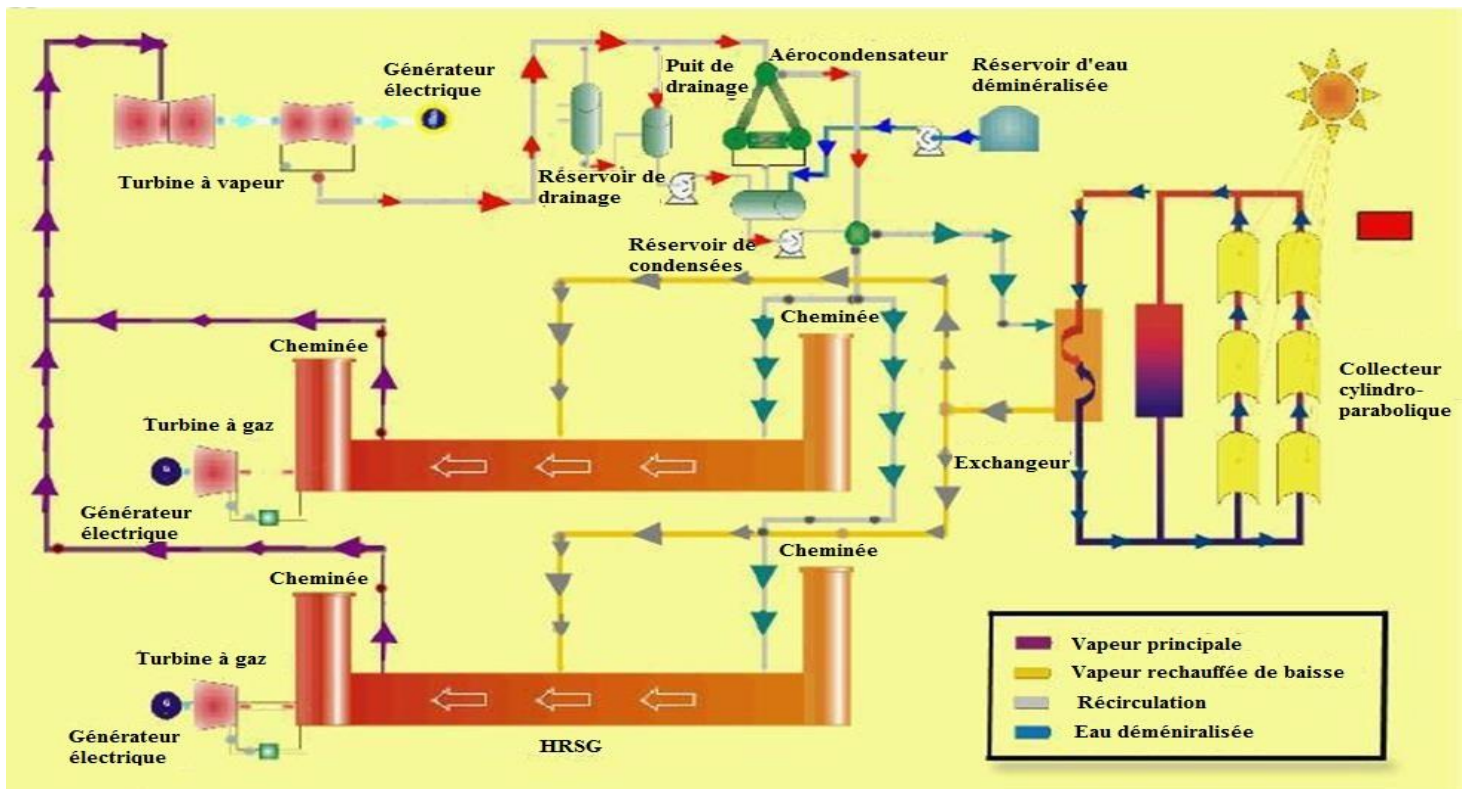


Figure 2: Schéma de fonctionnement général de la centrale

➤ **Mode cycle ouvert :**

Le cycle ouvert (CO) qui consiste à la production de l'électricité à partir du gaz naturel moyennant deux turbines à gaz de 150 MW chacune (figure 3). Dans ce cas on n'exploite pas le système de récupération de la chaleur (HRSG).

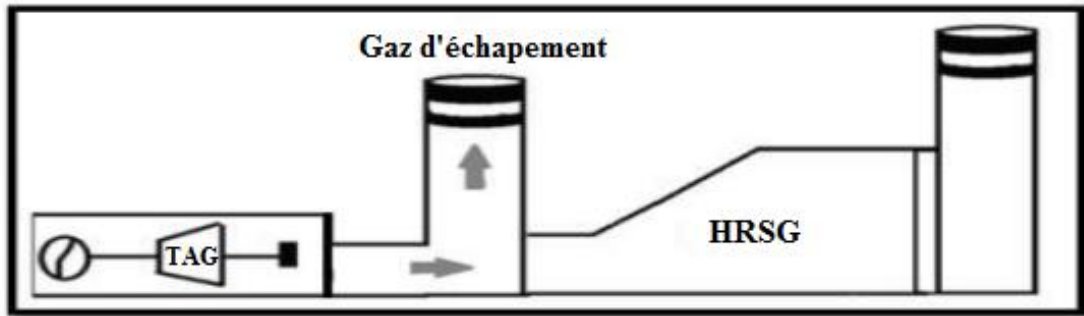


Figure 3:Schéma de mode de fonctionnement en cycle ouvert

➤ **Mode cycle combiné :**

Le cycle combiné (CC) consiste à faire valoriser l'énergie thermique provenant des gaz d'échappement des deux turbines à gaz qui entrent dans la chaudière de récupération (HRSG) à une température d'environ 500°C. Ils transfèrent leurs énergies thermiques au cycle vapeur/eau et quittent la chaudière à une température d'environ 110°C. La vapeur générée actionnera la turbine à vapeur pour produire de l'électricité. Cette combinaison entre les deux TAG et la TAV par l'intermédiaire de la chaudière de récupération (HRSG), engendrant une puissance globale de 450 MW (figure 4).

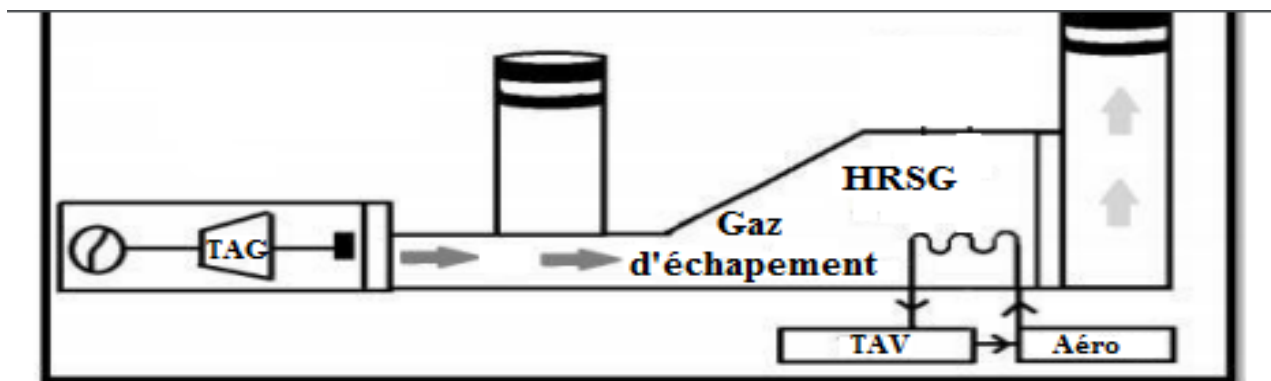


Figure 4:Schéma de mode de fonctionnement en cycle combiné

➤ Mode hybride

Le cycle hybride (CH) consiste à l'intégration du champ solaire dans le cycle combiné. Dans cette centrale thermo_solaire une plus grande quantité d'eau en provenance du condenseur entre dans la chaudière. Après avoir été chauffée jusqu'au point d'évaporation, une partie de l'eau sera conduite à l'échangeur de chaleur solaire (chaudière solaire) où elle sera chauffée au point d'ébullition, évaporée et envoyée au générateur de vapeur, elle sera resurchauffée avant d'être introduite dans la turbine à vapeur étage haute pression (Figure 5).

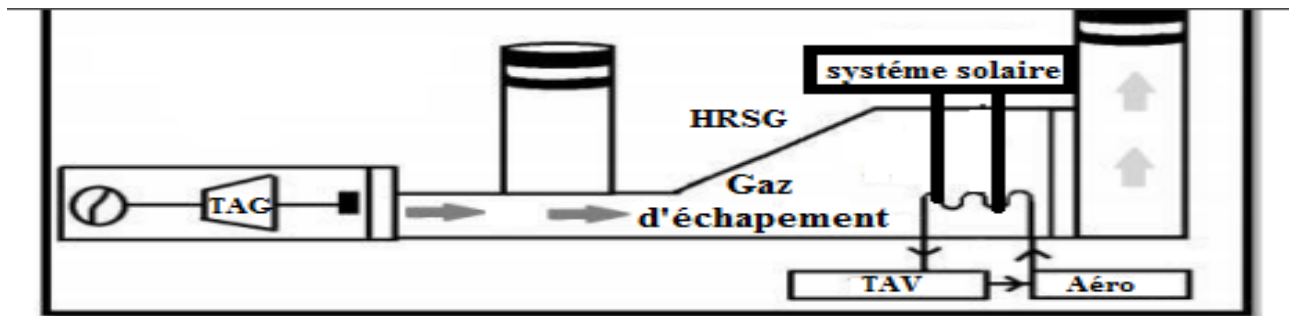


Figure 5:Schéma de mode de fonctionnement en mode hybride

Chapitre II : Contexte du projet et Analyse de la criticité du système solaire

Dans ce chapitre nous allons annoncer la problématique, puis présenter le système solaire et nous allons décomposer le système en sous-systèmes.

À l'aide de la méthode Pareto nous allons déterminer les sous-systèmes les plus critiques et enfin nous allons appliquer la méthode AMDEC pour déterminer la criticité des pannes.

1. La problématique

Au sein de l'entreprise le département de maintenance a l'impact direct sur la disponibilité des équipements, ce qu'influe directement sur le rendement de l'entreprise.

Toutefois, pour tenter de réduire les risques de non-disponibilité des équipements, il y a des méthodes, des techniques et des outils scientifiques qu'ont été développés.

Après une analyse de l'historique, des défaillances répétitives du système solaire ont été recensées.

Pour cela l'entreprise doit améliorer le rendement et la disponibilité de ce système.

Pour atteindre ces objectifs nous allons suivre le plan suivant :

- Analyse de l'historique des défaillances du système solaire pour déterminer les sous-systèmes critiques à étudier à l'aide du diagramme de Pareto.
- Analyse AMDEC
- Analyse Diagramme Ichikawa (diagramme cause-effet)
- Proposition des améliorations pour la résolution de la faible performance, en se basant sur les résultats de l'analyse du diagramme cause-effet.

2. Analyse statistique du système solaire

2.1. Présentation du système solaire

Le système solaire représente 5% de la production totale de la centrale ISCC ABM. Ce système est divisé en deux parties : le champ solaire et la zone HTF [2].

2.1.1. Le Champ solaire

Le champ solaire est divisé en deux parties EST et OUEST, il est constitué de collecteurs cylindro-paraboliques alignés du SUD vers le NORD, et qui suivent le déplacement du soleil. Dans le champ solaire circule l'huile caloporteur nommée HTF chauffée jusqu'à 392°C, l'énergie récupérée du champ solaire sert à produire la vapeur qui est mélangée par la suite avec celle des deux chaudières HRSG11/12 pour faire tourner la turbine à vapeur de puissance 173MW.

Le champ solaire est formé de 56 boucles en parallèle, chaque boucle est composée de 4 collecteurs en série sous forme de U (figure 6). L'huile thermique entre dans la boucle par le premier collecteur à une température basse (292°C) et sort à haute température (392°C) [2].

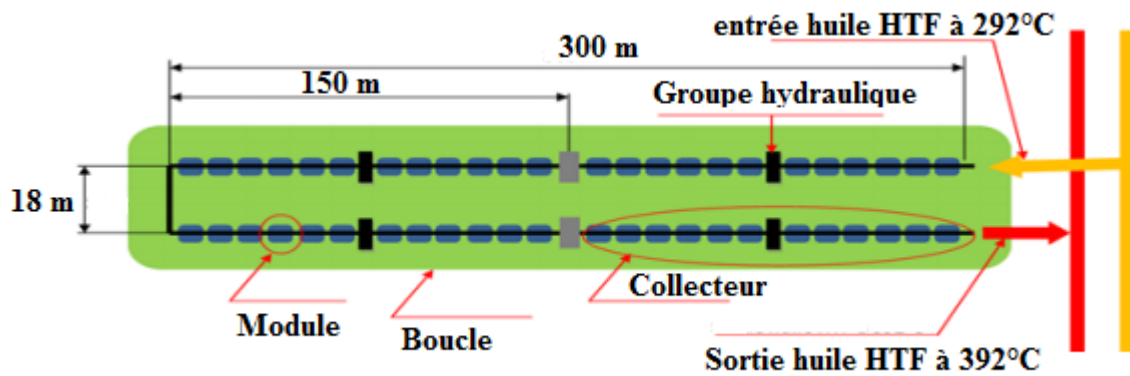


Figure 6: Schéma de la boucle du champ solaire

➤ Collecteur Cylindro-Parabolique :

C'est l'élément de base du champ solaire, il est composé de douze structures mécaniques nommées élément ou module sur les quelles sont montées des miroirs (figure 7), sa longueur totale est de 150 mètres [2].

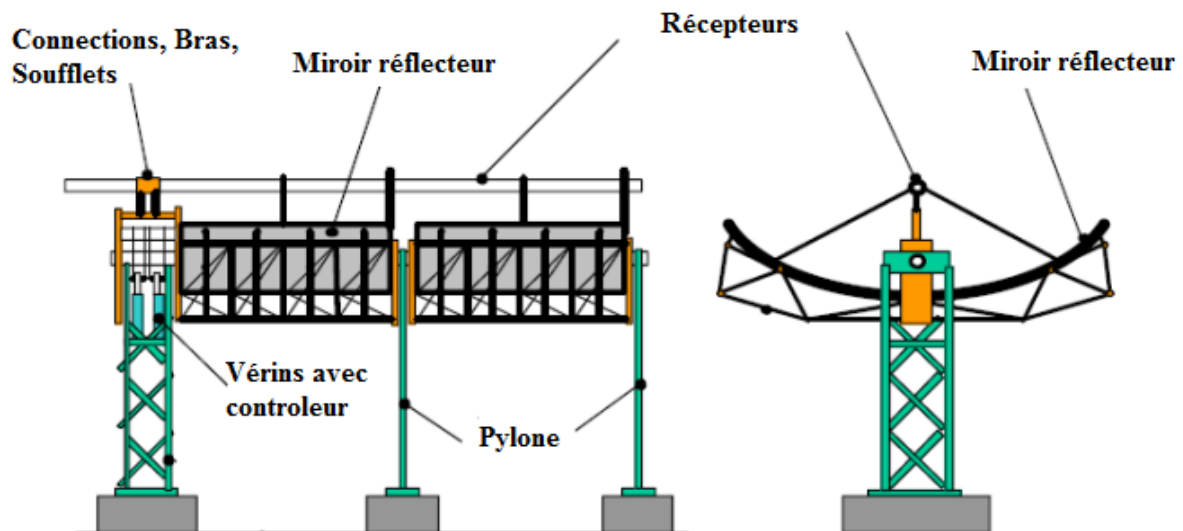


Figure 7: Schéma du collecteur cylindro-parabolique

2.1.2. Zone HTF

La zone HTF est un circuit fermé dans lequel le fluide caloporteur circule avec un débit nominal de 378 kg/s. L'intérêt de cette zone est le transfert d'énergie thermique récupérée au cycle combiné et de gérer le flux du fluide caloporteur. Cette zone est composée d'un système de stockage, un système d'expansion, un système de pompage, un système de filtration, un système GVS, un système d'ouillage et un système de traçage électrique (figure 8) [2].



Figure 8:Schéma de la zone HTF

➤ **Système de stockage :**

La fonction principale de ce système est d'emmagasiner de l'huile thermique pour réaliser des appoints nécessaires dans le circuit HTF. Une autre fonction importante du système est d'introduire et d'extraire l'huile thermique dans le système HTF pour la première fois.

➤ **Système d'expansion :**

La fonction principale du système d'expansion est d'absorber la variation de volume de l'huile thermique due au changement de sa température. Une autre fonction importante de ce système est de maintenir le système sous-pression par l'ajout du nitrogène, minimiser la formation de vapeur de l'huile et compenser les fuites d'huile.

➤ **Système de pompage HTF :**

Le système de pompage se compose de 3 pompes principales et 2 pompes de nuits : Les pompes principales fonctionnent pendant l'exploitation normal du champ solaire pour refouler un débit variable entre 90kg et 400 Kg/s du HTF vers le champ solaire. Par contre les pompes de nuits fonctionnent pendant l'exploitation de nuit, les jours nuageux, ou les jours d'arrêts afin de refouler une quantité

d'huile inférieur à 90Kg/s pour garder le HTF toujours en circulation donc pour maintenir la température du HTF à une température supérieure à 12°C.

➤ **Système de filtration HTF :**

Le filtre à panier double a été conçu pour retenir les particules indésirables du fluide dans chaque tamis sans interrompre le fonctionnement, grâce à un système de double filtre commuté par des vannes papillon à actionnement pneumatique.

➤ **Système GVS :**

Le GVS produit la vapeur grâce à l'huile thermique (HTF) chauffé dans le champ solaire d'une surface de 183200 m², la vapeur provenant du GVS représente approximativement le 5% de la vapeur totale du cycle combiné. La vapeur produite est une vapeur HP (108 bars) est véhiculée vers le ballon de la HRSG pour être surchauffé et renvoyé vers la turbine à vapeur.

➤ **La chaudière HTF (le système anti-congélation) :**

Pendant la nuit ou tout instant où le champ solaire n'est opérationnel, la circulation du fluide sera à travers le champ solaire afin d'éviter sa congélation. Si la température du fluide tombe au-dessous de 90°C, la chaudière HTF fournira l'énergie nécessaire pour réchauffer l'huile thermique.

➤ **Système d'ouillage :**

Le système d'ouillage permet l'évacuation des gaz mélangés avec le HTF provenant de l'expansion vers l'atmosphère. La séparation se fait par la condensation dans un échangeur.

➤ **Système de traçage électrique :**

Le traçage électrique a pour but de garder tous les équipements du circuit HTF à une température supérieure à 30°C afin d'éviter la congélation du HTF.

3. Analyse de la criticité du système solaire

3.1. Analyse de l'historique de défaillances

Cette analyse a été basée sur l'historique de défaillances de la période allant du 08.03.2015 au 19.01.2019 (Voir Annex 1).

3.1.1. Analyse Pareto

A partir de l'historique de défaillances nous avons pu dégager les principaux sous-systèmes défaillants du système solaire, en se basant sur les heures de la maintenance. Le résultat est dans le tableau ci-dessous (tableau 4).

Sous système	Heures de maintenance	Cumule de l'heures de maintenance	Pourcentage cumule (%)
Collecteur cylindro-parabolique	4880	4880	56
Les pompes	2008	6888	79.13
Système anti-congélation	1113	8001	91.92
Traçage électrique	501	8502	97.67
Système de filtration	202	8704	100
Totale	8704		

Tableau 4:Analyse Pareto du système solaire

➤ **Diagramme de Pareto**

Le figure ci-dessous (figure 9) représente le pourcentage des heures de maintenance en fonction des sous-systèmes.

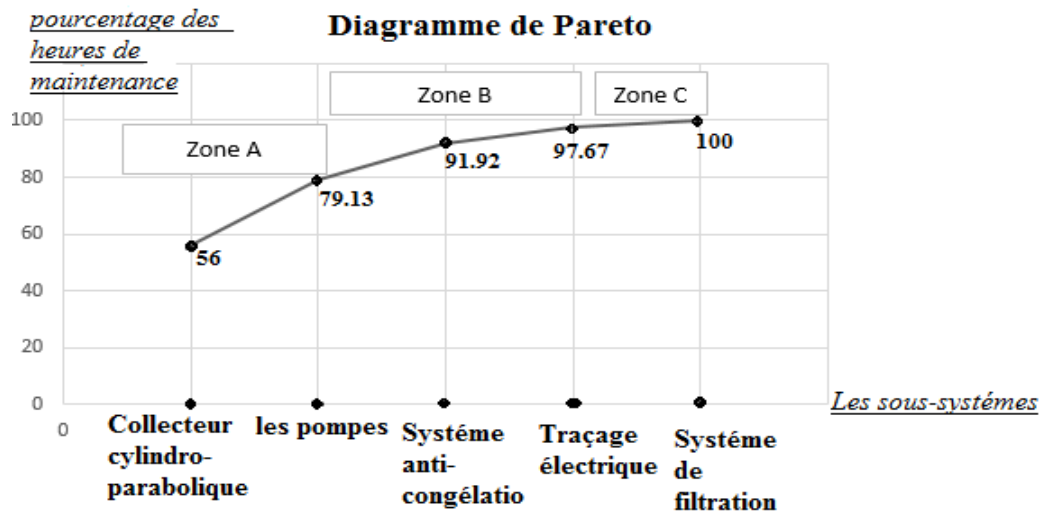


Figure 9:Diagramme Pareto

Analyse de la courbe :

- ❖ Zone A : 40% des sous-systèmes : **collecteur cylindro-parabolique** et les **pompes**, représente 80% de la totalité des réparations du système.

- ❖ Zone B : 40% des sous-systèmes : **anti-congélation** et **le traçage électrique**, représente 15% de la totalité des réparations du système.
- ❖ Zone C : 20% des sous-systèmes : **filtration**, représente 5% de la totalité des réparations du système.

Nous remarquons que les arrêts relatifs aux sous-systèmes : collecteur cylindro-parabolique et les pompes représentent approximativement 80% du total des heures de maintenance.

Donc pour cela nous allons appliquer la méthode **AMDEC** aux deux sous-systèmes :

- **Collecteur cylindro-parabolique**
- **Les pompes**

3.2. Analyse AMDEC :

Dans cette section nous allons faire une analyse AMDEC (voir Annex 2) pour les deux sous-systèmes : le sous-système collecteur cylindro-parabolique et les pompes.

3.2.1. Démarche pratique de la méthode AMDEC :

Cette analyse AMDEC a été effectuée par un groupe de travail comprenant :

- ❖ Un animateur : élève ingénieur stagiaire.
- ❖ Un chef de service : ingénieur chef de service opération.

Quatre réunions de travail ont été nécessaires pour réaliser l'analyse. Ces réunions comprenaient la validation de l'analyse, la détermination des modes et causes des défaillances, leurs effets sur le système ainsi que la mise au point de la Grille de cotation.

3.2.2. Cotation et pondération de la criticité :

La criticité est quantifiée par une note (C) qui est le résultat de la multiplication des valeurs attribuées à la gravité (G), la fréquence (F) et la non-détection (D). Ces valeurs sont attribuées en fonction des tables à trois niveaux préétablis et adaptés au contexte industriel.

$$C=F*G*D$$

3.2.3. Grille de cotation G, F, D

En se basant sur la même grille de cotation, nous allons déterminer la criticité de défaillance associée aux deux sous-systèmes précédents.

3.2.3.1. Grille de cotation (gravité) :

Le tableau ci-dessous (Tableau 5) représente la grille de cotation de la gravité de défaillance.

GRAVITE G	DEFINITION DES NIVEAUX
1	Défaillance mineure : <ul style="list-style-type: none"> • Arrêt de sous-système inférieur à 1 heure. • Aucune dégradation notable du matériel.
2	Défaillance significative : <ul style="list-style-type: none"> • Arrêt de sous-système de 1 à 5 heures, au report possible d'intervention. • Remise en état de courte durée, ou petite réparation sur place nécessaire
3	Défaillance moyenne : <ul style="list-style-type: none"> • Arrêt de sous-système de 5 à 15 heures. • Changement du matériel défectueux nécessaire
4	Défaillance majeure : <ul style="list-style-type: none"> • Arrêt de sous-système de 1 à 2 jours. • Intervention importante sur sous-système
5	Défaillance grave : <ul style="list-style-type: none"> • Arrêt de sous-système supérieur à 2 jours. • Intervention lourde nécessitent des moyens coûteux

Tableau 5: Grille de cotation de gravité

3.2.3.2. Grille de cotation (fréquence) :

Le tableau ci-dessous (Tableau 6) représente la grille de cotation de la fréquence de défaillance.

FREQUENCE (F)	DEFINITION DES NIVEAUX
1	Défaillance rare : Au Moins une défaillance par an ($1 \leq \text{nombre de défaillance} < 4$)
2	Défaillance probable : Au Moins une défaillance par trimestre ($1 \leq \text{nombre de défaillance} < 12$)
3	Défaillance fréquente : Au Moins une défaillance par semaine ($1 \leq \text{nombre de défaillance} < 7$)
4	Défaillance très fréquente : Plusieurs défaillances par jour ($\text{Nombre de défaillance} \geq 7$)

Tableau 6: Grille de cotation de fréquence

3.2.3.3. Grille de cotation (probabilité de non-détection) :

Le tableau ci-dessous (Tableau 7) représente la grille de cotation de la probabilité de non-détection de défaillance.

PROBABILITE DE NON-DETECTION D	DEFINITION DES NIVEAUX
1	Défaillance détectable à 100%
2	Défaillance détectable : Signe avant-coureur de la défaillance facilement décelable mais nécessitant (visite, contrôle visuel, ...)
3	Défaillance difficilement détectable : Signe avant-coureur de la défaillance difficilement décelable, il faut une action comme démontage
4	Défaillance indétectable : Aucun Signe avant-coureur décelable de la défaillance

Tableau 7: Grille de cotation de détection

3.2.4. Elaboration de la fiche AMDEC du système solaire :

Elaboration de la fiche AMDEC pour les deux sous-systèmes précédents, pour déterminer la criticité de chaque défaillance qui apparaît dans les deux sous-systèmes.

3.2.4.1. Fiche AMDEC pour collecteur cylindro-parabolique

Elaboration de la fiche AMDEC pour le sous-système collecteur cylindro-parabolique (tableau 8), pour déterminer la criticité de chaque défaillance de ce sous-système.

AMDEC										Date :10/04/19	
Sous-système	Fonction	Mode de Défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action à Mener	Type de maintenance
						F	G	D	C		
		Fuite pistons du vérin		Entraine rapidement une perte de puissance dans le vérin		4	4	3	48		Maintenance préventive
		Déformation Du support du vérin		Effet sur le déplacement du collecteur		3	3	2	18		Maintenance Corrective
		Blocage de Collecteur		Diminue le rendement du système		3	4	2	24		Maintenance préventive
		Perte de Communication		Collecteur ne pas contrôlé		4		2	24		Maintenance préventive
		Rotule endommagée		Blocage du collecteur		3		3	27		Maintenance préventive
		Miroir cassé		Diminution de réflectivité de module		3	3	2	12		Maintenance Corrective
		Tube cassé		Perte d'énergie thermique d'huile		3	5	1	15		Maintenance Corrective

Tableau 8: Fiche AMDEC du sous-système collecteur cylindro-parabolique

3.2.4.2. Fiche AMDEC pour les pompes

Elaboration de la fiche AMDEC pour les pompes (tableau 9), pour déterminer la criticité de chaque défaillance de ce sous-système.

AMDEC								Date :10.04 .19			
Sous-système	Fonction	Mode de Défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action à Mener	Type de maintenance
						F	G	D	C		
Pompes		Dégradation de garniture mécanique		<ul style="list-style-type: none"> • Perte de fluide • Danger de surchauffe du moteur 		4	4	2	32		Maintenance préventive
		Problème sur le roulement		Vibration de la pompe		2	3	1	6		Maintenance Corrective
		Vibration anormale		Déséquilibre de la pompe		3	4	2	24		Maintenance préventive

Tableau 9: Fiche AMDEC des pompes

3.2.5. Les défaillances les plus critiques

A l'aide de la méthode Pareto nous allons déterminer les défaillances les plus critiques pour les deux sous-systèmes : le collecteur cylindro-parabolique et les pompes.

3.2.5.1. La criticité des défaillances du collecteur cylindro-parabolique

Dans le tableau ci-dessous (tableau 10), les défaillances qui apparaissent dans le collecteur cylindro-parabolique sont rangées dans l'ordre décroissant selon la criticité de chaque défaillance.

Nous allons appliquer la méthode Pareto pour déterminer les défaillances les plus critiques de ce sous-système.

Défaillance	La criticité	Criticité cumul	Le pourcentage cumul (%)
Fuite pistons du vérin	48	48	32
Rotule endommagée	27	75	50
Perte de Communication	24	99	66
Blocage de Collecteur	24	123	82
Tube cassé	15	138	92
Miroir cassé	12	150	100

Tableau 10: Analyse Pareto pour la criticité de défaillance du collecteur

➤ **Diagramme Pareto :**

Nous avons réalisé le diagramme de Pareto (figure 10), pour identifier la zone de chaque défaillance du collecteur cylindro-parabolique.

Le diagramme représente le pourcentage de la criticité de défaillance en fonction des défaillances.

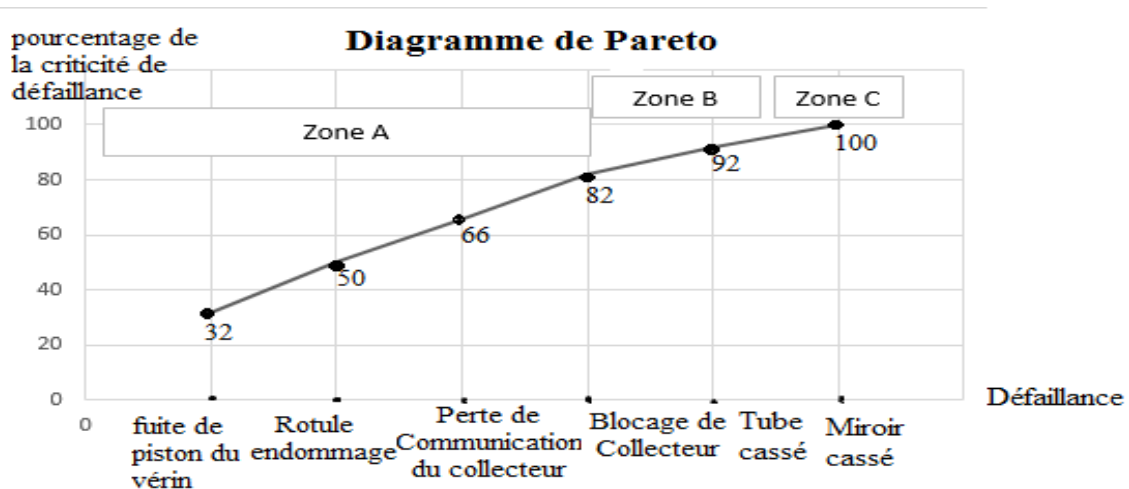


Figure 10: Diagramme de Pareto pour les défaillances du collecteur

D'après le diagramme Pareto (figure 9) nous constatons que 80% des pannes de sous-système collecteur cylindro-parabolique les plus critiques sont :

- Fuite piston du vérin
- Rotule endommagée
- Perte de communication
- Blocage de collecteur.

3.2.5.2. La criticité de défaillance des pompes

Dans le tableau ci-dessous (tableau 11), nous avons organisé les défaillances qui apparaissent dans les pompes dans l'ordre décroissant selon la criticité de chaque défaillance.

Nous allons appliquer la méthode Pareto pour déterminer les défaillances les plus critiques de ce sous-système.

Défaillance	La criticité	Criticité cumul	Le pourcentage cumul (%)
Dégradation de garniture mécanique	32	32	51.16
Vibration anormale	24	56	90
Problème sur le roulement	6	62	100

Tableau 11: Analyse Pareto pour la criticité de défaillance des pompes

➤ Diagramme Pareto :

Nous avons réalisé le diagramme de Pareto (figure 11), pour identifier la zone de chaque défaillance des pompes.

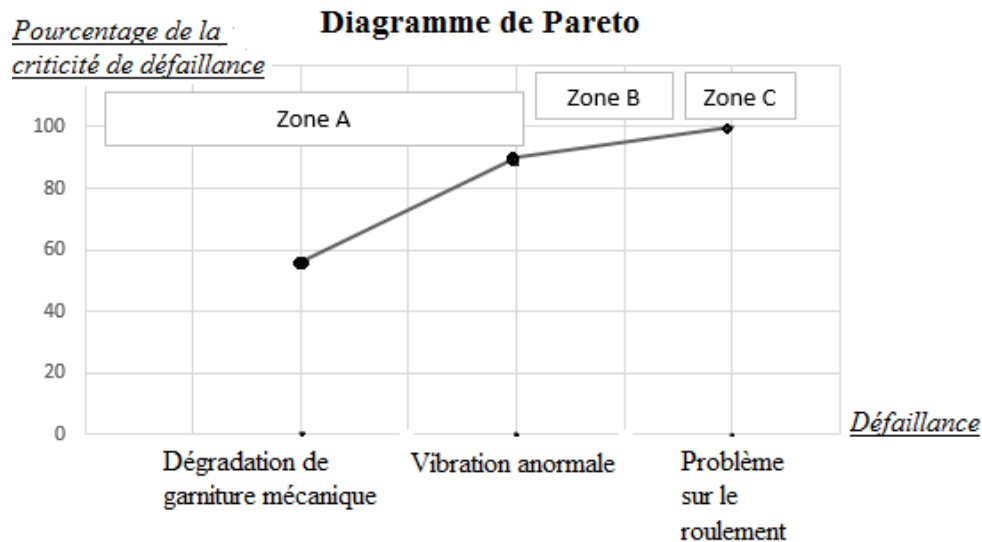


Figure 11:Diagramme de Pareto pour les défaillances des pompes

D'après le diagramme de Pareto (figure 11), nous constatons que les défaillances apparues dans la zone A :

- **Dégradation de garniture mécanique**
- **Vibration anormale**

Conclusion :

Après l'analyse de l'historique des défaillances, nous avons pu déterminer les sous-systèmes les plus critiques du système solaire qui sont : les collecteurs cylindro-paraboliques et les pompes.

Ainsi que la détermination de la criticité de toutes les défaillances qui apparaissent dans les deux sous-systèmes critiques. À l'aide de la méthode Pareto nous avons sélectionné les défaillances les plus critiques.

En se basant sur ces résultats, une analyse de toutes les défaillances critiques des deux sous-systèmes critiques, s'effectuera grâce au diagramme cause-effet (Ichikawa).

Chapitre III : Analyse des défaillances et propositions d'amélioration

Dans ce chapitre nous allons faire un rappel du programme de la maintenance préventive actuelle de l'entreprise, puis nous allons analyser chaque défaillance à part, pour parvenir à déterminer leurs causes principales.

Enfin nous allons proposer des améliorations, pour éliminer la défaillance.

1. Introduction :

Dans ce chapitre chaque panne sera traitée à part. Pour cela, nous allons utiliser le diagramme **cause-effet**, La **méthode des 5M** est un moyen mnémotechnique pour se souvenir des grandes catégories des causes d'un problème.

Il s'agit de rechercher les causes dans les 5 domaines suivants :

- **Main d'œuvre (personnel)** : aptitude, formation, motivation, comportements individuels ou collectifs...
- **Matériel** : L'équipement, les machines, locaux, l'entretien, le dépannage.
- **Méthode** : procédures, consignes, circuit, exigences, normes, directives, plannings
- **Matière** : les consommables, l'approvisionnement, les supports, les documents...
- **Milieu** : environnement physique et humain, partenaires extérieurs, loi, contexte

Mais avant de commencer par l'analyse, nous allons rappeler la politique de maintenance préventive de l'entreprise :

2. Maintenance préventive de l'entreprise

Afin d'éviter toutes défaillances pouvant se produire dans les deux sous-systèmes définis précédemment, l'entreprise actuellement se base sur un programme de maintenance préventive défini ci-dessous :

➤ **Pour les collecteurs cylindro-paraboliques**

La fréquence de maintenance est de **10 collecteurs par mois**, sachant que l'installation est équipée de 224 collecteurs, la durée nécessaire pour effectuer la maintenance globale est estimée à deux ans.

Les tâches effectuées dans cette visite sont :

- Contrôle de fuite du piston du vérin.
- Vérification de l'état du filtre de la pompe hydraulique.
- Lubrification des rotules.
- Vérification de l'isolation thermique du Ball joints.

➤ Pour les pompes

Les tâches effectuées dans cette visite sont :

- Contrôle de l'alignement de la pompe **chaque 4 mois**.
- Changement d'huile de lubrification **chaque 4 mois**.
- Contrôle du filtre **chaque 4 mois**.
- Graissage du moteur de la pompes **chaque 2 mois**.
- Mesure de la vibration de la motopompe **chaque mois**.

3 Analyse des pannes

Dans cette section, l'analyse des pannes sera effectuée selon l'ordre de grandeur de la criticité de celles-ci.

3.1 Panne fuite piston du vérin

3.1.1 Analyse

En se basant sur le diagramme cause-effet (Ichikawa), une analyse est effectuée pour déterminer les causes principales de cette panne (figure 12) [3].

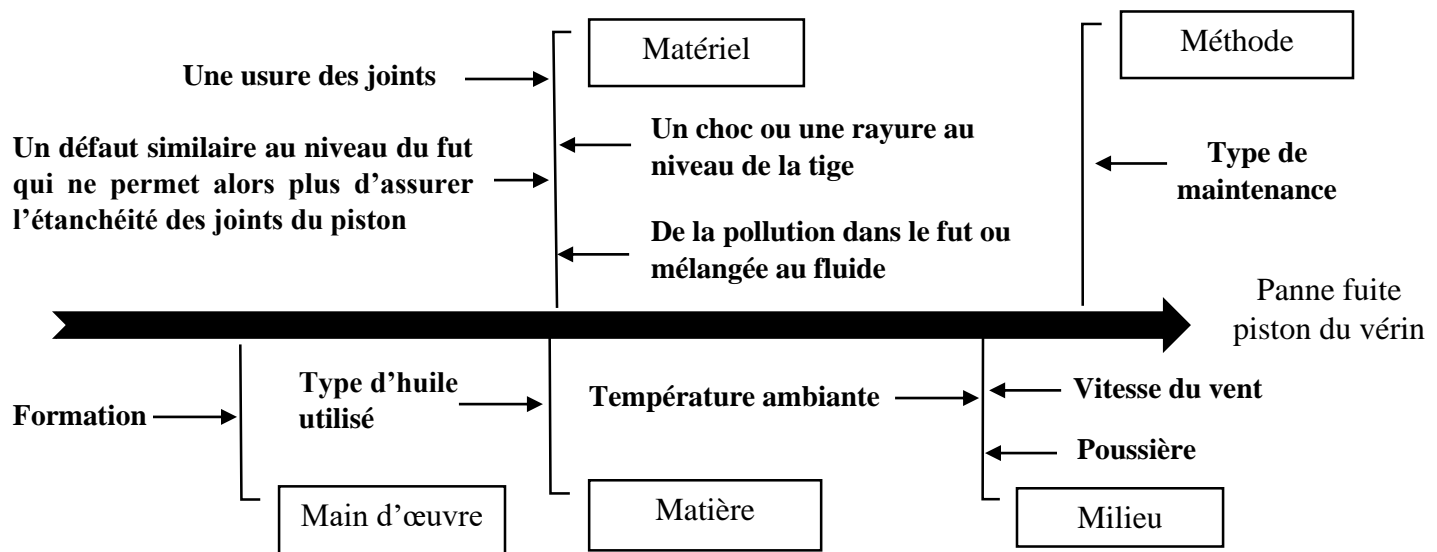


Figure 12: Diagramme cause-effet pour la panne fuite piston du vérin

- Lorsque la température ambiante est élevée, la température à l'intérieur du vérin augmente et avec le frottement entre les composants du vérin, le joint d'étanchéité devient gravement influencé.
- L'absence de la maintenance préventive par un entretien du vérin pour éviter la pollution du vérin.
- La vitesse du vent souvent élevée, applique une force de frottement contre le sens du déplacement du vérin, pouvant déformer la tige du vérin.
- Les formations des opérateurs de maintenance les permettent de faire le choix du type de maintenance adaptée.

3.1.2 Les propositions d'amélioration :

Pendant la visite programmée de la maintenance préventive de chaque collecteur il faut ajouter aux tâches précédentes les tâches suivantes :

- ❖ Entretien pour éviter la pollution du fut du vérin.
- ❖ Contrôle de l'état de la tige du vérin.
- ❖ Lubrification du vérin.

Et aussi ajouter un système pour protéger le vérin contre les poussières (soufflet de protection).

➤ Soufflet de protection

Le soufflet de protection (figure 13) pour vérin hydraulique protège la tige des projections, agressions de tout genre et ainsi augmente sa durée de vie.

On a plusieurs types :

- PVC (projections de poussières, eau, acide)
- Silicone sur trame kevlar noir (hydrocarbures, agents chimiques)
- Silicone sur trame kevlar blanc alimentaire (idéale pour en milieu agroalimentaire ou pharmaceutique)
- Kevlar aluminisé (hautes températures, projections de copeaux chaud)

Donc concernant notre cas nous allons choisir le premier soufflet PVC (projections de poussières, eau, acide). Ce choix est adapté aux conditions climatiques de la région.

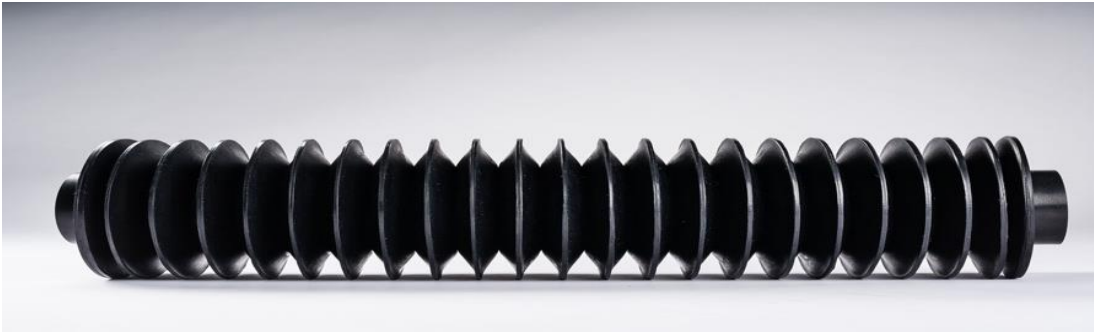


Figure 13: Schéma du soufflet de protection du vérin

Le prix du soufflet est de **31.69€** [4], il existe deux vérins par collecteur et 224 collecteurs en total, donc le prix total des soufflets est : **14198€**.

3.2 Panne dégradation de garniture mécanique

3.2.1 Analyse

Le diagramme cause-effet (Ichikawa) permet de faire une analyse pour déterminer les causes principales de cette panne (figure 14) [5].

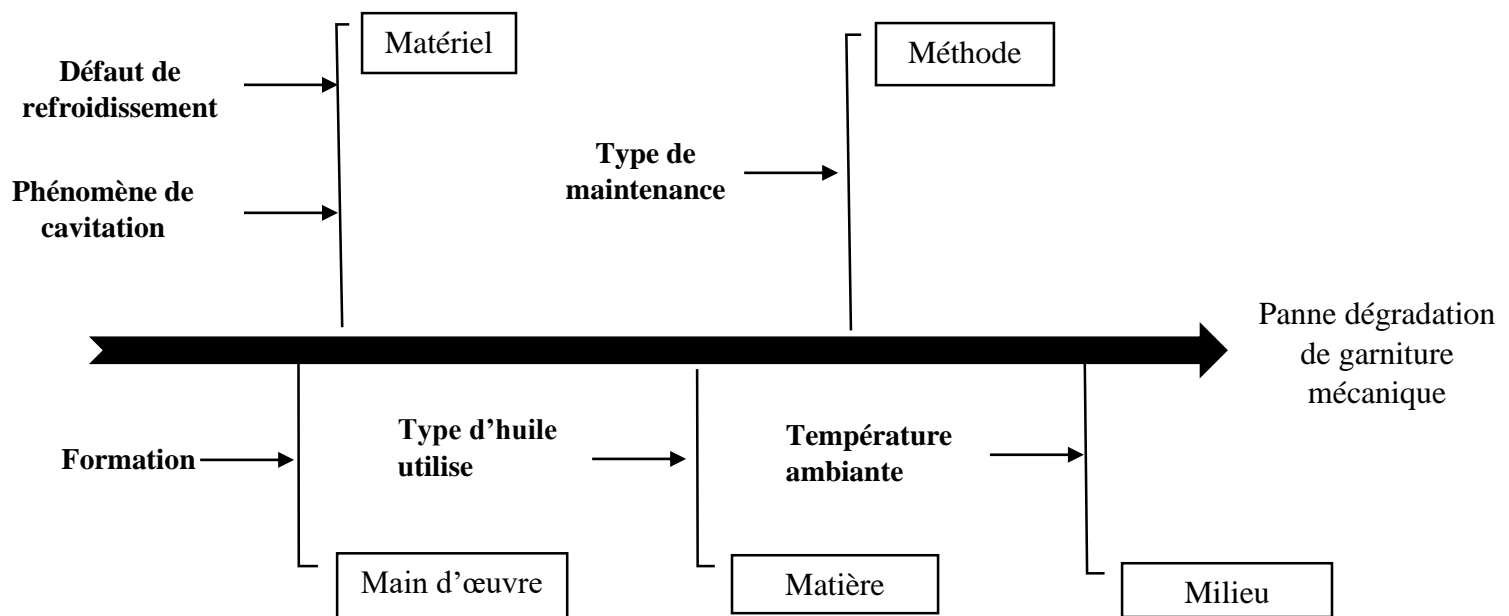


Figure 14: Diagramme cause-effet pour la panne dégradation de garniture de la pompe

- La cavitation (voir Annex 3), est la vaporisation du liquide contenu dans la pompe quand il est soumis à une pression inférieure à la tension de vapeur correspondante à sa température, c'est une cause principale de la dégradation de la garniture.

3.2.1 Les propositions d'amélioration :

Donc nous pouvons dresser une liste de conseils à respecter, pour éviter la cavitation :

- ❖ Éviter le transport des liquides à des températures trop élevées.
- ❖ Éviter une alimentation à partir d'un réservoir sous pression réduite.
- ❖ Diminuer les pertes de charge du circuit d'aspiration.

Concernant les tâches proposées à ajouter aux tâches précédentes de la maintenance préventive de la pompe :

- ❖ Vérification des fuites aux joints chaque jour.
- ❖ Vérification de l'absence de cavitation toutes les 4 heures.

3.3 Panne rotule endommagée

3.3.1 Analyse

En se basant sur le diagramme cause-effet (Ichikawa), une analyse est effectuée pour déterminer les causes principales de cette panne (figure 15).

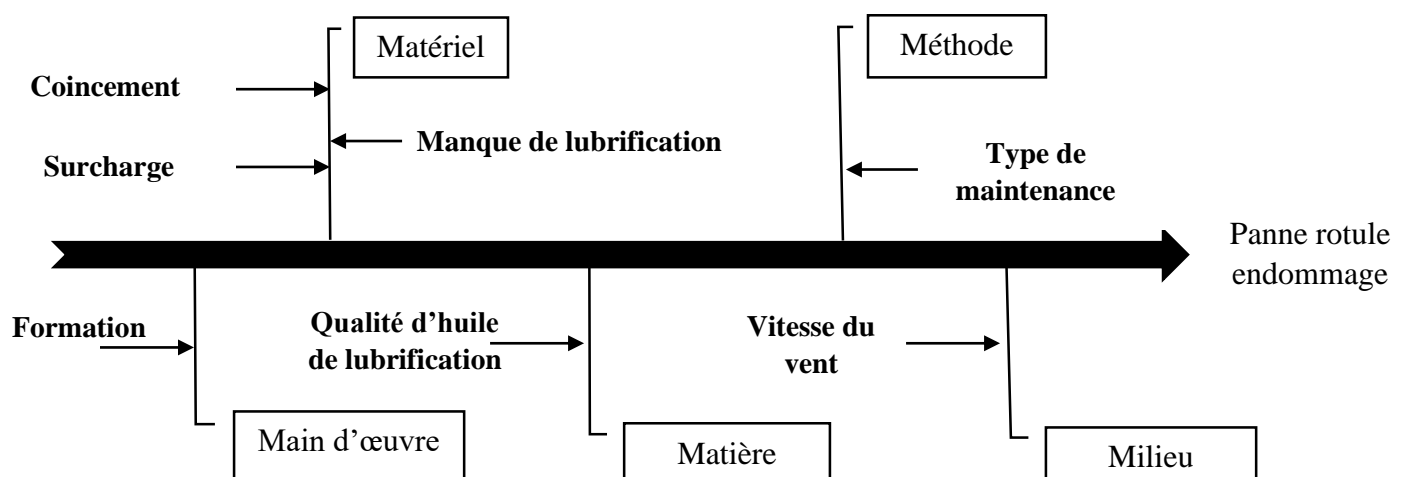


Figure 15: Diagramme cause-effet pour la panne de la rotule

- La cause de coincement est le manque de lubrification.

- L'abatage rapide (si la vitesse du vent est supérieure à 11 m/s) conduit à une rotation rapide du collecteur ce qui cause une surcharge sur la rotule.

3.3.2 Les propositions d'amélioration :

- ❖ Dans le programme de la maintenance préventive de l'entreprise qu'est déjà mentionnée, nous constatons que la lubrification est faite une fois sur deux ans. Pour cela nous proposons une augmentation du nombre de lubrification de la rotule sur l'année, qui doit se baser sur le calcul de la période optimale de la lubrification de la rotule, mais à cause du manque des informations nous n'avons pas pu faire ce calcul.

3.4 Panne perte de communication du collecteur

3.4.1 Analyse

S'il y a perte de communication du collecteur, la salle de contrôle ne peut plus contrôler celui-ci.

En se basant sur le diagramme cause-effet (Ichikawa), une analyse est effectuée pour déterminer les causes principales de cette panne (figure 16).

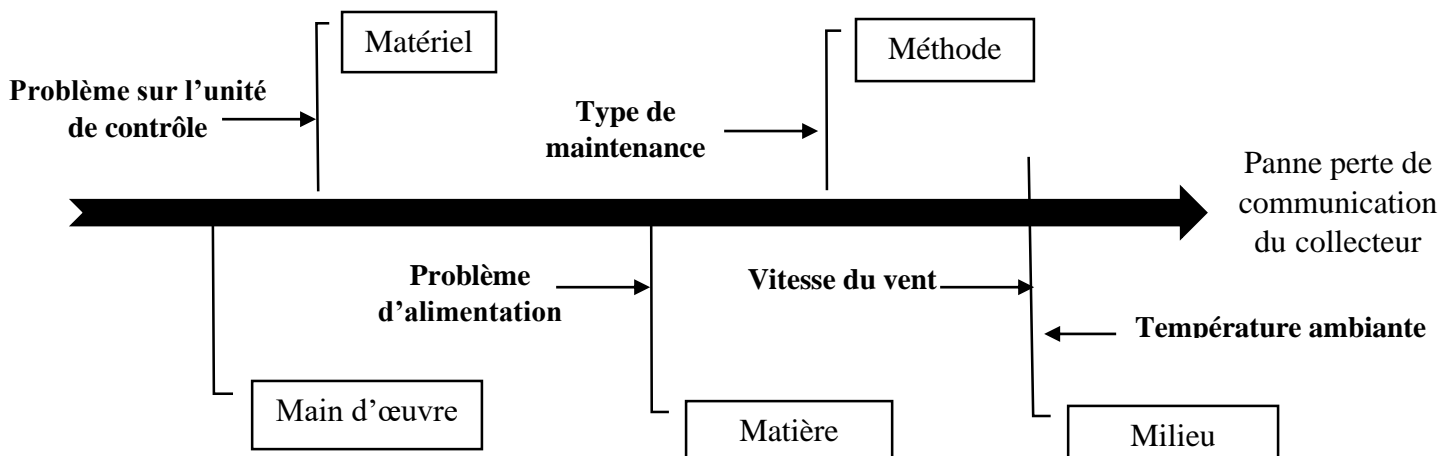


Figure 16: Diagramme cause-effet pour la panne de perte de communication avec le collecteur

- D'après l'historique des défaillances, nous constatons que cette panne est apparue toujours entre **les mois 5 et 7**, c'est la période d'été, et comme dans cette région nous trouvons le degré de la température très élevé dans cette période, aussi l'armoire qui contient la carte électronique du contrôleur est placée à côté du vérin à l'extérieur, donc les composants électroniques vont être influencés par la température ambiante pendant l'été.

3.4.2 Les propositions d'amélioration :

- ❖ Ajouter aux armoires qui contiennent les cartes électroniques un système de refroidissement pour conserver une température convenable (35°C) pour les composants électroniques.

3.4.2.1 Etude du système de refroidissement

L'armoire électrique équipé d'un ventilateur à filtre est une solution économique à condition que la température ambiante est toujours inférieure à la température requise dans l'armoire électrique, mais si la température convenable pour les composants électroniques dans l'armoire électrique devrait être égale ou inférieure à la température ambiante il faut utiliser un climatiseur [6].

3.4.2.1.1 Calcul de l'énergie thermique du climatiseur

Afin de calculer l'énergie thermique du climatiseur, 4 facteurs doivent être tenus en compte :

- Puissance dissipée par les appareils à l'intérieur (notre cas nous avons seulement une carte de contrôle est l'approximation de la puissance dissipée de cette carte est $PV=200$ W d'après la norme CEI 17/43) [6].
- Température ambiante (pendant l'été la température moyenne est 44°C).
- Température désirée à l'intérieur de l'armoire électrique ($T=35$ °c la température maximum à ne pas dépasser pour le bon fonctionnement des composants électroniques, nous avons trouvé cette information sur le site du fournisseur [PFANNENBERG France](#) spécialisé en climatisation des armoires électriques).
- Les dimensionnements de l'armoire électrique (longueur $L=700$ mm, largeur $l=220$ mm).

Donc la puissance de refroidissement est :

$$P = PV - K \times A \times \Delta T$$

ΔT : la valeur algébrique de la différence entre la température interne requise et la température à l'extérieur de l'armoire.

K : le coefficient de transmission de la chaleur (environ 5.5 W/K m²).

A : la surface effective de l'armoire.

Alors :
$$P = 200 - 5.5 \times 0.7 \times 0.22 \times (-9) = 207.62 \text{ W}$$

$$P = 207.62 \text{ W}$$

3.4.2.1.2 Calcul de l'investissement de cette proposition

Après la comparaison entre plusieurs fournisseurs nous avons trouvé que le meilleur prix est celui de fournisseur **PFANNENBERG France**

❖ Fabricant **PFANNENBERG France**

Le tableau suivant (tableau 12) représente La fiche technique du Climatiseur **DTS 3031 SS 230V INOX NEMA 4/4X** de 320 W.

Données	DST3031 (NEMA 4/4X)		Unité
	CA 50/60	CA 60	
Tension nominale	230	115	V
			Hz
Puissance frigorifique selon EN 14511	322		W
Puissance absorbée	253	243	W
Consommation de courant	1.2	3	A
Courant de démarrage	3.5	5	A
Niveau de bruit selon EN ISO 3741	≤64		dB(A)
Poids	13 .6		Kg
Températures ambiantes	+8.....+45/+46.....+114		°C
Facteur de marche	100		%

Tableau 12: Fiche technique du climatiseur

Le prix unitaire pour une commande de 224 unités est : **1071 €**.

Donc pour 224 collecteurs, nous avons besoin de 224 climatiseurs, alors le prix total sera : **239904 €**.

3.4.3 Calcul des pertes financières liées à la perte de communication :

D'après l'historique des défaillances nous avons pu recenser 1034 heures de dysfonctionnement du collecteur à cause des pertes de communication, la capacité de production du système solaire est

20MW/h, donc chaque collecteur à une capacité de **89.28 KW/h**, et l'approximation du prix de 1KW/h est **0.15€**, alors la perte est :

$$1034 \times 0.15 \times 89.2857 = 13848.21€$$

La période de l'historique des défaillances est 3 ans, donc la perte est **4616 €** par an cette perte est seulement à cause du problème sur la carte électronique, sachant que le prix de la carte électronique du contrôleur est de **1700€**, et que 224 cartes électroniques sont utilisées dans le système. La protection de ces cartes est un gain pour l'entreprise.

3.5 Panne vibration anormale de la pompe

3.5.1 Analyse

En se basant sur le diagramme cause-effet (Ichikawa), une analyse est effectuée pour déterminer les causes principales de cette panne (figure 17).

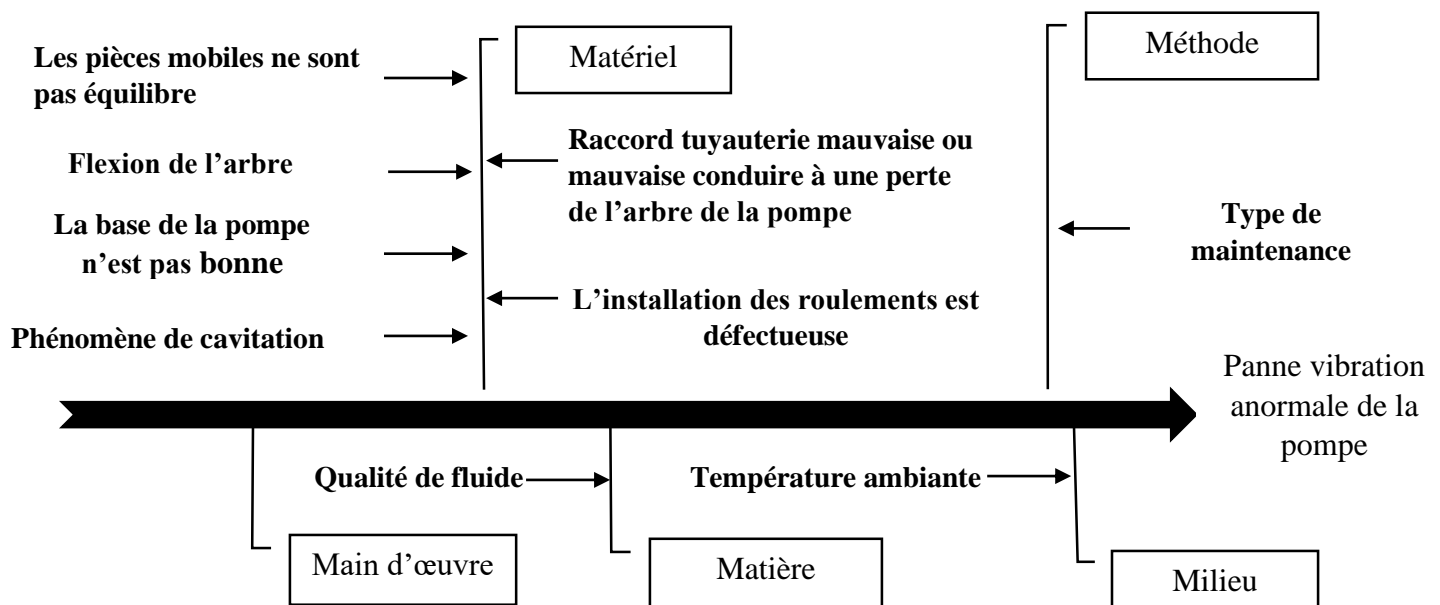


Figure 17: Diagramme cause-effet pour la panne vibration anormale de la pompe

- Nous constatons qu'il y a plusieurs causes de cette panne, comme l'équilibre de pièces mobiles de la pompe, la base de la pompe n'est pas bonne, raccord tuyauterie mauvaise, problème sur les roulements

3.5.2 Les propositions d'amélioration :

Pour éviter ces causes il faut se focaliser sur la maintenance préventive, et ajouter des tâches avec les tâches existantes, alors je propose les tâches suivantes :

- Vérification du raccord tuyauterie.
- Voir l'état du roulement.
- Voir la période de Contrôle de l'alignement de la pompe

Après avoir effectué un état de lieu, une action corrective doit être prise visant à fixer les supports des pompes qui sont à l'heure actuelle mal fixés.

Conclusion :

À l'aide du diagramme Ichikawa nous avons pu déterminer les causes principales pour toutes les défaillances critiques. Pour éliminer ces causes nous avons proposé des tâches pour la maintenance préventive du système, des soufflets de protection du vérin et des climatiseurs pour les armoires électriques.

Pour un bon fonctionnement du système solaire basée sur cette analyse, il faudra prendre les propositions en considération pour éliminer les heures de maintenance corrective menant à des pertes d'argent. En effet si on élimine les 4000 heures de dysfonctionnement des collecteurs, en négligeant la fuite simple du vérin, et le changement des miroirs du collecteur, nous constatons que les gains s'élèveront à :

$$4000 \times 89.28 \times 0.15 = 53571\text{€}$$

53571€ Sur 3 ans, donc **17857€** par an.

Conclusion :

Dans ce travail, nous visons à déterminer les sous-systèmes critiques du système solaire dans la centrale thermo_solaire ABM, et amélioration de la performance de ce système.

Pour atteindre nos objectifs nous avons fait une analyse de l'historique des défaillances à l'aide de la méthode Pareto. À partir de cette analyse nous avons pu déterminer les sous-systèmes les plus critiques du système solaire qui sont : les collecteurs cylindro-paraboliques et les pompes.

Après cette analyse nous avons appliqué la méthode AMDEC sur les sous-systèmes critiques pour déterminer la criticité de toutes les défaillances.

À l'aide de la méthode Pareto, nous avons sélectionné les défaillances les plus critiques qui apparaissaient dans les deux sous-systèmes critiques.

Ainsi qu'à partir du diagramme Ichikawa, nous avons pu déterminer les causes principales pour toutes les défaillances critiques. Pour éliminer ces causes nous avons proposé des tâches pour la maintenance préventive du système, des soufflets de protection du vérin et des climatiseurs pour les armoires électriques.

D'après l'étude technico économique établie pour les propositions ayant besoin d'investissements, les améliorations vont apporter un gain pour l'entreprise, avec un retour sur investissement estimé à 14 ans, le gain global est de **17858€** par an.

Bibliographie

- [1] : Rapport de stage fin d'étude, amélioration de la disponibilité d'alimentation électrique des motopompes de soulèvement de la turbine à vapeur, Mohammed-Amine MOSSADAK, 2018, centrale thermo_solaire ABM.
- [2] : Santiago garcia garrido, cours generale centrales thermoélectrique ISCC, 2010.
- [3] : Service de réparation de SAH Leduc, spécialiste du vérin hydraulique
- [4] :
https://fr.aliexpress.com/item/32464126487.html?spm=a2g0w.search0302.3.213.1fed177a4RRWoh&ws_ab_test=searchweb0_0%2Csearchweb201602_0_10084_10083_10821_10887_10307_321_453_322_454_10618_536_10065_317_537_10068_10892_319_10059_10103_10884_10696_10302%2Csearchweb201603_0%2CpccSwitch_0&algo_pvid=9213ac99-e9dc-4f9f-8cdb-cbd1fc7567d2&algo_expid=9213ac99-e9dc-4f9f-8cdb-cbd1fc7567d2-27
- [5] : https://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_centrifuge_etancheite.html
- [6] : <http://www.ilinox.it/fr/produits/climatisation/choix-du-systeme-de-refroidissement/>
- [7] : <https://amdec2qrqc.wordpress.com/2012/07/25/amdec/>
- [8] : <http://www.innovation.public.lu/fr/innover/gestion-innovation/resolution-probleme/amdec-fr.pdf>
- [9] : <http://neumann.hec.ca/sites/cours/6-510-96/AMDEC.pdf>
- [11] : Thèse doctorant, développement d'un modèle de cavitation a poche sur hydrofoils et hélice en régime transitoires. Implémentation sur codes potentiels et validation expérimentale, Surasak PHOEMSAPTHAWEE,2009, Université de Bretagne Occidentale
- [10] : Mémoire d'Etude de la cavitation dans les pompes centrifuges, Fantazi Bahi Eddine,2016, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [12] : Cours pompes centrifuge, hélico-centrifuges et axiales : cavitation présentée par Jean François Lapray ingénieur de l'école supérieure d'hydraulique université de Grenoble.

Annexes

- ❖ Annexe 1 : historique des défaillances
- ❖ Annexe 2 : la méthode AMDEC
- ❖ Annexe 3 : le problème de cavitation

Annexe 1

A	B	C	D	E	F	G	H
Work Order	Description	Location	Spécialité	Priority	Work Type	Scheduled Start	Scheduled Finish
WO17-1880	Rotule endommagé	14ZBA16RA002	MECHANICAL	2	CM	09/01/2017 5:00 PM	09/01/2017 8:00 PM
WO17-1881	Fuit d'huile au niveau de la partie drainage d'huile de lubrification	14JD20AP001	MECHANICAL	2	CM	13/01/2017 1:00 PM	13/01/2017 2:30 PM
WO17-1915	manque isolation thermique pour Ball Joint (Multi Assets)	14JB	MECHANICAL	2	CM	24/01/2017 5:00 PM	09/03/2017 5:00 AM
WO17-2169	reglage de fin de course.	14JB50AA152	I&C	2	CM	24/03/2017 9:00 AM	24/03/2017 12:07 PM
WO17-2653	Endommagement de calorifuge de la conduite reliant les deux collecteur de la boucle (Multi Assets)	14ZB	MECHANICAL	2	CM	26/01/2017 2:00 PM	15/06/2017 10:00 AM
WO17-2654	Multi Asset: Manque isolation thermique des ball joint .	14JB	MECHANICAL	2	CM	06/02/2017 2:00 PM	10/02/2017 8:00 PM
WO17-2656	Déformation du support vérin (Multi Asset)	14ZB	MECHANICAL	2	CM	09/02/2017 2:05 AM	19/02/2017 8:05 AM
WO17-1916	fluctuation des T°	14ZB	I&C	2	CM	18/01/2017 5:11 PM	18/01/2017 8:11 PM
WO17-2298	Fuit d'eau au niveau de la douchette près de la zone HTF.	14	MECHANICAL	2	CM	24/01/2017 11:00 AM	24/01/2017 6:00 PM
WO17-2299	Fuit d'huile au niveau du picage transmetteur du pression 14JD10CP001	14JD10CP001	MECHANICAL	2	CM	23/01/2017 1:00 PM	23/01/2017 6:00 PM
WO17-2499	Calorifuge des Sondes de température endommagés. Multi Asset:	14ZB	MECHANICAL	2	CM	03/02/2017 7:00 PM	03/02/2017 8:30 PM
WO17-2500	Bruit anormal (Multi Assets).	14ZB	MECHANICAL	2	CM	02/02/2017 11:00 AM	08/02/2017 5:00 PM
WO17-3708	Fuite importante sous forme vapeur au niveau du ball joint N°6	14JBAB373830BZ003	MECHANICAL	1	CM	20/02/2017 2:31 PM	20/02/2017 6:31 PM
WO17-2657	Blocage de collecteur au position de 85 par alarme "ne se deplace pas"	14ZBC06	I&C	1	CM	27/01/2017 2:12 PM	30/01/2017 2:12 PM
WO17-2658	Blocage par l'alarme "KIC ou KDGM"	14ZBC41	I&C	2	CM	01/02/2017 9:00 AM	01/02/2017 12:00 PM

Figure 18:historique des défaillances

Annexe 2

AMDEC, qu'est-ce que c'est ?

L'AMDEC (ou FMEA: Failure Mode and Effects Analysis) est une méthode rigoureuse et préventive visant à recenser les défaillances potentielles d'un système et/ou d'un élément. Il faut définir des actions pour éliminer ces défaillances, réduire leurs effets et détecter et empêcher les causes. Cette méthode permet de structurer le processus du développement. L'AMDEC est un outil qui consiste à prévoir pour ne pas être obligé de revoir. Il existe plusieurs sortes d'AMDEC : l'AMDEC du concept, produit, procédé, moyen, de la machine, ... Toutes ont la même structure et suivent les mêmes étapes. C'est un outil indispensable pour la maîtrise de la qualité et de la sécurité. La méthode est très utilisée dans le secteur de l'automobile, de l'aéronautique et du ferroviaire. Une méthode dérivée de l'AMDEC est utilisée dans l'agroalimentaire, la chimie et le secteur pharmaceutique : le HACCP [7].

Les règles d'or

- **Préliminaire** : Avant de commencer, il faut connaître le système et son environnement. Ces informations résultent souvent de l'analyse fonctionnelle, de l'analyse des risques ou d'un retour d'expériences.
- **Indice de Priorité au Risque (IPR)** : Il est possible de se fixer un seuil pour cet indice au-dessus duquel toute criticité doit être réduite. Le but est de hiérarchiser les actions d'amélioration à conduire en procédant par ordre de criticité décroissante.
- **But** : Il faut déterminer à quel fin l'AMDEC sera utilisée et déterminer par la suite les moyens et les responsabilités associées.

Déroulement de l'AMDEC [8]

Étape 1: Initialiser

- Constituer un groupe de travail de personnes de domaines divers pour avoir plusieurs visions.
- Formaliser le sujet, les objectifs et les limites.

Étape 2: Analyser

- Consiste à étudier de façon réaliste les points à risques imaginables et connus par expérience et leurs conséquences pour le client (cause, mode, effet, détection).
- Analyse fonctionnelle du besoin (=gravité), analyse fonctionnelle technique (= mode).

Étape 3: Évaluer

- Évaluer et hiérarchiser les défaillances potentielles à partir de barèmes préétablis
 - ✓ Indice de fréquence: F (apparition du problème)
 - ✓ Indice de gravité: G (la non qualité ressentie)

- ✓ Indice de non-détection: D (probabilité qu'une cause ou un mode atteigne le client)
- Calcul de l'Indice de Priorité de Risque: $IPR = G \times F \times D$
- Décider de faire des plans d'action pour les IPR supérieurs aux seuils.

Étape 4: Recherche de solutions

- Trouver des solutions à mettre en place pour résoudre les défaillances rencontrées (souvent lors de séances de brainstorming).

Étape 5: Suivre

- Analyser les solutions correctives proposées jusqu'à ce que les IPR soient inférieurs aux seuils.

Étape 6: Appliquer

- Les solutions correctives, validées lors du suivi, sont appliquées
- Étape très importante car on corrige effectivement les défaillances potentielles.

Étape 7: Vérifier

- Vérifier l'efficacité des mesures prises sur le terrain
- Capitaliser l'expérience en archivant l'étude dans une base de données.

Types de l'AMDEC

Il existe plusieurs types de la méthode d'analyse :

➤ L'AMDEC organisation

L'AMDEC s'applique aux différents niveaux du processus d'affaires, du premier niveau qui englobe le système de gestion, le système d'information, le système production, le système personnel, le système marketing et le système finance, jusqu'au dernier niveau comme l'organisation d'une tâche de travail [9].

➤ L'AMDEC-Produit

Elle est utilisée pour l'aide à la validation des études de définition d'un nouveau produit fabriqué par l'entreprise. Elle est mise en œuvre pour évaluer les défauts potentiels du nouveau produit et leurs causes. Cette évaluation de tous les défauts possibles permettra d'y remédier, après hiérarchisation, par la mise en place d'actions correctives sur la conception et préventives sur l'industrialisation [9].

➤ L'AMDEC-Processus

Elle est utilisée pour étudier les défauts potentiels d'un produit nouveau ou non, engendrés par le processus de fabrication. S'il s'agit d'un nouveau procédé, l'AMDEC-Processus en permettra

l'optimisation, en visant la suppression des causes de défaut pouvant agir négativement sur le produit. S'il s'agit d'un procédé existant, elle permettra l'amélioration [9].

➤ L'AMDEC moyen

Permet d'anticiper les risques liés au non-fonctionnement ou fonctionnement anormal d'un équipement, d'une machine [9].

➤ L'AMDEC service

S'applique pour vérifier que la valeur ajoutée réalisée dans le service correspond aux attentes des clients et que le processus de réalisation de service n'engendre pas de défaillance [9].

➤ L'AMDEC sécurité

S'applique pour assurer la sécurité des opérateurs dans les procédés où il existe des risques pour ceux-ci [9].

Annexe 3

Définition de la cavitation :

On appelle cavitation le phénomène d'apparition, dans un liquide, de poches remplies de vapeur et de gaz provoquée par l'abaissement de la pression sans apport de chaleur. L'apparition de la cavitation dans un liquide est un problème complexe qui fait intervenir l'aspect de la germination. On appelle germes la micro bulle remplies de gaz dissous et de vapeur aussi bien que les impuretés qu'on peut rencontrer dans les fluides industriels. Ces germes, dont la taille est de quelque micron, fragilisent considérablement la cohésion du fluide et favorisent sa vaporisation. Ils constituent les maillons faibles de la chaîne. Ainsi, l'apparition de la cavitation dans un liquide dépend étroitement de sa teneur en germe. Une eau pure (dépourvu de germe) peut résister à une tension de plusieurs centaines de bar sans qu'il y ait vaporisation [10].

On admet dans le cas de l'eau industriel, que la cavitation apparait lorsque la pression atteint la pression de vapeur saturante P_v . Cette dernière est une fonction de la température. On peut ainsi exprimer la condition d'apparition de la cavitation, en un point M du fluide [10] :

$$P(M) < P_v$$

Dans le cas d'un écoulement autour d'un profil porteur, la condition d'apparition de la cavitation peut être exprimée de manier adimensionnelle en introduisant les coefficients de pression et de cavitation [10].

$$C_p(M) = (P(M) - P_{ref}) / 0.5 \rho C_{ref}^2$$

C_{ref} et P_{ref} Représentent respectivement la vitesse et la pression de référence.

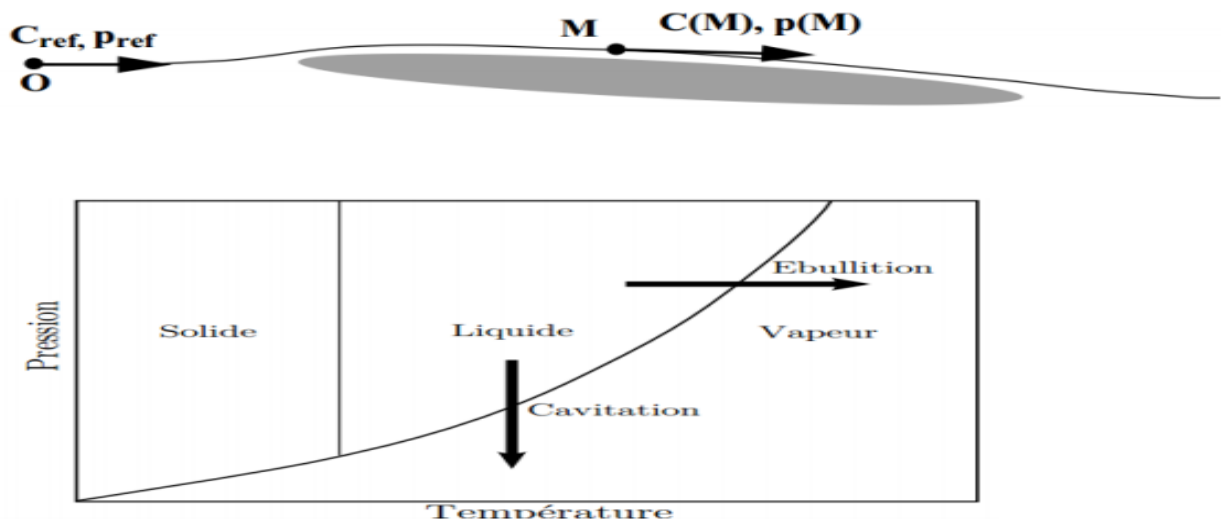


Figure 19: écoulement autour d'un profil porteur et diagramme de changement de phase

La pression de vapeur saturante n'est pas une constante universelle, elle varie notamment avec la température. L'eau à 15°C une pression de vapeur saturante de 1700 Pa, à 20°C elle est de 2500 Pa et à 100°C de 10300 Pa ce qui correspond à la pression atmosphérique.

Le phénomène d'ébullition est donc le même phénomène que la cavitation. Qu'il s'agisse d'ébullition dans une casserole, de bulles de cavitation, de cavitation à poche, de nuage de cavitation ou encore de cavitation de tourbillon, la phase gazeuse est constituée de vapeur d'eau. On différencie l'ébullition de la cavitation en fonction du moteur de déclenchement du changement de phase. Pour l'ébullition il s'agit de faire varier la pression à température constante, voir le diagramme (Figure 19). L'eau est à température suffisamment froide et homogène pour ignorer le couplage des deux effets et l'apparition de cavitation se limite à un effet de variation de pression. Le déclenchement de ce changement de phase de l'eau se situe bien sûr au niveau moléculaire ce qui rend le phénomène difficile à cerner et impossible à modéliser de façon exacte. Cependant les nombreuses études de la cavitation dans le domaine de l'hydrodynamique ont permis d'en cerner les principaux paramètres et conséquences [11].

Causes de cavitation

Les principales causes à l'origine de l'apparition de la cavitation sont :

- La dépression due à une sur vitesse locale de l'écoulement provoquée par exemple par des réductions géométriques.
- Les fluctuations turbulentes de la pression, le cisaillement élevé et les vortex provoquées par des instabilités de l'écoulement.
- La rugosité de paroi et la présence de germes de cavitation [10].

Classification de la cavitation

On peut différencier plusieurs types de régimes de cavitation. Elle prend diverses formes, suivant la forme de paroi et les propriétés physiques du fluide véhiculé. En ce qui concerne les hélices et l'impulseur de pompe on identifie plusieurs formes de cavitation : la cavitation à bulles, la cavitation à poche, la cavitation de tourbillon marginal, la cavitation de tourbillon d'ogive et la cavitation du tourbillon de coque [10].

➤ Cavitation à bulle

Les bulles ont pour origines des germes de cavitation contenus dans le fluide. Ces germes de cavitation sont des microbulles et il n'y a pas de milieu liquide qui n'en contienne. La teneur en germes (le nombre de germes de cavitation par unité de volume fluide) caractérise la qualité de l'eau. Quand un germe de cavitation se déplace avec le fluide dans la zone de dépression à l'extrados de la pale, se déplace avec le fluide dans la zone de dépression à l'extrados de la pale, elle grossit et devient une bulle clairement visible. La bulle grossit jusqu'à ce qu'elle atteigne la zone de décompression. La rapidité du passage provoque une implosion de la bulle. L'implosion a pour première conséquence d'émettre une onde acoustique. Le bruit rayonné par la cavitation à bulles est très important et si la population de bulle n'est pas trop importante, le phénomène est facilement identifiable à l'oreille. Le phénomène est également assez voilé pour que l'implosion arrache de la matière à la surface de la pale. Les implosions de bulles viennent donc grêler la surface de la pale. Cette érosion de la surface a de multiples

conséquences néfastes pour le bon fonctionnement et la longévité de l'hélice. La pale est d'avantage exposée à la corrosion.

La rugosité de l'état de surface en résultant vient bien sur augmenter le frottement ce qui se traduit par une baisse de rendement. On note une perte de performance. En effet, les bulles viennent affecter la distribution de pression car la pression dans et à la surface des bulles avoisinent la pression de vapeur saturante [11]. Un exemple de la cavitation à bulles sur une hélice est présenté à la figure 20

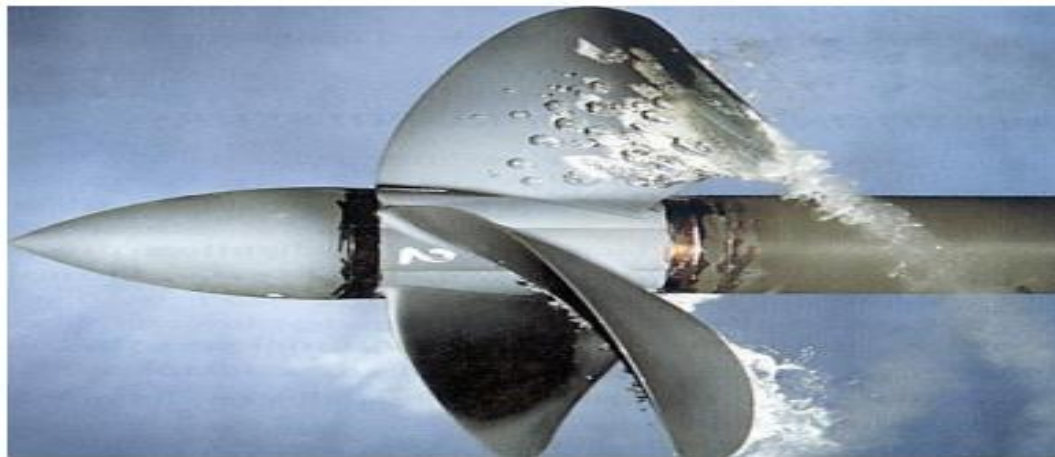


Figure 20:cavitation à bulles suivie d'un nuage de cavitation

➤ Cavitation a poche

La cavitation à poche (Figure 21) est moins bruyante et moins destructive que la cavitation à bulles (pas d'implosion). Un des effets néfastes de la cavitation à poche est la perte de performances du propulseur. De plus, la cavitation a poche peut-être à l'origine de problèmes de vibration dont les conséquences peuvent aller jusqu'à l'endommagement de la structure. Ces vibrations peuvent avoir plusieurs causes comme la fluctuation temporelle des efforts sur les pales due au fait que la pale peut très bien ne Cavite que lorsqu'elle est en position haute ou la pression ambiante p_{amb} est moins élevée ou être due au fait que la poche de cavitation est très instable. Dans les deux cas, les fréquences sont bien sûr très différentes [11].



Figure 21: cavitation a poche partielle

➤ Cavitation de tourbillon marginal

La cavitation de tourbillon marginal est le type de cavitation qui apparait généralement en premier. Le tourbillon marginal existe à cause de la portance développée sur la pale. Ce tourbillon s'explique assez facilement. Reprenons le cas d'une aile portante. Les pressions sous l'aile, soit à l'intrados (pressure Side), sont généralement supérieures à la pression de référence alors qu'au-dessus de l'aile, à l'extrados (suction side), elles sont inférieures à la pression ambiante. L'écoulement ne pouvant s'effectuer au travers de l'aile, les deux écoulements intrados et extrados se rejoignent au bord de fuite. C'est ce qui se passe tout le long de l'envergure. Mais à l'extrémité, le fluide peut contourner l'aile de l'intrados vers l'extrados. L'écoulement s'enroule et forme le tourbillon marginal dans l'eau, la dépression au cœur du tourbillon peut être assez importante pour que la cavitation apparaisse. De plus, on peut voir la trajectoire des pales d'hélice en observant la cavitation de tourbillon marginal (Figure 22) [11].

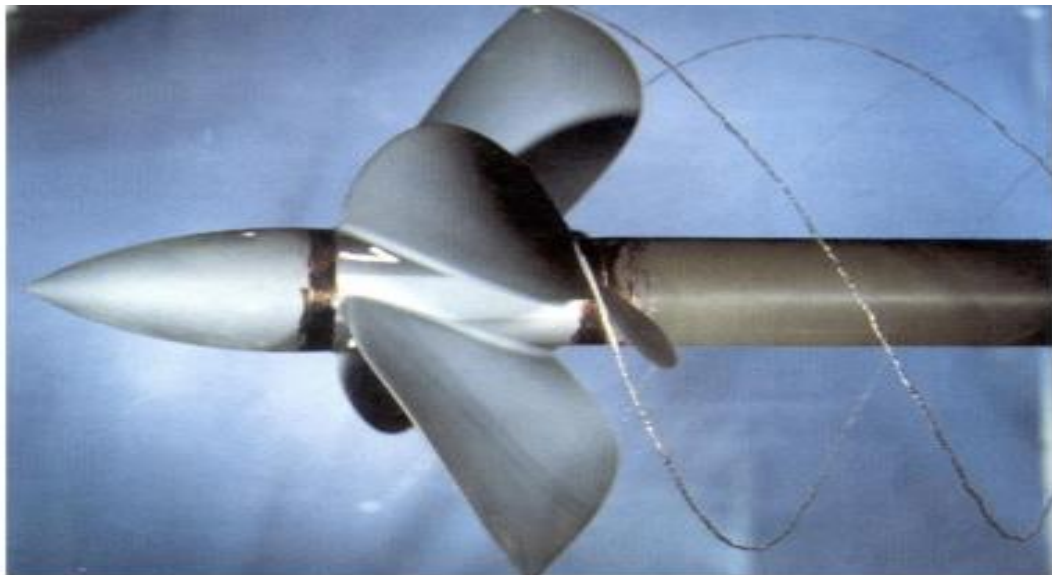


Figure 22: La cavitation de tourbillon marginal

➤ Cavitation de tourbillon d'ogive

Le tourbillon d'ogive (Voir figure 23) est le fruit de conjonction en rotation du tourbillon en emplanture de chaque pale. Le tourbillon d'emplanture est dû au fait que deux couches limites d'épaisseurs différentes, celle de la ligne d'arbre et celle de la pale, se côtoient avec un angle vif (90°). L'intersection des efforts de cisaillement cause l'enroulement de l'écoulement et la formation d'un tourbillon. Vient se combiner aux tourbillons des autres pales en extrémités de l'ogive qui peut alors cavités si la dépression est importante. Une des manières de limiter les risques d'apparition et de développement de ce type de cavitation est de relier les pales au moyeu par un congé de raccordement [11].



Figure 23: La cavitation d'ogive

➤ Cavitation du tourbillon de coque

Ce type de cavitation est moins souvent observé mais s'il se manifeste il s'avère très dérangeant. Le tourbillon de coque (voir la figure 24) prend son origine au sommet de l'hélice et va interagir avec la couche limite développée sur la voute de la coque. Le mécanisme n'a pas été étudié en détail mais on est sûr que le tourbillon ne se développe que si la couche limite de la voute est relativement proche de l'hélice. La dépression au sommet de l'hélice peut aspirer la couche limite si elle est assez proche. Le sens du tourbillon est alors probablement aléatoire mais une fois enclenché il se stabilise [11].



Figure 24: La cavitation du tourbillon de coque

➤ **Super cavitation**

Ce phénomène se rencontre dans la cavitation par poche lorsque la poche de cavitation s'étend au-delà du bord de fuite. On évite ainsi l'érosion raide puisque la portion arrière de la poche, très active au point de vue érosion, se trouve reportée en dehors du profil (Figure 25) [10].



Figure 25: Super cavitation

Effet de la cavitation

➤ **Bruit de cavitation:**

La première manifestation d'une pompe qui cavité est le bruit, qui révèle la présence de microbulles dans l'écoulement. Ce bruit hydraulique généré par la cavitation excite ensuite les parois de la pompe et des tuyauteries proches de celle-ci.

Les tuyauteries, à leur tour, rayonnent ce bruit dans le milieu aérien ambiant. de cette façon, lorsqu'une pompe cavité de manière importante, on enregistre un bruit caractéristique de crépitements et claquement quelquefois assimilé au bruit d'agrégats dans une bétonnière ou de concasseur. Pour des machines de grande taille ou très vite, le bruit aérien généré par la cavitation peut être gênant pour

l'utilisateur ou l'environnement. Cependant, la part du bruit qui incombe directement à la cavitation ne représente qu'une faible partie du bruit rayonné par les pompes [12].

➤ **Pertes de performances :**

Pour des poches de vapeur encore plus développées, les pompes subissent des chutes de leurs performances (hauteur totale d'élévation, rendement, puissance) qui les rend inutilisables ; ce phénomène est souvent décrit comme la chute de caractéristique ou improprement comme le *NPSH_{req}* de la pompe [12].

➤ **Vibration**

Lorsque les poches de vapeur à l'entrée de la pompe atteignent une dimension importante vis-à-vis de la taille de la pompe, du niveau de pression ou du *NPSH_{disp}* à l'entrée de la roue, une augmentation de niveau vibratoire due à la cavitation peut se rencontrer. Parfois, on peut également avoir des interactions entre la pompe en régime de la cavitation et le circuit sur laquelle elle débite [12].

➤ **Erosion**

L'érosion de cavitation se caractérise par un aspect rugueux de la surface attaquée. Elle est en fait le résultat d'un martèlement répété provoqué par des ondes de chocs issus de l'implosion de cavités de vapeur. Cette charge répétée du matériau va provoquer des microfissures, qui, lorsqu'elles se seront complètement développées, vont être responsable d'un arrachement de matière [12].

Effet de la cavitation sur la roue de pompe centrifuge

➤ **Cavitation l'entrée de la roue (pompe centrifuge)**

On observe des cavitations de la fuite marginale provenant de la bague d'étanchéité d'aspiration de la pompe. Cette cavitation peut être à l'origine de bruit, mais elle est rarement érosive, car ces cavités implosent dans la zone de basse pression à l'entrée de la pompe. Une autre manifestation de la cavitation s'observe en sur débit dans la zone de l'arrondi du flasque intérieur de la roue, juste avant l'entrée dans le canal inter-aube. Comme précédemment, cette cavitation ne présente pas généralement de conséquence fâcheuse pour la roue [12].

➤ **Cavitation dans les parties situées à l'amont de la roue**

Dans les zones de fonctionnement à débit réduit (au-dessous de $0.7q_v$) des écoulements de recirculation provenant de la roue remontent à l'amont. Pour des valeurs de NPSH très basses, on peut parfois observer des collapsés de ces cavités qui engendrent toujours bruits et vibration. Dans certains cas, des érosions par cavitation se produisent sur les composants amont de la pompe [12].

➤ **Cavitation dans les diffuseurs**

Cette cavitation s'observe principalement lorsque la pompe fonctionne au-dessus du débit d'adaptation des canaux du diffuseur. La figure 10c montre le type de cavitation que l'on peut rencontrer dans cette configuration.



Comme les pompes à diffuseur sont utilisées dans les canaux des diffuseurs, alors alimentés par un fluide avec une forte sur incidence, sont élevées et collapse des poches de cavitation provoquent des érosions souvent très fortes et rapides.

Ces cavitations sont encore aggravées dans les cas où le constructeur est amené à utiliser le diffuseur comme un organe de réglage de la courbe hauteur /débit, en (désadaptant) son point de calcul vers les faibles débits, pour respecter des formes particulières de fonctionnement de la pompe rendent nécessaires [12].